

**МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ І НАУКИ УКРАЇНИ**  
**НАЦІОНАЛЬНА МЕТАЛУРГІЙНА АКАДЕМІЯ УКРАЇНИ**



**РОБОЧА ПРОГРАМА,**  
**методичні вказівки та індивідуальні завдання**  
**до вивчення дисципліни «Теорія електропривода»**  
**для студентів напрямку підготовки 6.050702 –**  
**електромеханіка**

**МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ І НАУКИ УКРАЇНИ**  
**НАЦІОНАЛЬНА МЕТАЛУРГІЙНА АКАДЕМІЯ УКРАЇНИ**

**РОБОЧА ПРОГРАМА,**  
**методичні вказівки та індивідуальні завдання**  
**до вивчення дисципліни «Теорія електропривода»**  
**для студентів напрямку підготовки 6.050702 –**  
**електромеханіка**

**Затверджено**  
**на засіданні Вченої ради**  
**академії**  
**Протокол № 10 від 18.12.09**

**Дніпропетровськ НМетАУ 2010**

УДК 62-83 (075.8)

Робоча програма, методичні вказівки та індивідуальні завдання до вивчення дисципліни «Теорія електропривода» для студентів напряму підготовки 6.050702 – електромеханіка / Укл. В.Є.Кажан. – Дніпропетровськ: НМетАУ, 2010. - 100 с.

Наведені робоча програма, зміст та методичні вказівки до вивчення матеріалу тем дисципліни, варіанти індивідуальних завдань з прикладами розв'язання задач, контрольні запитання та література.

Призначена для студентів напряму підготовки 6.050702 – електромеханіка заочної форми навчання.

Друкується за авторською редакцією.

Укладач В.Є.Кажан, канд. техн. наук, доц.

Відповідальний за випуск А.В.Ніколенко, канд. техн. наук, доц.

Рецензент О.Ю.Потап, канд. техн. наук, доц. (НМетАУ).

Відповідальний за комп'ютерний набір В.Є.Кажан.

Підписано до друку 05.11.2010. Формат 60x84 1/16. Папір друк. Друк плоский. Облік.-вид. арк. 5,88/ Умов. друк. арк. 5,81. Тираж 100 пр. Замовлення № .

Національна металургійна академія України  
49600, м. Дніпропетровськ-5, пр. Гагаріна, 4

Редакційно-видавничий відділ НМетАУ

## ЗМІСТ

Вступ .....	4
1. Робоча програма навчальної дисципліни «Теорія електропривода».....	6
1.1. Розподіл навчальних годин (заочна форма навчання).....	6
1.2. Характеристика дисципліни.....	7
1.3. Зміст дисципліни за темами, теоретичний курс.....	8
2. Зміст та методичні вказівки за темами дисципліни.....	11
2.1. Тема 1. Структура та механіка електропривода.....	11
2.1.1. Зміст та методичні вказівки до теми 1.....	11
2.1.2. Зведення моментів, мас та сил опору.....	15
2.1.3. Контрольні запитання до теми 1.....	17
2.2. Тема 2. Електромеханічні властивості двигунів постійного струму.....	18
2.2.1. Зміст та методичні вказівки до теми 2.....	18
2.2.2. Розрахунок характеристик та пускового реостата ДПС.....	30
2.2.3. Контрольні запитання до теми 2.....	35
2.3. Тема 3. Електромеханічні властивості асинхронних двигунів.....	36
2.3.1. Зміст та методичні вказівки до теми 3.....	36
2.3.2. Розрахунок механічних характеристик та пускового реостата АД.....	45
2.3.3. Контрольні запитання до теми 3.....	48
2.4. Тема 4. Способи і системи регулювання координат електроприводів постійного струму .....	49
2.4.1. Зміст та методичні вказівки до теми 4.....	49
2.4.2. Регулювання швидкості приводного двигуна постійного струму.....	54
2.4.3. Контрольні запитання до теми 4.....	57
2.5. Тема 5. Частотне регулювання координат електроприводів змінного струму.....	58
2.5.1. Зміст та методичні вказівки до теми 5.....	58
2.5.2. Розрахунок коефіцієнта передачі регулятора напруги системи частотного керування.....	64
2.5.3. Контрольні запитання до теми 5.....	67
2.6. Тема 6. Типові структури регульованих електроприводів.....	67
2.6.1. Зміст та методичні вказівки до теми 6.....	67
2.6.2. Розрахунок параметрів та характеристик електропривода системи ТП-Д.....	73
2.6.3. Контрольні запитання до теми 6.....	78
2.7. Тема 7. Енергетика електропривода.....	78
2.7.1. Зміст та методичні вказівки до теми 7.....	78
2.7.2. Розрахунок та побудова навантажувальної діаграми і вибір ПЕД.....	85
2.7.3. Контрольні запитання до теми 7.....	90
2.8. Тема 8. Перехідні процеси в електроприводах.....	90
2.8.1. Зміст та методичні вказівки до теми 8.....	90
2.8.2. Розрахунок перехідних процесів в ЕП з абсолютно жорсткими зв'язками.....	95
2.8.3. Контрольні запитання до теми 8.....	98
2.9. Зміст практичних та лабораторних занять.....	98
Література.....	99

## ВСТУП

Якість продукції, що виробляється, продуктивність та надійність роботи металургійних механізмів, машин та технологічних комплексів металургійних підприємств у значній мірі залежать від ступеня автоматизації виробничих процесів, ефективності використання автоматизованих електроприводів (АЕП). Сучасні електроприводи є основними споживачами електроенергії, що виробляється. Тому вдосконалення технічних та економічних показників електроприводів дозволяє успішно вирішувати проблему енергозбереження засобами електропривода.

Характерною тенденцією розвитку АЕП є розробка та застосування нових типів електродвигунів та перетворювачів електроенергії, а також подальший розвиток систем керування приводами, побудованих на сучасній елементній базі з використанням засобів програмованих контролерів та комп'ютерної техніки.

Вдосконалення напівпровідникової техніки, засобів керування, розвитку теорії керування створює умови для розробки комплексних електроприводів третього покоління, що представляють собою об'єктно-орієнтовальні комплекси, які включають пристрої керування, діагностики та інтерфейси зв'язку локальних систем автоматизованого електропривода з системою керування вищої ступені ієрархії. Намічується перехід до широкого застосування інтегральних схем підвищеного ступеня інтеграції, до керування від мікро-ЕОМ, використання спеціальних мікропроцесорних пристроїв керування; пристроїв цифрового керування тиристорними перетворювачами та координатами електропривода у цілому. Характерною рисою для комплексних приводів третього покоління являється використання потужних силових пристроїв, модулів, виконаних на сучасній елементній базі.

Складовими успішного вивчення дисципліни є:

- 1) самостійна робота з відпрацювання програмного матеріалу дисципліни згідно з рекомендованою навчальною літературою;
- 2) самостійне розв'язання індивідуальних завдань та прикладів задач;
- 3) знання відповідей на контрольні запитання щодо теми індивідуальних завдань;
- 4) присутність на аудиторних заняттях згідно з навчальним процесом.

До екзамену допускається студент, який самостійно виконав індивідуальні завдання та захистив їх на позитивну оцінку, виконав лабораторні роботи та захистив звіти з цих робіт; крім цього повинен виконати та захистити курсовий проект з дисципліни.

Протягом самостійної роботи рекомендується складати конспект при вивченні окремих тем, принципів положень, співвідношень та процесів, фізичної сутності питання. Після вивчення розділу або теми студент повинен дати відповіді на контрольні запитання. Для більш успішного освоєння

теоретичного матеріалу рекомендується розглядати та вирішувати приклади наведених задач.

Оформлення контрольних робіт у вигляді індивідуальних завдань повинно виконуватися згідно з вимогами відповідних держстандартів, Системи одиниць SI та нормативних документів. Це стосується текстової частини, графіків, формул, таблиць тощо.

При вивченні дисципліни особливу увагу звернути на фізичну сутність та закономірності процесів, що характеризують роботу, теорію та практику використання ЕП, принципи електромеханічного перетворення енергії, на навички та вміння проводити розрахунки та аналіз отриманих результатів цих розрахунків тощо.

На сесіях студенти повинні відвідувати усі види занять (лекції, лабораторні та практичні заняття). А на консультаціях з'ясовувати питання, які виникли при самостійній роботі над навчальним матеріалом.

Перед виконанням індивідуального завдання студент повинен вивчити відповідний навчальний матеріал та ознайомитися з методичними вказівками. Завдання розроблені у декількох варіантах. Вибір варіанта завдання здійснюється за останньою цифрою номера залікової книжки студента.

При виконанні індивідуальних завдань необхідно дотримуватись наступних вимог:

- 1) виконувати завдання у зошитах або на аркушах формату А4;
- 2) на титульному аркуші вказувати групу, прізвище, ім'я, по батькові, назву дисципліни, номер залікової книжки, домашню адресу студента, номер варіанта індивідуального завдання;
- 3) у повному обсязі надавати вихідні дані варіанта завдання;
- 4) розрахункова формула повинна бути записана: у загальному вигляді, з підставленими значеннями величин та з результатом розрахунку з відповідною розмірністю.

# 1. РОБОЧА ПРОГРАМА НАВЧАЛЬНОЇ ДИСЦИПЛІНИ «ТЕОРІЯ ЕЛЕКТРОПРИВОДА»

## 1.1. Розподіл навчальних годин (заочна форма навчання)

	Усього	По семестрах		
		9	10	11
<b>Усього годин за навчальним планом</b>	<b>360</b>	<b>200</b>	<b>160</b>	
у тому числі: <b>аудиторні заняття</b>	<b>56</b>	<b>32</b>	<b>24</b>	
з них: лекції	<b>36</b>	<b>20</b>	<b>16</b>	
лабораторні заняття	<b>12</b>	<b>8</b>	<b>4</b>	
практичні заняття	<b>8</b>	<b>4</b>	<b>4</b>	
семінари	-	-	-	
<b>самостійна робота</b>	<b>304</b>	<b>170</b>	<b>134</b>	
у тому числі при:				
підготовці до аудиторних занять				
підготовці до контрольних заходів	<b>1кр</b>	<b>1кр</b>		
виконанні курсових проектів	<b>1 кп</b>	-	<b>1 кп</b>	
виконанні індивідуальних завдань				
опрацюванні розділів програми, які не викладаються на лекціях				
<b>Підсумковий контроль</b>		<b>екз.</b>	<b>зал.</b>	

## 1.2. Характеристика дисципліни

Навчальна дисципліна “Теорія електропривода” входить до циклу професійно-орієнтованих дисциплін та є однією з найважливіших у системі теоретичної підготовки студентів за напрямом “Електромеханіка”.

Мета вивчення дисципліни – формування у студентів системи знань з питань теорії автоматизованого електропривода (АЕП), на якій ґрунтуються принципи побудови його механічної частини і системи керування, динамічні та енергетичні властивості; придбання практичних навичок та умінь, необхідних для розрахунку параметрів і характеристик та вибору елементів привода, вивчення спеціальних дисциплін, ефективною і якісною експлуатації електромеханічних систем (ЕМС) технологічних комплексів та механізмів металургійних підприємств.

У результаті вивчення дисципліни студент повинен

### **знати:**

- структуру та типові елементи АЕП, їх призначення, передаточні функції, часові, частотні та статичні характеристики;
- електромеханічні властивості приводних електродвигунів (ПЕД) постійного та змінного струмів;
- кінематичні схеми електроприводів (ЕП), основні рівняння електромеханічного перетворення енергії;
- принципи побудови АЕП та їх систем керування, способи та системи регулювання координат ЕП постійного та змінного струмів, функціональні схеми типових систем автоматичного регулювання швидкості одно- та двозонного ЕП постійного струму;
- принципи частотного регулювання швидкості та схеми типових частотно-регульованих асинхронних ЕП;
- основні енергетичні показники і види втрат в ЕП у перехідних та усталених режимах;
- типові теплові режими роботи, методи розрахунку потужності та вибору ПЕД у різних режимах;
- види перехідних процесів та методику визначення показників якості ЕП у перехідних режимах; особливості ПЕД при пуску, реверсуванні та гальмуванні, способи формування перехідних процесів;
- особливості розрахункових схем систем ЕП з пружними зв'язками;
- умовні позначення та зображення елементів на схемах електроприводів;
- особливості ЕП, які використовуються у металургійній галузі;

### **вміти:**

- розраховувати параметри моделей елементів ЕП;
- здійснювати зведення моментів та сил опору до валу ПЕД;
- розраховувати та будувати графіки характеристик ЕП в усталеному та перехідних режимах роботи;
- розраховувати енергетичні показники, навантажувальні діаграми та будувати їх графіки;



- визначати потужність та обирати приводний двигун для різних теплових режимів й проводити перевірку ПЕД за нагріванням і на перевантажувальну здібність;

- розраховувати пружні системи ЕП в усталеному та перехідному режимах;

- розбиратися у роботі схем керування електроприводами;

- читати узагальнені електричні принципові схеми електроприводів, що вивчаються;

- експериментально досліджувати шляхом отримання вимірювальних даних, розраховувати та будувати графіки характеристик ПЕД та інших елементів привода і аналізувати їх властивості;

**бути ознайомленим з:**

- змістом та вимогами основної нормативно-технічної документації, довідкової літератури і держстандартів до АЕП та їх елементів;

- узагальненими, схемами електричними принциповими типових АЕП та їх елементів;

- типовими регульованими електроприводами;

- перспективами та тенденціями розвитку теорії та практики використання електроприводів.

**Критерії успішності** – отримання позитивної оцінки за результатами захисту індивідуальних завдань та контрольних заходів у тестовій формі і лабораторних робіт, виконання вимог навчальної програми з дисципліни.

**Засоби діагностики успішності навчання** – комплекти тестових контрольних заходів та запитань при виконанні і захисті індивідуальних завдань та лабораторних робіт.

**Зв'язок з іншими дисциплінами** – дисципліна є завершальною при підготовці бакалаврів за напрямом “Електромеханіка”. До забезпечуючих навчальних дисциплін, на яких ґрунтується викладання даної дисципліни, відносяться “Вища математика”, “Фізика”, “Теорія автоматичного керування”, “Електричні машини”, “Елементи АЕП”, “Мікропроцесорна техніка” та ін.

**Набуті знання та уміння** використовуються при вивченні таких дисциплін, як “Системи керування електроприводами”, “Моделювання електромеханічних систем”, “Спеціальні електроприводи і автоматизація технологічних комплексів” та інших спеціальних дисциплін, при виконанні курсових та випускних **кваліфікаційних робіт**.

### 1.3. Зміст дисципліни за темами, теоретичний курс

**Структура та механіка електропривода.** Вступ. ЕП у системах автоматизації металургійного виробництва. Структура ЕП. Типові елементи. Зображення та позначення елементів на схемах ЕП. Види схем ЕП.

Математичний опис елементів та АЕП. Диференційні рівняння та передаточні функції елементів та системи. Часові та частотні характеристики типових динамічних ланок. Кінематичні схеми ЕП та зведення моментів та сил

опору. Основні рівняння електромеханічного перетворення в електричних машинах. Рівняння механічної та електричної рівноваги ЕП.

**Електромеханічні властивості двигунів постійного та змінного струмів.** Механічні характеристики та статична стійкість ЕП. Механічні характеристики виробничих механізмів та електродвигунів (ЕД). Час прискорення та сповільнення ЕП. Визначення оптимального передаточного відношення.

Режими роботи ЕМ. Схема вмикання та механічні характеристики ДПС незалежного збудження. Енергетичні режими роботи ДПС. Гальмівні режими, пуск та пускові діаграми ДПС.

Електромеханічні властивості ДПС з паралельним, послідовним та змішаним збудженням, асинхронних та синхронних двигунів у двигунному та гальмівних режимах. Пуск ЕД.

**Способи та системи регулювання координат ЕП.** Принципи побудови ЕП та їх систем керування. Поняття про регулювання координат ЕП. Структури систем керування (СК) ЕП. Особливості побудови багатокординатних СК ЕП. Типові вузли розімкнених СК ЕП. Принципи автоматичного керування ПЕД. Типові вузли РКСК пуском, гальмуванням та реверсуванням ДПС та АД.

Регулювання швидкості, струму й моменту ЕП постійного струму. Основні показники та способи регулювання швидкості ЕП. Регулювання швидкості ДПС незалежного збудження зміною магнітного потоку, реостатне, напругою кола якоря та шунтуванням якоря.

Одноконтурні системи регулювання координат ЕП постійного струму САР швидкості з жорстким негативним зворотним зв'язком (ЗЗ) з напруги. ЕП з ЗЗ зі швидкості.

Двоконтурні САР координат ЕП постійного струму. ЕП з ЗЗ зі швидкості та струму якоря. Система підпорядкованого регулювання (СПР) швидкості. Приклади СПР.

Двобонне регулювання швидкості ДПС. Функціональна та структурна алгоритмічна схеми системи. Приклад.

Система тиристорний перетворювач-двигун постійного струму (ТП-Д). Функціональні схеми, характеристики та робота.

Система генератор-двигун постійного струму. Схема електрична принципова. Склад, режими роботи: регулювання швидкості та гальмування. Комплекти ЕП.

**Частотне регулювання координат електроприводів змінного струму.** Способи регулювання швидкості електроприводів змінного струму. Регулювання швидкості зміною кількості пар полюсів АД. Реостатне регулювання швидкості АД. Регулювання швидкості АД зміною напруги та частотою напруги статора.

Частотне і частотно-струмове регулювання швидкості асинхронних електроприводів. Електромашинні перетворювачі частоти. Принципи частотного регулювання швидкості асинхронних приводів.

Схеми асинхронних електроприводів з частотним й частотно-струмовим регулюванням швидкості. Перетворювачі частоти з автономними інверторами.

Схема частотного регулювання швидкості асинхронного електропривода з АІН.  
Схема частотного регулювання швидкості асинхронного електропривода з АІС.

**Типові структури регульованих електроприводів.** Регулювання координат в електроприводах з різними джерелами енергії. Вимоги до електроприводів за якістю регулювання координат. Регулювання координат електропривода у системі джерело струму – двигун. Привод з асинхронним вентильним каскадом.

Системи слідкуючих електроприводів. Призначення та функціональна схема силового слідкуючого привода. Режими роботи силового слідкуючого привода. Система регулювання положення електропривода.

Системи взаємозв'язаних електроприводів. Загальні відомості про взаємозв'язані електроприводи. Дводвигунний електропривод постійного струму. Дводвигунний асинхронний електропривод. Поняття електричного валу.

**Енергетика електропривода.** Основні енергетичні показники та втрати енергії в електроприводах. Основні енергетичні показники електроприводів. Втрати потужності та ККД електричних машин. Втрати потужності та енергії в електроприводі в усталеному режимі. Коефіцієнти корисної дії та потужності електропривода.

Втрати потужності та енергії в електроприводах у перехідних процесах. Визначення втрат в електроприводах у перехідних режимах. Способи та напрямки підвищення енергетичних показників електроприводів.

Теплові процеси в електричних двигунах. Нагрівостійкість ізоляції та перегрів електричних машин. Нагрівання та охолодження електричних машин. Типові теплові режими роботи електродвигунів.

Розрахунок потужності та вибір приводного електродвигуна. Основні групи виробничих механізмів. Поняття навантажувальної діаграми. Методи розрахунку потужності та вибору приводного електродвигуна. Перевірка приводного двигуна за нагріванням. Визначення допустимої кількості вмикань асинхронних двигунів з короткозамкненим ротором.

**Перехідні процеси в електроприводах.** Загальні відомості про перехідні процеси в ЕП. Основні види перехідних процесів в ЕП. Показники якості ЕП у перехідному режимі та методи їх визначення.

Перехідні процеси в ЕП при пуску ДПС з незалежним збудженням та лінійними механічними характеристиками. Перехідні процеси в ЕП при пуску ДПС з незалежним збудженням до основної швидкості без урахування індуктивності якоря. Реостатний пуск та пускові діаграми.

Перехідні процеси в ЕП при пуску ДПС з незалежним збудженням. Пуск ДПС до основної швидкості з урахуванням індуктивності якоря і швидкості вище основної. Перехідні процеси у ДПС з паралельним та послідовним збудженням.

Перехідні процеси в ЕП при гальмуванні ДПС з незалежним збудженням. Динамічне гальмування. Гальмування противмиканням та реверсуванню ДПС. Особливості гальмування ДПС від швидкості вище основної до основної.

Перехідні процеси в асинхронних ЕП та їх формування. Перехідні процеси при пуску АД. Гальмування та реверсування АД. Задачі формування та оптимізації перехідних процесів. Формування перехідних процесів в ЕП постійного та змінного струмів.

**Пружні системи електроприводів.** Загальні відомості про пружні системи та розрахункові схеми електроприводів. Поняття та види пружних систем ЕП. Узагальнені розрахункові схеми багатомасових пружних систем ЕП.

Динаміка багатомасових пружних систем електроприводів. Рівняння руху три-, дво- та одномасової систем ЕП. Особливості роботи пружних систем у різних режимах.

Передавальні пристрої електроприводів. Класифікація, побудова та робота. Оптимізація передаточного відношення та похибки механічних передач і методика їх компенсації.

Основні напрямки енергозбереження засобами електроприводу. Енергетична ефективність ЕП. Вплив тиристорних перетворювачів на живильну мережу та пристрої компенсації. Підвищення енергетичної ефективності електромеханічних систем використанням загальних живильних шин постійного струму.

Енергозбереження в електромеханічних системах з різними електроприводами. Основні напрямки енергозбереження. Енергозбереження в ЕМС із некерованими та керованими ЕП. Основні втрати енергії та види схем керованих ЕП змінного струму.

Основні етапи розрахунку та дослідження автоматизованого електропривода. Основні задачі та етапи розробки і дослідження ЕП. Перспективи розвитку АЕП.

## **2. ЗМІСТ ТА МЕТОДИЧНІ ВКАЗІВКИ ЗА ТЕМАМИ ДИСЦИПЛІНИ**

### **2.1. Тема 1. Структура та механіка електропривода**

#### **2.1.1. Зміст та методичні вказівки до теми 1**

**Зведення моментів та мас електропривода.** Механічна частина електроприводу, наприклад підйомного механізму (рис. 2.1) містить у собі пов'язані рухомі маси приводного електродвигуна (ПЕД), механічного передаточного пристрою (МПП) та виконавчого органа робочої машини (РМ). Двигун через з'єднувальну муфту  $M_1$ , механічний передаточний пристрій (редуктор) з муфтою  $M_2$  обертає барабан з навитим контактом, на якому підвішений вантаж масою  $m_{\text{ван}}$ .

Кожен елемент кінематичної схеми має свою швидкість (кутову чи лінійну) і характеризується моментом інерції  $J$  або своєю масою  $m$ , а також сукупністю діючих на нього моментів або сил. Отже, механічна частина електроприводу являє собою систему зв'язаних мас, що рухаються з різними швидкостями обертально чи поступально і характеризується передаточним

відношенням  $i$  та ККД  $\eta$ . Крім того, під дією моментів опору механічні ланки системи (канати, довгі вали, зубчасті зчеплення та ін.) деформуються, а у зубчастих зчепленнях мають зазори. Якщо враховувати усі чинники, то розрахункова схема механічної частини електроприводу буде являти собою багатомасову систему з пружними зв'язками та зазорами. Тому однією з перших задач проектування й досліджування електроприводу є складання розрахункової схеми, що враховує тільки основні чинники.

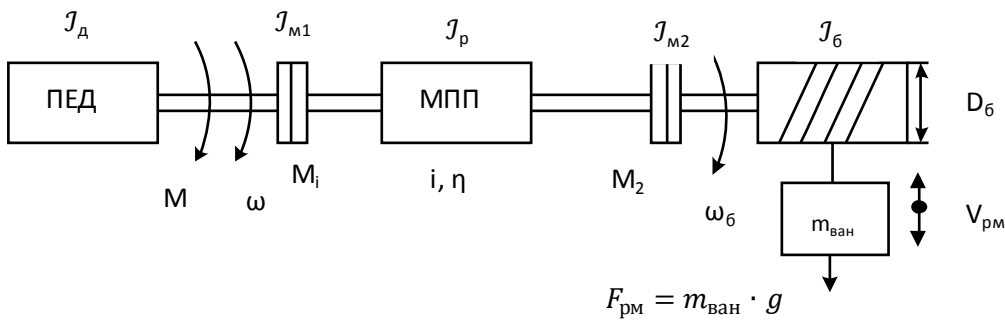


Рис. 2.1. Кінематична схема підйомного механізму

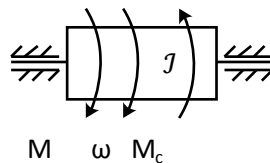


Рис. 2.2. Розрахункова схема механічної частини ЕП

У більшості практичних ситуацій в інженерних розрахунках, що не потребують великої точності, можна знехтувати зазорами й пружністю елементів. При цих припущеннях розрахункова схема механічної частини ЕП зводиться до одномасової ланки (рис. 2.2), усі елементи якої обертаються з однаковою швидкістю (швидкість ланки зведення), у якості якої звичайно вибирається швидкість двигуна чи виробничого механізму. Для збереження незмінними статичні та динамічні властивості реальної системи, необхідно привести (перерахувати) параметри однієї швидкості (одного елемента зведення). Якщо в якості елемента зведення вибраний двигун, то така операція перерахунку параметрів називається зведенням моментів опору, інерції та мас до вала (швидкості) двигуна. Якщо ж як елемент зведення вибрана робоча машина, то це – зведення моментів опору та інерції до вала (швидкості) робочої машини.

Якщо зведення моментів опору та інерції відбувається до вала (швидкості) двигуна, то розрахункова схема механічної частини електроприводу являє собою одну масову ланку, що обертається зі швидкістю двигуна  $\omega$ , яка має зведений момент інерції  $J$ , статичний момент опору  $M_c$  та знаходиться під дією електромагнітного моменту двигуна  $M$  (рис. 2.2). Отримана проста розрахункова схема справедлива для ідеальних механічних

ланок без пружності та зазорів і дозволяє замінити складну кінематичну схему механізму одномасовою ланкою, однаковою для усіх механізмів.

**Зведення моментів опору елементів до вала двигуна, що рухаються обертально.** У даному випадку усі моменти опору зводяться до вала (швидкості) двигуна. Для випадку, коли виробничий механізм здійснює обертальний рух, найпростіша кінематична схема якого наведена на рис. 2.3, а розрахункова схема – рис. 2.2.

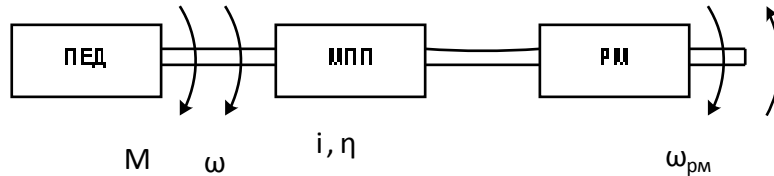


Рис. 2.3. Кінематична схема електропривода обертального руху

Умовою зведення моментів опору до вала двигуна є рівність потужностей на валу двигуна початкової (рис. 2.3) та розрахункової (зведеної) схем (рис. 2.2). Згідно з позначеннями, що прийняті на цих рисунках, потужність початкової та розрахункової схем визначається таким чином

$$P_n = \frac{P_{рм}}{\eta} = \frac{M_{рм}\omega_{рм}}{\eta}; P_{роз} = M_c \omega. \quad (2.1)$$

Прирівнюючи ці рівняння, отримаємо

$$M_c = \frac{M_{рм}\omega_{рм}}{\eta\omega} = \frac{M_{рм}}{i\eta}, \quad (2.2)$$

де  $i = \omega/\omega_{рм}$  - передаточне відношення редуктора.

Якщо робоча машина здійснює поступальний рух, початкова схема якого наведена на рис. 2.1, то сила опору робочої машини  $F_{рм}$  зводиться до вала (швидкості) двигуна у вигляді моменту опору. При цьому розрахункова схема залишається незмінною (рис. 2.2).

Для розглянутих початкової та розрахункової схем руху справедливі співвідношення

$$P_n = \frac{P_{рм}}{\eta} = \frac{F_{рм}V_{рм}}{\eta}; P_{роз} = M_c \omega.$$

Із сумісного рішення маємо

$$M_c = \frac{F_{рм}V\omega_{рм}}{\eta\omega} = \frac{m_{ванг}V_{рм}}{\eta\omega} = \frac{F_{рм}\rho}{\eta}, \quad (2.3)$$

де  $\rho = V_{\text{рм}}/\omega$  - радіус зведення зусилля робочої машини  $F_{\text{рм}}$  до вала двигуна у вигляді моменту опору.

**Зведення моментів інерції до вала двигуна.** Операцію зведення моментів інерції та мас розглянемо на прикладі механізму, кінетична схема якого наведена на рис. 2.1, а розрахункова - на рис. 2.2.

Зведення моментів інерції та мас робиться на основі балансу запасу кінетичної енергії реальної та розрахункової схем. Запас кінетичної енергії початкової схеми визначається сумою кінетичних енергій усіх рухомих ланок і згідно з рис. 2.1 маємо

$$W_n = \frac{J_d \omega^2}{2} + \frac{J_{M1} \omega^2}{2} + \frac{J_p \omega^2}{2} + \frac{J_{M2} \omega_6^2}{2} + \frac{J_6 \omega_6^2}{2} + \frac{m_{\text{ван}} V_{\text{рм}}^2}{2}. \quad (2.4)$$

Запас кінетичної енергії розрахункової схеми характеризується зведеним моментом інерції

$$W_{\text{роз}} = J \omega^2 / 2. \quad (2.5)$$

Прирівнюючи праві частини рівнянь, отримаємо вираз для зведеного моменту інерції

$$J = J_d + J_{M1} + J_p + \frac{J_{M2}}{i^2} + \frac{J}{i^2} + \frac{m_{\text{ван}} V_{\text{рм}}^2}{\omega^2}. \quad (2.6)$$

У загальному випадку зведений до вала двигуна момент інерції системи визначається як

$$J = J_d + J_\Sigma + \sum_{k=1}^n \frac{J_k}{i_k^2} + \sum_{k=1}^n m_k \rho_k^2, \quad (2.7)$$

де  $J_d$  - момент інерції двигуна,  $J_\Sigma$  - сума моментів інерції інших механічних ланок, що обертаються зі швидкістю двигуна;  $J_k$  - момент інерції  $k$ -го обертального елемента;  $i_k$  - передаточне відношення редуктора від вала двигуна до  $k$ -го обертального елемента;  $m_k$  - маса  $k$ -го елемента, що рухається поступально;  $\rho_k = V_k/\omega$  - радіус зведення  $k$ -го елемента, що рухається поступально, до вала двигуна.

**Зведення моментів опору і інерції до маси елементів, що рухаються поступально.** У підйомно-транспортних установках іноді доцільно дослідити безпосередньо рух робочого органу, що рухається поступально. У цьому випадку момент, що розвивається двигуном, зводиться до вала (швидкості) робочої машини у вигляді зведеного зусилля  $F$ , що прикладене до зведеної маси  $m$ , яка рухається поступально і включає зведені моменти інерції. При цьому розрахункові схеми набувають вигляду, який наведено на рис. 2.4.

При зведенні моменту двигуна до ланки, що рухається поступально, виходять з рівності потужності на валу робочої машини реальної (рис. 2.1) та розрахункової (рис. 2.4, а) схем. Оскільки потік енергії у цьому випадку

спрямований від двигуна до робочої машини, то рівняння балансу потужностей має вигляд

$$M\omega\eta = FV_{pm} \quad (2.8)$$

Звідки зведене зусилля  $F$  визначається як

$$F = \frac{M\omega\eta}{V_{pm}} = \frac{M\eta}{\rho} \quad (2.9)$$

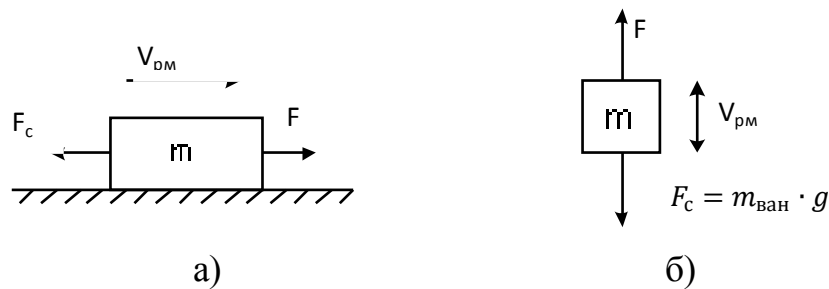


Рис. 2.4. Розрахункова схема при зведенні моментів опору та інерції до ланки, що рухається поступально

У випадку, що розглядається, моменти інерції ланок також зводяться до швидкості поступального руху робочої машини у вигляді зведених мас. Сумарна зведена маса визначається виходячи з рівності запасу кінетичної енергії реальної та розрахункової (зведеної) схем. З урахуванням позначень, що прийняті на рис. 2.1 і рис. 2.4, вказана рівність запишеться як

$$\frac{mV_{pm}^2}{2} = \frac{J_d\omega^2}{2} + \frac{J_{M1}\omega^2}{2} + \frac{J_p\omega^2}{2} + \frac{J_{M2}\omega_6^2}{2} + \frac{J_6\omega_6^2}{2} + \frac{m_{ван}V_{pm}^2}{2}, \quad (2.10)$$

звідки отримуємо вираз для сумарної зведеної маси системи

$$m = \frac{J_d\omega^2}{V_{pm}^2} + \frac{J_{M1}\omega^2}{V_{pm}^2} + \frac{J_p\omega^2}{V_{pm}^2} + \frac{J_{M2}\omega_6^2}{V_{pm}^2} + \frac{J_6\omega_6^2}{V_{pm}^2} + m_{ван}. \quad (2.11)$$

### 2.1.2. Зведення моментів, мас та сил опору

Мета індивідуального завдання: поглибити теоретичні знання студентів з динамічних властивостей механічної частини ЕП; отримати практичні навички та уміння з питань зведення моментів, мас та сил опору.

**Постановка задачі.** Згідно з вихідними даними варіанта завдання для підйомного механізму необхідно:

- 1) надати кінематичну схему підйомного механізму;
- 2) визначити зведені до вала двигуна статичний момент опору  $M_c$  та момент інерції системи  $J$  при підйомі вантажу;
- 3) розрахувати зведені до вала робочої машини зусилля  $F$  та масу  $m$  системи.



Вихідні дані варіантів завдання наведено у таблиці 1, де  $m_{\text{ван}}$  - маса вантажу;  $V_{\text{рм}}$  та  $\omega$  – швидкості лінійна вантажу та кутова ПЕД;  $D_6$  - діаметр барабану;  $J_6$ ,  $J_{\text{д}}$ ,  $J_{\text{р}}$ ,  $J_{\text{М1}}$  та  $J_{\text{М2}}$  - моменти інерції відповідно барабана, двигуна, редуктора, першої та другої електромагнітних муфт;  $\eta$  – ККД механічної передачі та  $M$  – обертовий момент ПЕД.

Таблиця 2.1

Вихідні дані варіантів завдання

№ варіанта	$m_{\text{ван}}$ , кг	$V_{\text{рм}}$ , м/с	$\omega$ , рад/с	$D_6$ , м	$J_6$ , кг·м <sup>2</sup>	$J_{\text{д}}$ , кг·м <sup>2</sup>	$J_{\text{р}}$ , кг·м <sup>2</sup>	$J_{\text{М1,2}}$ , кг·м <sup>2</sup>	$J_{\text{М2,2}}$ , кг·м <sup>2</sup>	$\eta$	$M$ , Н·м
0	5000	0,75	45	0,85	12,0	0,75	0,15	0,12	1,6	0,80	500
1	4500	1,0	50	0,8	11,5	0,70	0,15	0,1	1,5	0,82	500
2	4000	1,25	55	0,75	11,0	0,65	0,15	0,09	1,4	0,84	500
3	3500	1,5	60	0,7	10,5	0,60	0,15	0,08	1,3	0,86	500
4	3000	1,75	65	0,65	10,0	0,55	0,15	0,07	1,2	0,88	500
5	2500	2,0	70	0,6	9,5	0,50	0,15	0,06	1,1	0,81	500
6	2000	2,25	75	0,55	9,0	0,45	0,15	0,05	1	0,83	500
7	1500	2,5	80	0,5	8,5	0,40	0,15	0,04	0,9	0,85	500
8	1000	2,75	85	0,45	8,0	0,35	0,15	0,03	0,8	0,87	500
9	500	3,0	90	0,4	7,5	0,30	0,15	0,02	0,7	0,89	500

**Приклад задачі зведення.** Для підйомного механізму, кінематична схема якого наведена на рис. 1, необхідно визначити зведені до вала двигуна статичний момент опору  $M_c$  та сумарний момент інерції системи  $J$  при підйомі вантажу масою  $m_{\text{ван}} = 1500$  кг зі швидкістю  $V_{\text{рм}} = 1,5$  м/с. Кутова швидкість двигуна  $\omega = 97$  рад/с. Діаметр барабана  $D_6 = 0,7$  м, момент інерції барабана  $J_6 = 8,5$  кг·м<sup>2</sup>. Момент інерції двигуна  $J_{\text{д}} = 0,45$  кг·м<sup>2</sup>, зведені до вала момент інерції редуктора  $J_{\text{р}} = 0,12$ ; муфти  $M_1$   $J_{\text{М1}} = 0,035$  кг·м<sup>2</sup>; муфти  $M_2$   $J_{\text{М2}} = 0,9$  кг·м<sup>2</sup>; ККД передач  $\eta = 0,82$ . Крім того, визначити зведені до поступального руху (до вала робочої машини) зусилля та масу, якщо момент двигуна  $M = 400$  Н·м, розрахункова схема для цього випадку наведена на рис. 2.4.

**Розв'язання задачі.** Момент робочої машини (статичний момент), зведений до вала двигуна при підніманні вантажу,

$$M_c \uparrow = \frac{m_{\text{ван}} g V_{\text{рм}}}{\eta \omega} = \frac{1500 \cdot 9,81 \cdot 1,5}{0,82 \cdot 97} = 277,5 \text{ Н} \cdot \text{м}.$$

Кутова швидкість барабана (робочої машини)

$$\omega_6 = \omega_{\text{рм}} = \frac{2V_{\text{рм}}}{D_6} = \frac{2 \cdot 1,5}{0,7} = 4,29 \text{ рад/с.}$$

Передаточне відношення редуктора

$$i = \frac{\omega}{\omega_{\text{рм}}} = \frac{97}{4,29} = 22,6.$$

Сумарний момент інерції системи, зведений до вала двигуна

$$\begin{aligned} J &= J_{\text{д}} + J_{\text{М1}} + J_{\text{р}} + \frac{J_{\text{М2}}}{i^2} + \frac{J_6}{i^2} + \frac{m_{\text{ван}} V_{\text{рм}}^2}{\omega^2} = \\ &= 0,45 + 0,035 + 0,12 + \frac{0,9}{22,6^2} + \frac{8,5}{22,6^2} + \frac{1500 \cdot 1,5^2}{97^2} = 0,98 \text{ кг} \cdot \text{м}^2. \end{aligned}$$

Зведений до поступального руху момент двигуна (зведене зусилля) до вала робочої машини дорівнює

$$F = \frac{M\omega\eta}{V_{\text{рм}}} = \frac{400 \cdot 97 \cdot 0,82}{1,5} = 21211 \text{ Н} \cdot \text{м.}$$

Зведена до вала робочої машини маса система буде

$$\begin{aligned} m &= \frac{1}{V_{\text{рм}}^2} (J_{\text{д}} \omega^2 + J_{\text{М1}} \omega^2 + J_{\text{р}} \omega^2 + J_{\text{М2}} \omega_6^2 + J_6 \omega_6^2) + m_{\text{ван}} = \\ &= \frac{1}{1,5^2} (0,45 \cdot 97^2 + 0,035 \cdot 97^2 + 0,9 \cdot 4,29^2 + 8,5 \cdot 4,29^2) + 1500 = 4106,8 \text{ кг.} \end{aligned}$$

### 2.1.3. Контрольні запитання до теми 1

1. Що називається кінематичною схемою електропривода?
2. Кінематична схема ЕП з обертальним рухом.
3. Кінематична схема ЕП з поступальним рухом.
4. Основні фізичні величини, які характеризують механіку елементів та ЕП у цілому.
5. Активні та реактивні моменти та сили.
6. Фізична сутність процесу зведення сил та моментів діючих в електроприводі.
7. Як визначається величина кінетичної енергії елементів при поступальному та обертальному русі?

8. Зведення моментів інерції до вала приводного двигуна при обертальному та поступальному русі.
9. Зведення сил опору та мас до вала приводного двигуна при обертальному та поступальному русі.
10. Чому дорівнює момент інерції циліндра відносно поздовжньої осі?
11. Яким співвідношенням характеризується зв'язок між моментом інерції та маховим моментом?
12. Рівняння рівноваги сил при поступальному русі в усталеному та перехідному режимах.
13. Рівняння моментів інерції ЕП при обертальному русі в усталеному та перехідному режимах.
14. Основні принципи електромеханічного перетворення енергії в електричних машинах.
15. Рівняння балансу напруг ПЕД на прикладі ДПС з паралельним збудженням та його складові.
16. Рівняння балансу потужностей ПЕД та його складові.
17. Що називається електромеханічною та механічною характеристиками?
18. Режими роботи електричних машин.
19. Що називається жорсткістю механічної характеристики та як вона визначається?
20. Умови статичної стійкості ЕП за жорсткостями механічних характеристик ПЕД та робочого механізму.
21. Як визначається час прискорення та сповільнення ЕП?
22. Як визначається оптимальне передаточне відношення ЕП?

## **2.2. Тема 2. Електромеханічні властивості двигунів постійного струму**

### **2.2.1. Зміст та методичні вказівки до теми 2**

Розглянемо основні співвідношення, характеристики та реостатний пуск на прикладі двигуна постійного струму незалежним збудженням, схема вмикання якого наведена на рис. 2.5. Якір та обмотка збудження машини (ОЗМ) живляться від різних джерел напруги, що дозволяє незалежно регулювати напругу на якорі та обмотці збудження і тим самим змінювати швидкість у широких межах. Обмотка додаткових полюсів (ДП) і компенсаційна обмотка (КО), які використовують для покращення комутації та компенсації реакції якоря, не беруть участі у процесі електромеханічного перетворення енергії. Їх параметри враховуються при визначенні повних опорів та індуктивності якірного кола.

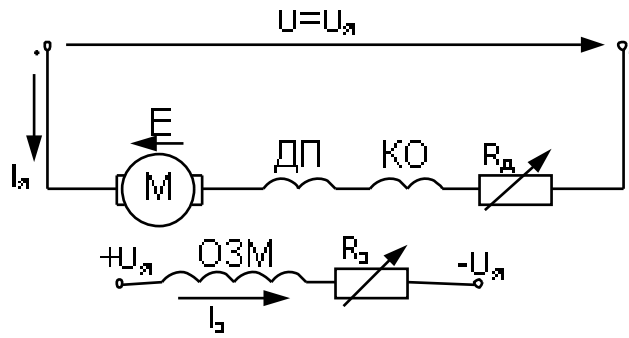


Рис. 2.5. Схема вмикання двигуна постійного струму незалежного збудження

Під час аналізу роботи двигуна передбачається відсутність реакції якоря, параметри джерела живлення постійні, магнітний потік номінальний і не залежить від навантаження.

Перетворення енергії в ДПС базується на трьох фундаментальних законах електротехніки:

- законі електромагнітної індукції

$$E = k \cdot \Phi \cdot \omega; \quad (2.12)$$

- законі електромагнітних сил

$$M = k \cdot \Phi \cdot I_я; \quad (2.13)$$

- другому законі Кірхгофа, згідно з яким в усталеному режимі роботи двигуна прикладена напруга мережі врівноважується наведеною в обмотці якоря ЕРС двигуна (E) і спадом напруги в якірному колі (рівняння балансу напруг за колом якоря), тобто

$$U = U_я = E + I_я \cdot R; \quad (2.14)$$

де  $k = pN/2\pi a$  – конструктивна стала;  $p$  – кількість пар полюсів двигуна;  $N$  – кількість активних провідників обмотки якоря;  $\Phi$  – магнітний потік двигуна;  $I_я$  – струм якоря;  $\omega$  – кутова швидкість двигуна;  $R = R_я + R_д$  – повний опір якірного кола;  $R_я = r_{оя} + r_{ко} + r_{дп} + r_{пр} + r_{щ}$  – опір кола якоря, що включає опір обмотки якоря ( $r_{оя}$ ), компенсаційної обмотки ( $r_{ко}$ ), додаткових полюсів ( $r_{дп}$ ), з'єднувальних проводів ( $r_{пр}$ ) та щиток ( $r_{щ}$ );  $R_д$  – опір додаткового резистора;  $k\Phi$  – конструктивний коефіцієнт двигуна (коефіцієнт ЕРС, моменту), який у системі СІ в рівняннях (2.12) і (2.14) має однакове значення, а – кількість пар паралельних виток.

Із сумісного розв'язання виразів (2.12) і (2.14) отримуємо рівняння електромеханічної характеристики двигуна  $\omega = f(I_я)$

$$\omega = \frac{U_M - I_{\text{я}} \cdot R}{k\Phi} = \frac{U_M}{k\Phi} - \frac{I_{\text{я}} \cdot R}{k\Phi} = \omega_0 - \Delta\omega. \quad (2.15)$$

Підставивши у (2.15)  $I_{\text{я}} = \frac{M}{k\Phi}$ , згідно з (2.13) одержимо рівняння механічної характеристики двигуна  $\omega = f(M)$

$$\omega = \frac{U_M}{k\Phi} - \frac{MR}{(k\Phi)^2} = \omega_0 - \Delta\omega. \quad (2.16)$$

При потоці  $\Phi = \text{const}$  електромеханічна і механічна характеристики двигуна є прямими лініями, що виходять з однієї точки  $\omega_0$  (точка А рис. 2.6), в якій  $I_{\text{я}} = 0$  і  $M = 0$ , що відповідає режиму ідеального холостого ходу. Швидкість  $\omega_0$ , відповідна цьому режиму, називається швидкістю ідеального холостого ходу і визначається як

$$\omega_0 = \frac{U_M}{k\Phi}. \quad (2.17)$$

Струм якоря, що визначається виразом

$$I_{\text{я}} = \frac{U - E}{R}, \quad (2.18)$$

у режимі ідеального холостого ходу дорівнює нулю, що можливо лише тоді, коли  $E = k\Phi\omega_0 = U$ .

На практиці цей режим може бути отриманий лише у разі, якщо на вал двигуна з боку механізму діє момент, який компенсує постійні втрати в двигуні: механічні та втрати в сталі (це можливо, наприклад, при спуску вантажу).

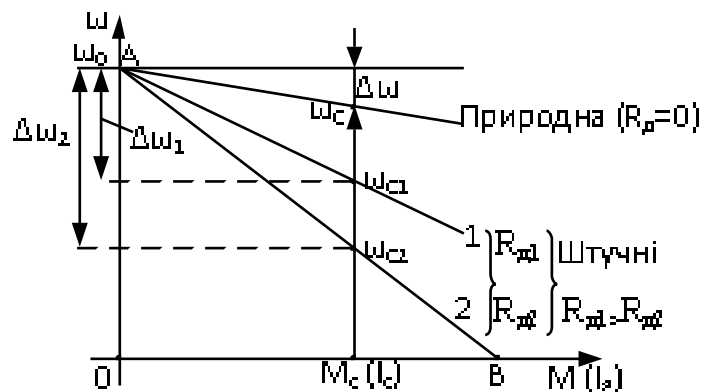


Рис. 2.6. Механічні (електромеханічні) характеристики ДПС

Другі члени рівнянь електромеханічної (2.15) і механічної (2.16) характеристик характеризують статичний спад (перепад) швидкості двигуна (рис. 2.6) щодо швидкості  $\omega_0$  під дією відповідно струму якоря та моменту двигуна

$$\Delta\omega = \frac{I_{\text{я}}(R_{\text{я}} + R_{\text{д}})}{k\Phi} = \frac{M(R_{\text{я}} + R_{\text{д}})}{(k\Phi)^2}. \quad (2.19)$$

Якщо в наведеному рівнянні допустити, що  $R_d = 0$ , то отримаємо спад швидкості  $\Delta\omega$  на природній характеристиці (рис. 2.6).

Якщо швидкість двигуна, увімкнутого до мережі, дорівнює нулю (точка В рис. 2.6), то такий режим роботи двигуна називається режимом короткого замикання. Оскільки у цьому режимі ЕРС  $E=0$ , то струм короткого замикання (струм якоря нерухомого двигуна) з виразу (2.18) визначається як

$$I_{к.з} = \frac{U}{(R_я + R_d)}, \quad (2.20)$$

звідки момент короткого замикання  $M_{к.з} = k\Phi I_{к.з} = k\Phi \cdot U / (R_я + R_d)$ .

З урахуванням цих співвідношень рівняння механічної та електромеханічної характеристик можна подати в іншому вигляді:

$$\omega = \omega_0 \left(1 - \frac{M}{M_{к.з}}\right); \quad \omega = \omega_0 \left(1 - \frac{I_я}{I_{к.з}}\right). \quad (2.21)$$

Якщо в якірне коло двигуна ввімкнутий додатковий опір, то отримані при цьому характеристики називаються штучними (іноді їх називають реостатними). Ці характеристики також виходять з точки  $\omega_0$  і лінійні, як природна характеристика, але мають значно більший нахил до осі моментів, оскільки зі зростанням  $R_d$  збільшується

$$\Delta\omega = \frac{I_я(R_я + R_d)}{k\Phi} \quad \text{або} \quad \Delta\omega = \frac{M(R_я + R_d)}{(k\Phi)^2},$$

внаслідок цього при одному й тому ж моменті опору із зростанням  $R_d$  зменшується швидкість.

Розглянемо більш детально роль, яку відіграє ЕРС двигуна під час перетворення енергії, здійснюваного електродвигуном. Нехай двигун до прикладення статичного навантаження працював з кутовою швидкістю холостого ходу  $\omega = \omega_0$ , то при збільшенні навантаження кутова швидкість знижуватиметься, прямуючи за відповідною механічною характеристикою. У результаті цього  $E = k \cdot \Phi \cdot \omega$  також зменшуватиметься, що приведе до збільшення струму якоря та моменту двигуна  $M = k \cdot \Phi \cdot I_я$ . При цьому швидкість зменшуватиметься до тих пір, поки момент двигуна не порівняється з новим значенням моменту опору (навантаження). Після цього наступить усталений рух. Різниця швидкостей до і після застосування навантаження називається статичним спадом (перпадом) швидкості  $\Delta\omega_c$ .

Таким чином, двигун автоматично без будь-яких зовнішніх дій переходить з одного усталеного стану в інший, визначуваний його механічною характеристикою. При цьому роль автоматичного регулятора виконує ЕРС двигуна.

Для визначення коефіцієнта жорсткості механічної характеристики  $\beta = dM/d\omega$  потрібно рівняння механічної характеристики (2.16) розв'язати відносно моменту

$$M = \frac{(\omega_0 - \omega)(k\Phi)^2}{R_{\text{я}} + R_{\text{д}}}$$

та взяти похідну. Звідки коефіцієнт жорсткості механічної характеристики буде

$$\beta = \frac{dM}{d\omega} = \frac{(k\Phi)^2}{R_{\text{я}} + R_{\text{д}}}. \quad (2.22)$$

Із наведеного виразу виходить, що зі зростанням додаткового опору  $R_{\text{д}}$  зменшується модуль жорсткості механічної характеристики (збільшується їх нахил до осі моментів).

З урахуванням коефіцієнта жорсткості механічної характеристики рівняння моменту і швидкості двигуна можуть бути записані у такому вигляді

$$M = \beta(\omega_0 - \omega) \text{ або } \omega = \omega_0 - M/\beta. \quad (2.23)$$

В усталеному режимі момент двигуна рівний моменту статичного опору (навантаження)

$$M = M_{\text{с}} = k \cdot \Phi \cdot I_{\text{я}}.$$

Для порівняльної оцінки двигунів різної потужності зручно користуватися рівняннями механічної характеристики у відносних одиницях, оскільки безпосереднє порівняння, наприклад, пускового струму в абсолютних одиницях не дозволяє оцінити, для якого двигуна умови пуску будуть легшими.

Для виразу будь-якої величини у відносних одиницях необхідно її абсолютне значення розділити на базову величину, у ролі якої найчастіше використовують ті ж буквені позначення, але з зірочкою:

$$I_{\text{я}}^* = \frac{I_{\text{я}}}{I_{\text{я.н}}}; U^* = \frac{U_{\text{я}}}{U_{\text{н}}}; \omega^* = \frac{\omega}{\omega_0}; R^* = \frac{R}{R_{\text{н}}}; R_{\text{н}} = \frac{U_{\text{н}}}{I_{\text{я.н}}}. \quad (2.24)$$

Основна особливість відносних величин полягає в тім, що з їх допомогою виходить узагальнена залежність, яка дозволяє краще з'ясувати фізичні процеси. Користування відносними одиницями дозволяє замінити громіздкі обчислення з великими абсолютними значеннями величин невеликими відносними, близькими до одиниці.

Для переходу до рівняння електромеханічної характеристики у відносних одиницях потрібно ліву та праву частини рівняння (2.15) поділити на  $\omega_0$ . Внаслідок цього після перетворення отримаємо рівняння електромеханічної характеристики у відносних одиницях

$$\omega^* = 1 - I_{\text{я}}^* \cdot R^*. \quad (2.25)$$

При номінальному магнітному потоці відносні значення струму якоря та моменту двигуна рівні між собою (це одна з переваг відносних одиниць), оскільки

$$M^* = \frac{M}{M_{\text{НОМ}}} = \frac{k\Phi_{\text{H}} I_{\text{я}}}{k\Phi_{\text{H}} I_{\text{я.НОМ}}} = I^*.$$

Отже, у відносних одиницях рівняння механічної та електромеханічної характеристик ідентичні

$$\omega^* = 1 - M^* R_{\text{я}}^*. \quad (2.26)$$

**Побудова механічних характеристик двигуна постійного струму.** У паспорті двигуна найчастіше вказують такі номінальні (паспортні) дані:  $U_{\text{H}}$ , В;  $I_{\text{H}}$ , А;  $P_{\text{H}}$ , кВт;  $n_{\text{H}}$ , об/хв. Оскільки механічна характеристика є прямою лінією, то для її побудови достатньо знати лише координати двох точок. Як останні зручно використовувати: 1) точку, що відповідає номінальному режиму  $M = M_{\text{H}}$ ,  $\omega = \omega_{\text{H}}$ ; 2) точку ідеального холостого ходу  $M = 0$ ,  $\omega = \omega_0$ .

Номінальна частота двигуна задана у паспорті, а номінальна кутова швидкість знаходиться як

$$\omega_{\text{H}} = \frac{\pi \cdot n_{\text{H}}}{30}.$$

Кутова швидкість ідеального холостого ходу визначається як  $\omega_0 = \frac{U_{\text{H}}}{k\Phi}$ .

Номінальне значення електромагнітного моменту дорівнює

$$M_{\text{H}} = k\Phi \cdot I_{\text{H}}.$$

Для розрахунку коефіцієнту  $k\Phi$  потрібно у рівняння електромеханічної характеристики (2.15) підставити номінальні величини і розв'язати відносно  $k\Phi$

$$k\Phi = \frac{U_{\text{H}} - I_{\text{H}} R_{\text{я}}}{\omega_{\text{H}}}. \quad (2.27)$$

Для побудови штучних механічних характеристик при заданому  $R_{\text{д}}$  достатньо знайти швидкість двигуна при номінальному моменті

$$\omega_{\text{H.шт}} = \frac{U_{\text{H}}}{k\Phi} - \frac{I_{\text{H}}(R_{\text{я}} + R_{\text{д}})}{k\Phi} = \omega_0 [1 - (R_{\text{я}} + R_{\text{д}})^*]. \quad (2.28)$$

Механічні характеристики двигуна можуть бути побудовані так само по точці з координатами  $M = 0$ ,  $\omega = \omega_0$  і точці, відповідній режиму короткого замикання (КЗ)  $\omega = 0$ ;  $M = M_{\text{КЗ}}$ ; ( $I_{\text{я}} = I_{\text{КЗ}}$ ), де  $I_{\text{КЗ}} = \frac{U_{\text{H}}}{R_{\text{я}} + R_{\text{д}}}$ ;  $M_{\text{КЗ}} = k\Phi \cdot I_{\text{КЗ}}$ .

Внутрішній опір кола якоря ДПС визначається за формулою

$$r_{\text{я}} = \frac{0,5 U_{\text{H}}}{I_{\text{H}}(1 - \eta_{\text{H}})}, \quad (2.29)$$

де  $\eta_{\text{H}} = P_{\text{H}} / U_{\text{H}} I_{\text{H}}$  - номінальний ККД двигуна.

**Приклад розрахунку характеристик.** Розрахувати природну та штучні механічні характеристики двигуна незалежного збудження, що відповідають: а) вмиканню додаткового опору  $R_{\text{д}} = 0,5 R_{\text{H}}$ ; б) зниженню напруги  $U_{\text{я}} = 0,7 U_{\text{H}}$ .



Дані для розрахунку:  $P_H = 4,5$  кВт,  $U_H = 220$  В,  $\omega_H = 105 \frac{\text{рад}}{\text{с}}$ ,  $I_H = 27$  А,  
 $R_{\text{я}} = r_{\text{оя}} + r_{\text{дп}} = 0,275$  Ом у нагрітому стані.

Коефіцієнт ЕРС двигуна

$$k\Phi = C_e = \frac{U_H - I_H R_{\text{я}}}{\omega_H} = \frac{220 - 27 \cdot 0,275}{105} = 2,025 \frac{\text{Вс}}{\text{рад}}$$

Швидкість ідеального холостого ходу

$$\omega_0 = \frac{U_H}{k\Phi} = \frac{220}{2,025} = 108,7 \frac{\text{рад}}{\text{с}}$$

Номінальний момент двигуна

$$M_H = k \cdot \Phi \cdot I_H = 2,025 \cdot 27 = 54,7 \text{ Н} \cdot \text{м}.$$

Згідно з отриманими даними на рис. 2.7 побудована природна характеристика (пряма 1), рівняння якої  $M = \beta(\omega_0 - \omega)$ , дорівнює  $M = 14,9(108,7 - \omega)$ , де  $|\beta| = \frac{(k\Phi)^2}{R_{\text{я}}} = 2,025^2 / 0,275 = 14,9$  – модуль жорсткості природної характеристики.

Для побудови штучної характеристики при  $R_{\text{д}} = 0,5R_H$  знаходимо:

- номінальний опір

$$R_H = \frac{U_H}{I_H} = \frac{220}{27} = 8,16 \text{ Ом},$$

- додатковий опір

$$R_{\text{д}} = 0,5R_H = 0,5 \cdot 8,18 = 4,09 \text{ Ом}$$

- повний опір якірного кола

$$R = R_{\text{я}} + R_{\text{д}} = 0,275 + 4,09 = 4,365 \text{ Ом}.$$

- швидкість двигуна на штучній (реостатній) характеристикі при номінальному струмі якоря

$$\omega_{\text{нш}} = \frac{U_H - I_H R}{k\Phi} = \frac{220 - 27 \cdot 4,365}{2,025} = 50,44 \text{ рад/с};$$

- модуль жорсткості реостатної характеристики

$$|\beta| = \beta_{\text{ш}} = (k\Phi)^2 / R = (2,025)^2 / 4,365 = 0,94 \text{ Н} \cdot \text{м} \cdot \text{с}.$$

За отриманими даними на рис. 2.7 побудована реостатна характеристика (пряма 2), рівняння якої  $M = 0,94(108,7 - \omega)$ .

Швидкість ідеального холостого ходу при зниженій напрузі  $0,7 U_H$

$$\omega_{\text{ош}} = \frac{0,7 U_H}{k\Phi} = \frac{0,7 \cdot 220}{2,025} = 76,1 \text{ рад/с.}$$

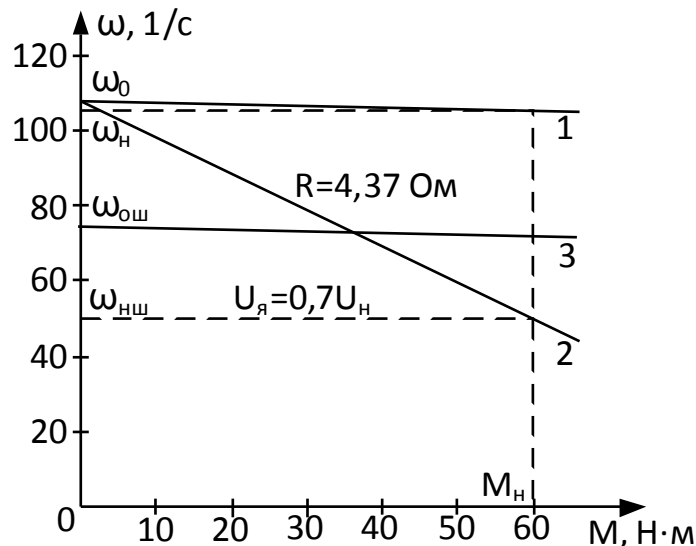


Рис. 2.7. Графіки характеристик ДПС

Ця характеристика паралельна природній і проходить через точку  $\omega_{\text{ош}}$  (пряма 3 рис. 2.7).

**Розрахунок пускового реостата ДПС графічним методом.** Для реалізації плавного пуску, обмеження стрибків струму при пуску, гальмуванні та переході з однієї характеристики на іншу необхідно відповідним чином побудувати пускові (реостатні) характеристики і розрахувати додаткові опори (пусковий реостат). Сукупність реостатних характеристик, за якими протікає процес розгону двигуна при автоматичному керуванні, називається пусковою діаграмою.

Опір ступенів пускового реостата розраховується таким чином, щоб при їх закорочуванні струм якоря (момент) змінювався в наперед вибраних межах: пусковий струм (момент)  $I_1(M_1)$ , струм (момент) перемикання  $I_2(M_2)$ .

Перш за все потрібно вирішити питання про максимальний струм (момент) при пуску двигуна. Якщо не вказано яких-небудь спеціальних обмежень, то звичайно приймається для двигунів загальнопромислового виконання пусковий струм  $I_1 \leq 2,5I_H$  і, отже,  $M_1 \leq 2,5M_H$ . Інколи значення пускового струму (моменту) обмежується не умовами задовільної комутації, а гранично допустимим моментом за умов прискорення приводу (пасажирські ліфти), що вимагається необхідністю вибору люфтів або слабкого місця каната в

підйомних механізмах. Для цих механізмів застосовують попередній ступінь пускового реостата, який використовують також для гальмування противмиканням.

Для нормального пуску струм (момент) перемикавання  $I_2(M_2)$ , при якому двигун повинен перейти на іншу характеристику (шунтується частина опору), вибирається з умови  $I_2 > I_c(M_2 > M_c)$ .

За відсутності додаткових умов найчастіше попередньо вибирають:  $I_2 \geq (1,1 \dots 1,3)I_c$ ;  $M_2 \geq (1,1 \dots 1,3)M_c$ . Це забезпечує мінімальну кількість ступенів пускового реостата.

Нехай вимагається побудувати пускові характеристики при пуску двигуна в три ступені ( $m = 3$ ) і розрахувати графічним способом додаткові опори. Порядок побудови пускових характеристик:

- будується природна характеристика;
- задаються пусковим струмом  $I_1 = (2,0 \dots 2,5)I_n$  або пусковим моментом  $M_1 = (2,0 \dots 2,5)M_n$ ;
- задаються струмом перемикавання або моментом перемикавання;
- після вибору  $I_1(M_1)$  будується перша пускова характеристика (рис. 2.8), яка повинна пройти через точки  $\omega = \omega_0$  і  $I = I_1$  (або  $M = M_1$ );
- у міру розгону зростає ЕРС двигуна, внаслідок чого зменшується струм якоря. Як тільки  $I_{я} = I_2$ , необхідно зашунтувати за допомогою ключа К1 частину пускового реостата (додатковий опір  $R_{д1}$ , рис. 2.9).

При цьому струм повинен збільшитися до значення  $I_1$ . Отже, друга пускова характеристика повинна пройти через точку 3 і  $\omega = \omega_0$  (рис. 2.8). Аналогічним чином будуються наступні пускові характеристики.

При правильно побудованих пускових характеристиках перехід зі штучної характеристики на природну збільшує струм до значення  $I_1$ . Якщо цього не відбулося, то потрібно змінити величину струму  $I_2$  і повторити побудови. Причому зі збільшенням  $I_2$  кількість ступенів пускового реостата збільшується і навпаки. Для графічного розрахунку додаткових опорів використовують пускові характеристики та метод відрізків. Згідно з рис. 2.8  $\Delta\omega_2 = I_1 R_{я2} / k\Phi$ ,  $\Delta\omega_3 = I_1 R_{я3} / k\Phi$ .

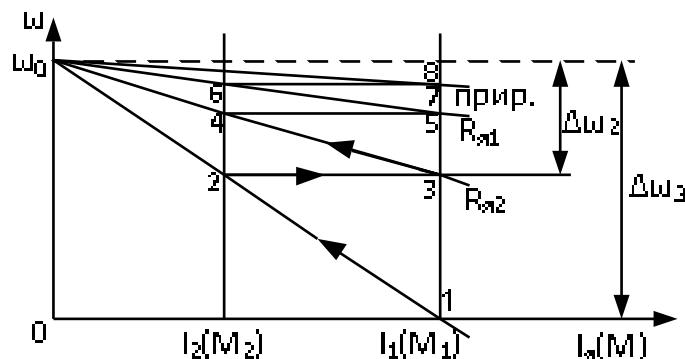


Рис. 2.8. До розрахунку пускових характеристик ДПС незалежного збудження

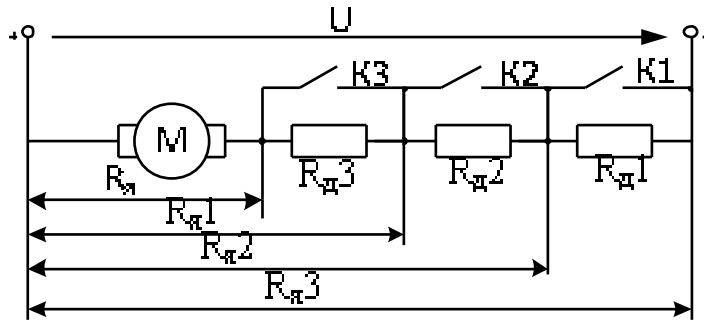


Рис. 2.9. Схема вмикання ДПС при пуску в три ступені

Узявши відношення, отримаємо

$$\Delta\omega_3/\Delta\omega_2 = R_{я3}/R_{я2},$$

звідки

$$R_{я2} = R_{я3} \Delta\omega_2/\Delta\omega_3.$$

З урахуванням того, що  $\Delta\omega_3 \sim l_{8-1}$ , а  $\Delta\omega_2 \sim l_{8-3}$ , маємо

$$R_{я2} = \frac{R_{я3}}{l_{8-1}} \cdot l_{8-3} = m_R l_{8-5}, \quad (2.30)$$

де  $m_R = \frac{R_{я3}}{l_{8-1}}$  – масштаб опорів;  $R_{я3} = U_M/l_1$  – опір для першої пускової характеристики;  $l_1$  – довжина відповідного відрізка.

Аналогічно визначається величина  $R_{я1} = m_R l_{8-5}$ . Знаючи  $R_{я1}, R_{я2}, R_{я3}$ , знаходять згідно з позначеннями, прийнятими на рис. 2.9, опори  $R_{я1}, R_{я2}, R_{я3}$ .

**Розрахунок пускового реостата ДПС аналітичним методом.** Залежність, що дозволяє аналітично розраховувати додаткові опори, визначається за допомогою рівняння струму якоря для точок 2 і 3 (рис. 2.8). Оскільки для цих точок ЕРС двигуна залишається незмінною, то

$$I_2 = \frac{U_M - E}{R_{я3}}; \quad I_1 = \frac{U - E}{R_{я2}}.$$

Узявши відношення, отримаємо

$$\frac{I_1}{I_2} = \frac{R_{я3}}{R_{я2}}. \quad (2.31)$$

Аналогічно з (2.31) маємо

$$\frac{I_1}{I_2} = \frac{R_{я3}}{R_{я2}} = \frac{R_{я2}}{R_{я1}} = \frac{R_{я1}}{R_{я}} = \lambda. \quad (2.32)$$

Звідки

$$R_{я1} = R_{я} \lambda; \quad R_{я2} = R_{я1} \lambda = R_{я} \lambda^2; \quad R_{я3} = R_{я} \lambda^3.$$

У загальному випадку

$$R_{ям} = R_я \lambda^m, \quad (2.33)$$

звідки

$$\lambda = \sqrt[m]{R_{ям}/R_я} = \sqrt[m]{U_M/R_я I_1}, \quad (2.34)$$

де  $m$  - кількість ступенів пускового реостата.

При пуску в три ступені додаткові опори визначаються як:

$$R_{д1} = \lambda^{m-1}(\lambda - 1)R_я \text{ або } R_{д1} = R_{я3} - R_{я2};$$

$$R_{д2} = \lambda^{m-2}(\lambda - 1)R_я; \quad R_{д3} = (\lambda - 1)R_я.$$

Порядок побудови пускових характеристик і розрахунку додаткових опорів аналітичним способом:

- будується природна механічна характеристика;
- задаються кількістю ступенів пускового реостата  $m = 3 \dots 5$ , пусковим струмом  $I_1 = (2,0 \dots 2,5)I_H$  або моментом  $M_1 = (2,0 \dots 2,5)M_H$ ;
- знаючи  $I_1$  знаходять  $R_{ям} = U_M/I_1$ ;
- згідно з (2.34) знаходять  $\lambda$ , а потім струм перемикавання  $I_2 = I_1/\lambda$ ;
- за знайденими значеннями  $I_1$  та  $I_2$  будують, як і у попередньому випадку (рис. 2.8), пускові характеристики;
- використовуючи залежність (2.33), знаходять опір  $R_{я1} \dots R_{ям}$ , а потім додаткові опори  $R_{д1} \dots R_{дm}$ .

Для ДПС з незалежним збудженням типу 2ПН160L ( $P_H = 11$  кВт,  $U_H = 220$  В,  $\omega_H = 1500 \frac{\text{об}}{\text{хв}}$ ,  $I_H = 58,4$  А,  $R_я = r_{оя} + r_{дп} = 0,234$  Ом) потрібно розрахувати аналітичним і графічним методами опори ступенів пускового реостата (додаткові опори) при пуску в три ступені. Розраховувати також ступінь противмикання. Прийняти максимальний пусковий струм  $I_1 = 125$  А,  $I_{г.поч} = -125$  А при  $\omega = \omega_H$ . Схема вмикання двигуна без ступеня противмикання наведена на рис. 2.9. Прийняти момент  $M_c = 0,8M_H$ .

**Аналітичний метод розрахунку.** Відношення пускового струму до струму перемикавання

$$\lambda = \frac{I_1}{I_2} = \sqrt[3]{\frac{U_H}{I_1 R_я}} = \sqrt[3]{\frac{220}{125 \cdot 0,234}} = 1,96. \quad (2.35)$$

Опори для пускових характеристик:

$$R_{я3} = R_я \lambda^3 = 0,234 \cdot 1,96^3 = 1,75 \text{ Ом};$$

$$R_{я2} = R_я \lambda^2 = 0,234 \cdot 1,96^2 = 0,9 \text{ Ом};$$

$$R_{я1} = R_я \lambda = 0,234 \cdot 1,96 = 0,46 \text{ Ом}.$$

Додаткові опори для кожного ступеня пускового реостата:

$$R_{д1} = R_{я3} - R_{я2} = 1,76 - 0,9 = 0,86 \text{ Ом};$$

$$R_{д2} = R_{я2} - R_{я1} = 0,9 - 0,46 = 0,44 \text{ Ом};$$

$$R_{д3} = R_{я1} - R_{я} = 0,46 - 0,234 = 0,226 \text{ Ом}.$$

Повний опір пускового реостата

$$R_{\Sigma} = R_{я3} - R_{я} = 1,75 - 0,234 = 1,516 \text{ Ом}.$$

**Графічний метод розрахунку.** Номінальна кутова швидкість

$$\omega_n = \frac{\pi n_n}{30} = 3,14 \cdot 1500 = 157 \text{ Ом}.$$

Коефіцієнти ЕРС двигуна (конструктивний коефіцієнт)

$$C_e = k\Phi = \frac{U_n - I_n R_{я}}{\omega_n} = \frac{220 - 58,4 \cdot 0,234}{157} = 1,31 \frac{\text{Вс}}{\text{рад}}.$$

Швидкість ідеального холостого ходу

$$\omega_0 = \frac{U_n}{k\Phi} = \frac{220}{1,31} = 168 \frac{\text{рад}}{\text{с}}.$$

За отриманими даними будується природна характеристика (рис. 2.10)  $\omega = f(I_{я})$ , яка проходить через точки з координатами  $I_{я} = 0, \omega = \omega_0, I_{я} = I_n, \omega = \omega_n$ .

Струм перемикання

$$I_2 = \frac{I_1}{\lambda} = \frac{125}{1,96} = 64 \text{ А}.$$

Знаючи  $I_1$  та  $I_2$ , будують пускові характеристики, починаючи з характеристики, що відповідає  $R_{я3}$ , яка проходить через координати:  $\omega = \omega_0, I_{я} = 0, I_{я} = I_1, \omega = 0$  (див. рис. 2.10).

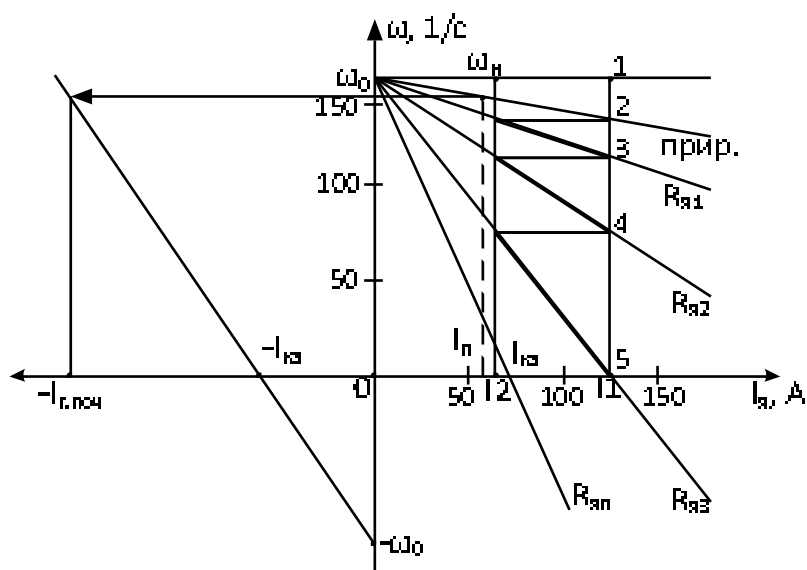


Рис. 2.10. Графіки пускових механічних характеристик ДПС

Згідно з позначеннями рис. 2.10 маємо:

$$R_{я3} = \frac{U_H}{I_1} = \frac{220}{125} = 1,76 \text{ Ом};$$

$$R_{я2} = \frac{R_{я3}}{l_{1-5}} \cdot l_{1-4} = 1,76 \cdot 0,50 = 0,89 \text{ Ом};$$

$$R_{я1} = \frac{R_{я3}}{l_{1-5}} \cdot l_{1-3} = 1,76 \cdot 0,25 = 0,45 \text{ Ом}.$$

Опір ступеня противмикання

$$R_{яп} = \frac{U_H}{I_{кз}} = \frac{220}{66} = 3,94 \text{ Ом}.$$

Результати розрахунків аналітичним та графічним методами достатньо близькі.

## 2.2.2 Розрахунок характеристик та пускового реостата ДПС

Мета індивідуального завдання: поглибити теоретичні знання студентів з електромеханічних властивостей двигунів постійного струму; отримати практичні навички та уміння з методики побудови графіків розрахунку багатоступінчастих пускових реостатів та аналізу механічних характеристик ДПС.

**Постановка задачі.** Згідно з вихідними даними обраного варіанта завдання, пов'язаного з реостатним пуском та динамічним гальмуванням ДПС, необхідно:

1) надати схему електричну принципову реостатного пуску двигуна постійного струму (ДПС) паралельного збудження;

2) розрахувати та побудувати графіки природних електромеханічної та механічної характеристик ДПС;

3) побудувати графіки механічних характеристик двигуна при реостатному пуску, визначити графоаналітичним способом опори секцій та повний опір пускового реостата, якщо величини максимального та мінімального перемикаючих моментів знаходяться відповідно у межах  $M_1 = (1,5 \dots 2,6)M_{ном}$  і  $M_2 = (1,15 \dots 1,25)M_{ном}$ ;

4) визначити коефіцієнт жорсткості природної механічної характеристики при зміні моменту ДПС від нуля до номінального;

5) розрахувати та побудувати механічну характеристику двигуна у режимі динамічного гальмування.

Вихідні дані варіантів завдання наведено у таблиці 2.2, де  $U_{\text{ном}} = U_{\text{н}}$  та  $I_{\text{н}}$  - номінальні напруга та струм ДПС відповідно;  $P_{\text{н}}$  - номінальна потужність двигуна;  $R_{\text{з}}$  - опір кола обмотки збудження машини (ОЗМ);  $n_{\text{н}}$  - номінальна частота обертання якоря ДПС;  $m$  - кількість секцій (ступенів) пускового реостата;  $R_{\text{дин}}$  - опір резистора динамічного гальмування, в якості якого використовуються вказана секція пускового реостата.

Таблиця 2.2

Вихідні дані варіантів завдання 1

№ варіанта	$U_{\text{н}}$ , В	$I_{\text{н}}$ , А	$P_{\text{н}}$ , кВт	$R_{\text{з}}$ , Ом	$n_{\text{н}}$ , об/хв	$m$	$R_{\text{дин}}$ , Ом	Примітка
0	220	59	11,0	55,0	1500	3	$R_{\text{п3}}$	
1	220	94	20,0	22,0	200	3	$R_{\text{п3}}$	
2	440	67	25,0	37,0	1500	4	$R_{\text{п1}}$	
3	220	78	15,0	27,5	1000	3	$R_{\text{п3}}$	
4	440	75	30,0	30,0	750	4	$R_{\text{п4}}$	
5	220	116	22,0	22,0	960	4	$R_{\text{п3}}$	
6	440	100	37,0	100,0	525	4	$R_{\text{п1}}$	
7	440	46	17,5	46,2	560	3	$R_{\text{п2}}$	
8	110	130	12,4	5,5	750	3	$R_{\text{п2}}$	
9	110	100	9,6	10,0	960	3	$R_{\text{п3}}$	

**Приклад задачі.** Відомі наступні вихідні дані:  $U_{\text{н}} = 220$  В;  $I_{\text{н}} = 50$  А;  $P_{\text{н}} = 10$  кВт;  $n_{\text{н}} = 2500$  об/хв;  $R_{\text{оз}} = 22$  Ом;  $m = 3$ ;  $R_{\text{дин}} = R_{\text{п3}}$ .

### Розв'язання задачі.

1. Навести схему електричну принципову реостатного пуску ДПС з паралельним збудженням.

2. Знайти номінальний опір ДПС за формулою

$$R_{\text{н}} = \frac{U_{\text{н}}}{I_{\text{н}}} = \frac{220}{50} = 4,4 \text{ Ом.}$$

3. Розрахувати активний опір кола обмотки якоря двигуна

$$R_{\text{я}} = 0,5(1 - \eta_{\text{н}}) \cdot R_{\text{н}} = 0,5(1 - 0,909) \cdot 4,4 = 0,2002 \text{ Ом,}$$

де  $\eta_{\text{н}}$  - величина номінального ККД - визначається як

$$\eta_{\text{н}} = \frac{P_{\text{н}}}{U_{\text{н}} \cdot I_{\text{н}}} = \frac{10000}{220 \cdot 50} = 0,909.$$



4. Розрахувати величину номінального моменту на валу двигуна, необхідного для побудови графіків природних електромеханічної та механічної характеристик

$$M_H = 9550 P_H / n_H = 9550 \frac{10}{2500} = 38,2 \text{ Н} \cdot \text{м}.$$

5. Розрахувати номінальну кутову швидкість ДПС

$$\omega_H = 2\pi n_H / 60 = 6,28 \cdot 2500 / 60 = 261,66 \text{ рад/с}.$$

6. Визначити кутову швидкість ідеального холостого ходу

$$\omega_0 = U_H / (k\Phi) = 220 / 0,81 = 274 \text{ рад/с},$$

де величина коефіцієнта ЕРС двигуна

$$k\Phi = \frac{U_H - I_H \cdot R_{\text{я}}}{\omega_H} = \frac{220 - 40 \cdot 0,2002}{261,66} = 0,81 \text{ В} \cdot \text{с}.$$

7. Розрахувати номінальний струм кола якоря

$$I_{\text{ян}} = I_H - I_B = I_H - U_H / R_{\text{оз}} = 50 - \frac{220}{22} = 40 \text{ А}.$$

8. Побудувати графіки природних електромеханічної та механічної характеристик, які є лінійними і будуються за координатами двох точок:

а) електромеханічна – перша точка, яка відповідає номінальному режиму  $I_{\text{я}} = I_{\text{ян}} = 40 \text{ А}$ ,  $\omega = \omega_H = 261,66 \text{ рад/с}$ , та друга точка, що відповідає режиму холостого ходу  $I_{\text{я}} = I_{\text{я0}} = 0$ ,  $\omega = \omega_0 = 274 \text{ рад/с}$ ;

б) механічна – відповідно пройде через точки  $M = M_H = 38,2 \text{ Н} \cdot \text{м}$ ,  $\omega = \omega_H = 261,66 \text{ рад/с}$  та  $M = 0$ ,  $\omega = \omega_0 = 274 \text{ рад/с}$ .

За отриманими даними будуються графіки характеристик, які надаються на рис. 2.11, а та б.

9. Побудувати графіки реостатних пускових механічних характеристик ДПС, для чого:

а) будується природна механічна характеристика;

б) задаються максимальним пусковим (перемикаючим) моментом  $M_1 = 1,99 \cdot M_H = 1,99 \cdot 38,2 = 76 \text{ Н} \cdot \text{м}$ , та будується перша реостатна механічна характеристика, яка повинна пройти через точки  $\omega = \omega_0$  та  $M = M_1$ , що розташовані на відповідних осях, та якій відповідає перший ступінь пускового реостата, тобто усі секції його введені у коло якоря;

в) обирається величина мінімального моменту перемикання  $M_2 = 1,23 \cdot M_H = 1,23 \cdot 38,2 = 43,02 \text{ Н} \cdot \text{м}$ ;

г) через точки  $M_1$  та  $M_2$  на осі моментів проводять вертикальні прямі;

д) через точку перетинання вертикальної прямої з вертикальною із точки  $M_2$  з першою реостатною характеристикою проводять горизонтальну пряму;

е) точка перетинання цієї прямої з вертикальною, яка виходить із точки  $M_1$  на осі моментів, з'єднуються з точкою  $\omega_0$  на осі швидкості і таким чином отримується друга реостатна механічна характеристика;

ж) виконуючи аналогічні дії, як у пунктах д та е, за допомогою другої характеристики отримують наступну реостатну характеристику та ін.;

з) кількість побудованих характеристик повинна відповідати числу  $m = 3$ , інакше необхідно змінювати величину моменту  $M_2$  (графіки надаються на рис. 2.12, прямі 1 - 4).

10. За отриманими графіками характеристики графічним способом визначаються опори кожного ступеня та пускового реостата у цілому за розглянутою вище методикою.

Опори окремих секцій пускового реостата визначаються наступним чином:

$$R_{пз} = \frac{\Gamma - Д}{а - е} \cdot R_{н} = \frac{217 - 156}{274} \cdot 4,4 = 0,97 \text{ Ом};$$

$$R_{п2} = \frac{в - \Gamma}{а - е} \cdot R_{н} = \frac{246 - 217}{274} \cdot 4,4 = 0,46 \text{ Ом};$$

$$R_{п1} = \frac{б - в}{а - е} \cdot R_{н} = \frac{262 - 246}{274} \cdot 4,4 = 0,25 \text{ Ом}.$$

Величина повного опору пускового реостата:

$$R_{п} = \frac{б - Д}{а - е} \cdot R_{н} = \frac{262 - 156}{274} \cdot 4,4 = 1,702 \text{ Ом}.$$

$$R_{п} = R_{п1} + R_{п2} + R_{п3} = 0,25 + 0,46 + 0,97 = 1,68 \text{ Ом}.$$

Механічні характеристики двигуна постійного струму з паралельним збудженням при пуску (розгоні) за допомогою пускового реостата наведено на рис. 2.12. Відрізок «а-е» відповідає опору двигуна  $R_{н}$ .

11. Визначити коефіцієнт жорсткості природної механічної характеристики

$$\beta = \frac{\Delta M}{\Delta \omega} = \frac{0 - M_{н}}{\omega_0 - \omega_{н}} = \frac{0 - 38,2}{274 - 261,6} = -3,08 \text{ Н} \cdot \text{м} \cdot \text{с}.$$

12. Побудова механічної характеристики ДПС у режимі динамічного гальмування, для чого необхідно:

а) визначити величину номінальної ЕРС двигуна

$$E_{н} = k\Phi \cdot \omega_{н} = 0,81 \cdot 261,66 = 211,89 \text{ В};$$



$$M_{\text{дин}} = k\Phi \cdot I_{\text{я дин}} = -0,81 \cdot 81,07 = -146,66 \text{ Н} \cdot \text{м};$$

г) побудувати графік механічної характеристики ДПС у режимі динамічного гальмування за точками з координатами: точка А ( $-M = 0, \omega = 0$ ) та точка В ( $M = -146,66 \text{ Н} \cdot \text{м}, \omega = 261,66 \text{ рад/с}$ ), який надається на рис. 2.12.

13. Надати короткі висновки за отриманими розрахунком та графікам характеристик.

### 2.2.3. Контрольні запитання до теми 2

1. Вирази для механічної та електромеханічної характеристик ДПС з різними способами збудження.
2. Рівняння балансу ДПС незалежного збудження для кола якоря.
3. Рівняння моментів електропривода у перехідному та усталеному режимах.
4. Методика розрахунку та побудови графіків електромеханічних та механічних характеристик ДПС у двигунному режимі.
5. Як визначається струм обмотки якоря ДПС незалежного збудження у різних режимах роботи двигуна?
6. Жорсткість механічної характеристики, як вона визначається та як впливає на діапазон регулювання швидкості.
7. Особливості реостатного пуску ДПС, методика розрахунку ступенів реостату та побудови штучних пускових механічних характеристик.
8. Як змінюється швидкість ДПС при зменшенні (збільшенні) навантаження на валу?
9. При зміні опору та напруги кола якоря, магнітного потоку обмотки збудження ДПС жорсткість та швидкість механічних характеристик змінять або не змінять свої значення?
10. Способи пуску та гальмування ДПС, їх сутність та схеми, механічні характеристики двигуна у цих режимах.

## 2.3. Тема 3. Електромеханічні властивості асинхронних двигунів

### 2.3.1. Зміст та методичні вказівки до теми 3

Асинхронні двигуни (АД) отримали в промисловості вельми широке застосування завдяки ряду переваг у порівнянні з іншими типами двигунів. АД простий і надійний в експлуатації, оскільки не має колектора, дешевше і значно легше за двигун постійного струму, володіє гарною керованістю, має широкий діапазон та високу плавність регулювання швидкості.

При виведенні рівняння механічної характеристики асинхронного двигуна користуються спрощеною схемою заміщення з наступними позначеннями:  $U_{\phi}$  - первинна фазна напруга статора;  $I_1$  - фазний струм статора;  $I'_2$  - приведений струм ротора;  $X_1$  і  $X'_2$  - первинний і приведений вторинний реактивні

(індуктивні) опори розсіювання;  $R_0$  і  $X_0$  - активний і реактивний опори контура намагнічування;  $S = (\omega_0 - \omega) / \omega_0$  - ковзання двигуна;  $\omega_0 = 2\pi \cdot n_0 / 60 = 2\pi \cdot f_1 / p$  - синхронна кутова швидкість двигуна;  $R_1$  і  $R'_2$  - первинний і приведений вторинний активні опори;  $f_1$  - частота напруги мережі;  $p$  - число пар полюсів;  $n_0 = 60f_1/p$  - синхронна частота.

Механічна характеристика АД, що є залежністю обертового моменту двигуна від ковзання, тобто  $M = f(s)$  при  $U_2, f_1 = const$ , визначається виразом

$$M = \frac{3 \cdot U_{\phi}^2 \cdot R'_2}{\omega_0 [(R_1 + R'_2/s)^2 + (X_1 + X'_2)^2] \cdot s}, \quad (2.36)$$

згідно якому будується її графік (рис. 13,а).

Крива моменту  $M = f(S)$  має два максимуми: один – у генераторному режимі, інший – у двигунному.

Прирівнюючи похідну  $dM/ds = 0$ , визначаємо значення критичного ковзання, при якому двигун розвиває максимальний критичний момент

$$s_k = \pm \frac{R'_2}{\sqrt{R_1^2 + (X_1 + X'_2)^2}}. \quad (2.37)$$

Знак «+» у виразах відноситься до двигунного режиму (або гальмуванню противмиканням), а знак «-» - до генераторного режиму роботи паралельно з мережею (при  $\omega > \omega_0$ ).

На підставі цих співвідношень розраховується електромагнітний обертовий момент АД за формулою

$$M = \frac{2M_k(1+a \cdot s_k)}{s/s_k + s_k/s + 2a \cdot s_k^2}, \quad (2.38)$$

де  $M_k$  – максимальний момент двигуна;  $s_k$  - критичне ковзання, відповідне максимальному моменту;  $a = R_1/R'_2$ .

Як видно з формули, момент двигуна залежить від ковзання і пропорційний квадрату напруги, тому двигун чутливий до коливань напруги мережі. Критичне ковзання і кутова швидкість ідеального холостого ходу не залежать від напруги.

На рис. 2.13, а надається типовий графік механічної характеристики асинхронного двигуна  $\omega = f(M)$ . Її характерні точки:

- 1)  $S = 0, M = 0$ , при цьому швидкість двигуна рівна синхронній;
- 2)  $S = S_{ном}, M = M_{ном}$ , що відповідає номінальній швидкості і номінальному моменту;
- 3)  $S = S_k, M = M_{кд}$  - максимальний момент у двигунному режимі;
- 4)  $S = 1,0, M = M_{п} = \frac{2M_k(1+a \cdot s_k)s_k}{1+s_k^2(1+2a)}$  – початковий пусковий момент;
- 5)  $S = -S_k, M = -M_{кг}$  - максимальний момент у генераторному режимі роботи двигуна паралельно з мережею;

б)  $M = M_c$  - рівняння руху АД в усталеному режимі роботи, тобто момент двигуна дорівнює моменту статичного опору, обумовленому навантаженням.

Якщо у рівнянні (2.38) знехтувати активним опором статора, то вийде зручніша для розрахунків формула (формула Клосса)

$$M \approx \frac{2M_k}{s/s_k + s_k/s} = \frac{2M_k \cdot s_k \cdot s}{s_k^2 + s^2}, \quad (2.39)$$

де  $M_k = 3U_\phi^2 / 2\omega_0 X_k$ .

Підставивши у вираз (2.39) замість поточних значень  $M$  і  $s$  їх номінальні значення і позначивши кратність максимального моменту  $M_k/M_{ном}$  через  $\lambda$ , отримаємо

$$s_k = s_{ном} (\lambda \pm \sqrt{\lambda^2 - 1}), \quad (2.40)$$

де  $\lambda = 1,8 \dots 3,5$  – коефіцієнт, який характеризує перевантажувальну здібність двигуна за моментом.

У останньому виразі перед коренем слід брати знак «+».

Оскільки величини  $s$  і  $\omega$  зв'язані між собою, то на практиці широко використовується другий варіант механічної характеристики у вигляді  $\omega = f(M)$ , графік якої наведено на рис. 2.13, б.

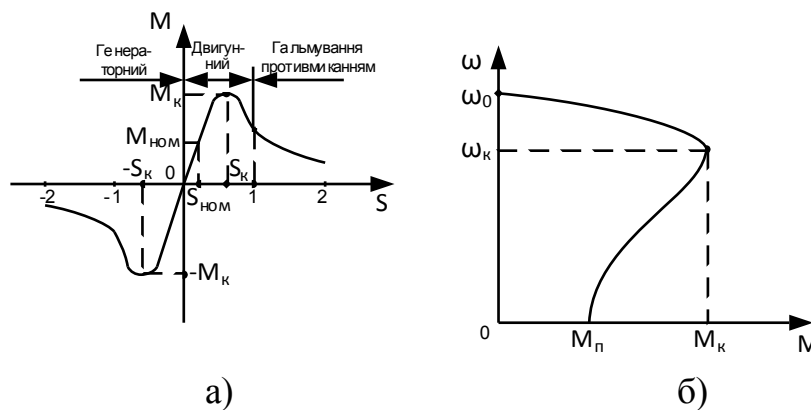


Рис. 2.13. Механічні характеристики асинхронного двигуна

Як видно з графіка, при збільшенні навантаження на валу частота обертання (швидкість) АД падає, а досягнувши критичного моменту  $M = M_{max} = M_k$ , двигун переходить на нестійку ділянку характеристики, де зменшуються і момент, що розвивається двигуном, і швидкість аж до його зупинки. Згідно з приведеними співвідношеннями розраховують і будують графіки механічних характеристик АД.

Момент асинхронного двигуна з КЗР, як будь-якої електричної машини, пропорційний магнітному потоку і активній складовій струму ротора

$$M = k' \Phi I_2' \cos \varphi_2, \quad (2.41)$$

де  $k'$  - конструктивна постійна двигуна;  $\varphi_2$  – кут фазового зсуву між ЕРС і струмом ротора

$$\cos\varphi_2 = \frac{R_2'}{\sqrt{(R_2')^2 + (X_2')^2 \cdot S^2}} \quad (2.42)$$

При збільшенні ковзання росте ЕРС ротора, зростає струм ротора, асимптотично прагнучи до деякого граничного значення, а  $\cos\varphi_2$  із зростанням  $S$  зменшується (на робочій ділянці характеристики дуже мало), асимптотично прагнучи до нуля при  $S \rightarrow \infty$ .

У відносних одиницях вираз (2.39) приймає вигляд:

$$M^* = 2/(S^* + 1/S^*), \quad (2.43)$$

де  $M^* = M/2M_k$ ,  $S^* = S/S_k$  - відносні значення величин.

Таким чином, для побудови механічних характеристик за допомогою (2.38) і (2.40) необхідно знати лише три параметри двигуна: номінальний момент, швидкість і кратність критичного моменту, які надаються у паспорті двигуна. Задаючись рядом значень ковзання, за формулами (2.38) і (2.40) будуються механічні характеристики в рушійному і гальмівних режимах роботи  $\omega = f(M)$ .

У зоні малих ковзань звичайно нехтують складовою  $S/S_k$  у рівнянні (2.40), і тоді механічна характеристика АД у своїй робочій частині описується рівнянням прямої

$$M = 2M_k S/S_k \quad (2.44)$$

Це рівняння дотичної до кривої моменту в точці з координатами  $\omega = \omega_0$ ;  $M = 0$ , з якого видно, що вираз (2.44) призводить до великих погрешностей, оскільки при  $S = S_k$  дає подвоєне значення критичного моменту. Більш точні результати дає лінійна апроксимація механічної характеристики  $M = M_H S/S_H$ , яка дозволяє більш точно визначити координати усталеного руху при коливаннях навантаження від 0 до  $1,5 M_H (S \leq 0,75 S_k)$ .

На ділянці великих ковзань механічна характеристика має гіперболічний характер  $M \approx 2M_k S_k/S$ . Жорсткість механічної характеристики асинхронного двигуна  $\beta = \frac{\partial M}{\partial \omega}$  при  $S > S_k$  - позитивна, при  $S = S_k$  - рівна нулю, а при  $S < S_k$  - негативна.

**Розглянемо приклад** розрахунку та побудови графіків механічних характеристик асинхронного двигуна. Для АД з фазним ротором типу МТ 31-6 ( $P_H = 11$  кВт;  $n_H = 953$  об/хв.;  $U_{1H} = 380$  В;  $I_{1H} = 28,4$  А;  $R_1 = 0,415$  Ом;  $X_1 = 0,465$  Ом;  $R_2 = 0,132$  Ом;  $X_2 = 0,27$  Ом;  $E_{2H} = 200$  В;  $I_{2H} = 35,4$  А;  $\lambda = M_k/M_H = 3,1$ ) необхідно:

- розрахувати і побудувати природну механічну характеристику;
- розрахувати і побудувати штучну (реостатну) характеристику при вмиканні в коло додаткового опору  $R_d = 0,1R_H$ .

**Розв'язання задачі.** Коефіцієнт зведення опорів

$$k = k_e = \frac{E_{1H}}{E_{2H}} \approx \frac{0,95U_{1H}}{E_{2H}} = \frac{0,95 \cdot 380}{200} = 1,81.$$

Зведені опори ротора до обмоток статора

$$R_2' = k^2 \cdot R_2 = 1,81^2 \cdot 0,132 = 0,432 \text{ Ом};$$

$$X_2' = k^2 \cdot X_2 = 1,81^2 \cdot 0,27 = 0,884 \text{ Ом.}$$

Індуктивний опір короткого замикання

$$X_k = X_1 + X_2' = 0,465 + 0,884 = 1,35 \text{ Ом.}$$

Номінальна кутова швидкість

$$\omega_H = \pi n_H / 30 = 3,14 \cdot 0,53 / 30 = 99,8 \text{ 1/с.}$$

Синхронна кутова швидкість (швидкість ідеального холостого ходу)

$$\omega_0 = \pi n_0 / 30 = 3,14 \cdot 1000 / 30 = 104,7 \text{ 1/с.}$$

Номінальне ковзання

$$S_H = (n_0 - n_H) / n_0 = (\omega_0 - \omega_H) / \omega_0 = (1000 - 953) / 1000 = 0,047.$$

Номінальний електромагнітний момент двигуна

$$M_H = 1,05 P_H / \omega_H = 1,05 \cdot 11 \cdot 10^3 / 99,8 = 115,7 \text{ Н} \cdot \text{м.}$$

Критичний момент

$$M_k = \lambda M_H = 3,1 \cdot 115,7 = 358,7 \text{ Н} \cdot \text{м.}$$

Критичне ковзання знаходиться згідно з виразом

$$S_k = \frac{s_H (\lambda + \sqrt{\lambda^2 - 1 + 2S_H a (\lambda - 1)})}{1 - 2S_H a (\lambda - 1)} = \quad (2.45)$$

$$= \frac{0,047 (3,1 + \sqrt{3,1^2 - 1 + 2 \cdot 0,96 \cdot (3,1 - 1)})}{1 - 2 \cdot 0,96 \cdot 0,047 \cdot (3,1 - 1)} = 0,352.$$

де  $a = R_1 / R_2' = 0,415 / 0,432 = 0,96$ .

Рівняння механічної характеристики

$$M = \frac{2M_k (1 + a \cdot s_k)}{s/s_k + s_k/s + 2a \cdot s_k} = \frac{960}{s/0,352 + 0,352/s + 0,676}$$

Для більш точної побудови механічної характеристики необхідно при ковзанні, близьких до критичного, зменшити прирости ковзання при розрахунку поточного значення моменту двигуна. Зразковий діапазон зміни ковзання наведено у табл. 2.3, куди зведені результати розрахунку природної механічної характеристики.

Таблиця 2.3

Розрахункові дані для природної механічної характеристики



S	0	0,047	0,15	0,25	0,3	0,352	0,4	0,5	0,6	0,7	0,9	1,0
$\omega$ , 1/с	104,7	99,8	99	78,5	73,3	67,8	62,8	52,3	41,9	31,4	10,5	0
M, Н·м	0	115,7	278,4	343,6	355,4	358,7	356,6	342,8	323,5	303	264,9	248

Розрахунок штучної характеристики здійснюється наступним чином.  
 Номінальний опір ротора

$$R_{2H} = \frac{E_{2H}}{\sqrt{3}I_{2H}} = \frac{200}{\sqrt{3} \cdot 35,4} = 3,26 \text{ Ом.}$$

Додатковий опір, увімкнений у коло ротора на штучній характеристиці, дорівнює

$$R_d = 0,1R_{2H} = 0,1 \cdot 3,26 = 0,326 \text{ Ом.}$$

Приведений додатковий опір

$$R_d' = k_e^2 R_d = 1,81^2 \cdot 0,326 = 1,068 \text{ Ом.}$$

Критичне ковзання на штучній характеристиці, знаходиться як

$$s_{k.шт} = s_k \frac{R_2 + R_d}{R_2} = 0,352 \cdot \frac{0,132 + 0,326}{0,132} = 1,24. \quad (2.46)$$

Рівняння штучної механічної характеристики

$$M = \frac{2M_k(1 + a \cdot s_{k.шт})}{s/s_{k.шт} + s_{k.шт}/s + 2a \cdot s_{k.шт}} = \frac{1571}{s/1,24 + 1,24/s + 2,38}$$

Розрахунок штучної характеристики за наведеним рівнянням зведено у табл. 2.4.

Таблиця 2.4

Розрахункові дані для штучної механічної характеристики

S	0	0,5	1,0	1,24	1,4	1,8
$\omega$ , 1/с	104,7	52,35	0	-25,2	-41,9	-83,8
M, Н·м	0	312,7	354,9	358,7	357,5	347,5

За даними таблиць 2.3 і 2.4 на рис. 2.14 побудовані природна 1 і штучна 2 характеристики у відносних одиницях.

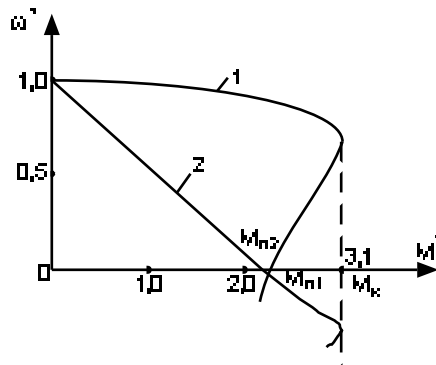


Рис. 2.14. Механічні характеристики АД з фазним ротором

**Побудова пускових характеристик і розрахунок додаткових опорів.**

Методика розрахунку пускових резисторів для ДПС незалежного збудження може бути застосована для АД з фазним ротором. Відмінність полягає лише у виборі максимальних (пускових) моментів, які в АД обмежуються нагрівом від збільшених струмів у порівнянні з моментом при великих ковзаннях. Максимальний пусковий момент  $M_1$  приймається звичайно не більше  $0,85M_k$  з урахуванням можливого зменшення  $M_k$  при зниженні напруги мережі. Розрахунок опорів пускового реостата проводиться графічним або графо-аналітичним способами, як і для ДПС.

**Розглянемо основні етапи аналітичного методу розрахунку пускового реостата.** Відношення пускового моменту  $M_1$  до моменту перемикання  $M_2$  для АД знаходиться за виразом

$$\lambda = \frac{M_1}{M_2} = m \sqrt{\frac{M_H}{M_1 S_H}}, \quad (2.47)$$

де  $m$  – кількість ступенів пускового реостата.

На рис. 12 наведена схема вмикання та пускові характеристики асинхронного двигуна, побудовані наближеним способом. Порядок побудови пускових характеристик і розрахунку додаткових опорів наступний:

- задаються пусковим моментом  $M_1 \leq 0,85M_k$  і кількістю ступенів пускового реостата  $m = 3 \dots 5$ ;
- за допомогою (2.48) знаходять величину  $\lambda$ ;
- визначається момент перемикання  $M_2 = M_1/\lambda$ , значення якого для вмикання застрявання двигуна на проміжній швидкості повинно бути  $M_2 \geq (1,1 \dots 1,3)M_c$ . Якщо ця умова не дотримується, збільшують кількість ступенів  $m$  пускового реостата;
- знаючи  $M_1$  і  $M_2$ , будують пускові характеристики так само, як і для ДПС;
- використовуючи залежність  $R_{pm} = R_2 \lambda^m$ , розраховують опір  $R_{p1} \dots R_{pm}$  реостата для кожної штучної характеристики;

- за знайденими значеннями  $R_{p1} \dots R_{pm}$  визначають опір n-го ступеня пускового реостата, наприклад,  $R_{д1} = R_{p3} - R_{p2}$ . У загальному випадку при  $n \leq m$

$$R_{дn} = R_2(\lambda - 1)\lambda^{m-n}. \quad (2.48)$$

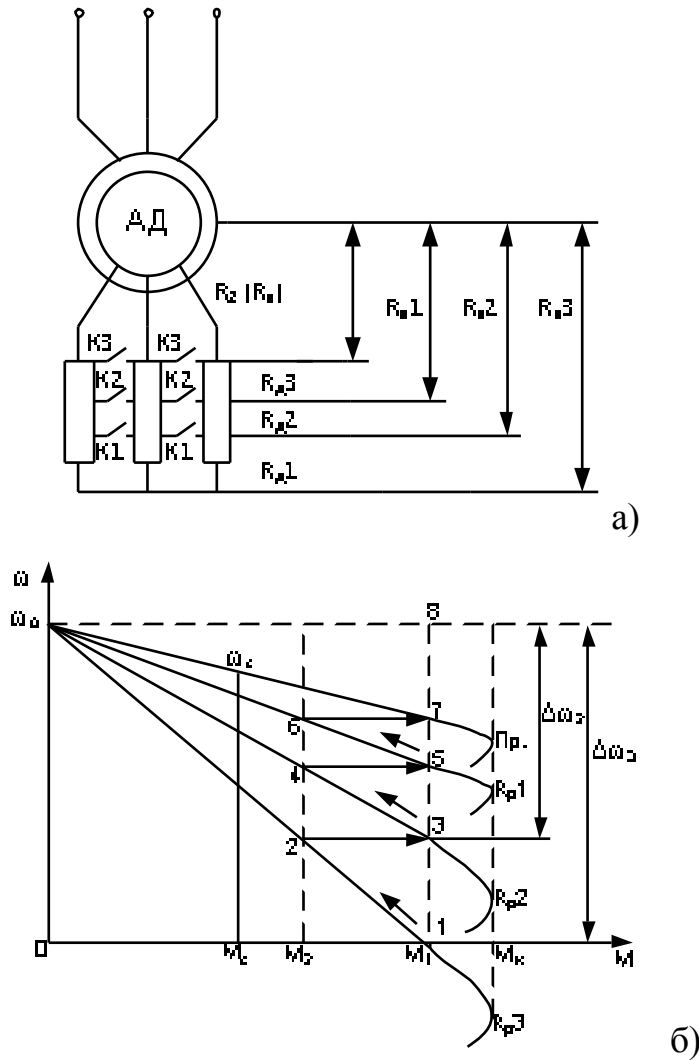


Рис. 2.15. Схема вмикання (а) і механічні характеристики (б) асинхронного двигуна

Опір обмотки ротора визначається приблизно згідно з рівнянням

$$R_2 = R_{pн} S_H = \frac{E_{2н}}{\sqrt{3} I_{2н}} S_H, \quad (2.49)$$

де  $E_{2н}$  - лінійна напруга на клеммах ротора нерухомого двигуна;  $I_{2н}$  - номінальний фазний струм ротора.

**Розглянемо приклад розрахунку пускового реостата АД аналітичним способом.** Для асинхронного двигуна типу МТВ612-10 ( $P_H = 60$  кВт;  $U_H = 380$  В;  $I_{1н} = 145$  А;  $n_H = 578$  об/хв;  $E_{2н} = 245$  В;  $I_{2н} = 153$  А;  $\lambda = M_K/M_H = 3,0$ ) розрахувати аналітичним методом опори пускових резисторів, які необхідно

включити у коло ротора для пуску двигуна в чотири ступеня ( $m = 4$ ). Момент статичного опору  $M_c = 0,8M_H$ .

Механічні характеристики двигуна на робочих ділянках прийняті лінійними.

**Розв'язання задачі.** Номінальна кутова швидкість

$$\omega_H = \pi n_H / 30 = 3,14 \cdot 578 / 30 = 60,5 \text{ 1/с.}$$

Номінальне ковзання

$$S_H = (n_0 - n_H) / n_0 = 600 - 578 / 600 = 0,0367.$$

Номінальний момент двигуна та статичний момент:

$$M_H = P_H / \omega_H = 60 \cdot 10^3 / 60,5 = 991,7 \text{ Н} \cdot \text{м};$$

$$M_c = 0,8M_H = 0,8 \cdot 991,7 = 793,4 \text{ Н} \cdot \text{м.}$$

Максимальний пусковий (перемикаючий) момент

$$M_1 = 2,1M_H = 2,1 \cdot 991,7 = 2082,6 \text{ Н} \cdot \text{м.}$$

Відношення максимального і мінімального моментів перемикання

$$\lambda = \sqrt[m]{\frac{M_H}{M_1 S_H}} = \sqrt[4]{\frac{991,7}{2082,6 \cdot 0,0367}} = 1,9.$$

Момент перемикання

$$M_2 = M_1 / \lambda = \frac{2082,6}{1,9} = 1096,1 \text{ Н} \cdot \text{м,}$$

оскільки  $M_2 > M_c$ , то умова запуску двигуна без застрягання на проміжній швидкості дотримується.

Активний опір обмотки ротора

$$R_2 = \frac{E_{2H}}{\sqrt{3} I_{2H}} S_H = \frac{245}{\sqrt{3} \cdot 153} = 0,034 \text{ Ом.}$$

Повний опір реостатних характеристик

$$R_{pm} = R_2 \lambda^m.$$

Для четвертої пускової характеристики

$$R_{p4} = R_2 \lambda^4 = 0,034 \cdot 1,9^4 = 0,443 \text{ Ом.}$$

Для третьої пускової характеристики

$$R_{p3} = R_2 \lambda^3 = 0,034 \cdot 1,9^3 = 0,233 \text{ Ом.}$$

Для другої пускової характеристики

$$R_{p2} = R_2 \lambda^2 = 0,034 \cdot 1,9^2 = 0,123 \text{ Ом.}$$

Для першої пускової характеристики

$$R_{p1} = R_2 \lambda = 0,034 \cdot 1,9 = 0,065 \text{ Ом.}$$

Додаткові опори для кожного ступеня пускового реостата:

$$R_{д1} = R_{p4} - R_{p3} = 0,443 - 0,233 = 0,211 \text{ Ом;}$$

$$R_{д2} = R_{p3} - R_{p2} = 0,233 - 0,123 = 0,11 \text{ Ом;}$$

$$R_{д3} = R_{p2} - R_{p1} = 0,123 - 0,065 = 0,058 \text{ Ом;}$$

$$R_{д4} = 1 - R_2 = 0,065 - 0,034 = 0,031 \text{ Ом.}$$

### 2.3.2. Розрахунок механічних характеристик та пускового реостата АД

Мета індивідуального завдання: поглибити теоретичні знання студентів з електромеханічних властивостей асинхронних двигунів; отримати практичні навички та уміння з методики розрахунку механічних характеристик та багатоступінчастого пускового реостата АД з фазним ротором.

**Постановка задачі.** Згідно з вихідними даними варіанта завдання необхідно:

- 1) побудувати графіки механічних (природної та штучних) характеристик АД з фазним ротором при реостатному пуску;
- 2) розрахувати опори ступенів пускового реостата, кількість ступенів реостата  $m=2$ ;
- 3) визначити величину додаткового опору кола ротора, при якому у випадку номінального моменту двигун має частоту обертання  $n = 0,8n_n$ .

Вихідні дані варіантів завдання наведено у табл. 2.5, де номінальні напруга  $U_n$  та потужність  $P_n$ , струм ротора  $I_{2n}$  та частота обертання  $n_n$  двигуна;  $\lambda$  – кратність максимального моменту;  $E_{2н}$  - лінійна на клеммах ротора нерухомого двигуна;  $p$  – кількість пар полюсів машини, яка визначається за номінальною частотою.

Таблиця 2.5

Вихідні дані варіантів завдання

№ варіанта	$U_H$ , В	$P_H$ , кВт	$E_{2H}$ , В	$I_{2H}$ , А	$\lambda$	$n_H$ , об/хв	$R_{д1}$ , Ом	$R_{д2}$ , Ом	Примітка
1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
0	380	60	253	160	2,3	577	0,0332	0,0549	
1	380	55	248	147	2,25	710	0,0337	0,055	
2	380	50	262	135	2,2	695	0,036	0,06	
3	380	40	320	110	2,1	1400	0,0426	0,071	
4	380	30	255	80	2,0	930	0,0504	0,09	
5	380	25	283	68	1,95	582	0,0558	0,093	
6	380	20	299	54	1,9	1450	0,0576	0,096	
7	380	10	298	27	1,8	2500	0,127	0,21	
8	380	5	300	14	1,75	2930	0,192	0,32	
9	380	23	287	62	2,0	940	0,06	0,1	

**Приклад задачі за темою.** Відомі наступні дані трифазного АД з фазним ротором та пускового реостата у колі ротора:  $U_H = 380$  В,  $P_H = 35$  кВт,  $E_{2H} = 249$  В,  $I_{2H} = 95$  А,  $\lambda = 2,05$ ,  $n_H = 950$  хв<sup>-1</sup>,  $R_{д1} = 0,0504$  Ом,  $R_{д2} = 0,084$  Ом,  $m = 2$ .

Необхідно побудувати графіки механічних характеристик АД при реостатному пуску, розрахувати опори ступенів пускового реостата та визначити величину додаткового опору у випадку, якщо частота двигуна  $n = 0,8n_H$ .

**Розв'язання задачі.**

1. Надати схему електричну принципову реостатного пуску ( $m = 2$ ) АД з фазним ротором.

2. Знайти кутову швидкість обертання двигуна у номінальному режимі роботи та режимі холостого ходу:

$$\omega_H = 2\pi n_H / 60 = 6,28 \cdot 950 / 60 = 99,43 \text{ с}^{-1};$$

$$\omega_0 = 2\pi f_1 / p = 6,28 \cdot 50 / 3 = 104,72 \text{ с}^{-1}.$$

3. Знайти номінальний момент та номінальне ковзання АД:

$$M_H = \frac{P_H}{\omega_H} = \frac{35000}{99,43} = 352 \text{ Н} \cdot \text{м};$$

$$S_H = \frac{\omega_0 - \omega_H}{\omega_0} = \frac{104,72 - 99,43}{104,72} = 0,05.$$

Робоча ділянка природної механічної характеристики асинхронного двигуна наближена до прямої лінії, тому вона може бути побудованою по двом точкам з координатами:

а) точка холостого ходу  $\omega_0 = 104,72 \text{ с}^{-1}$ ,  $M = 0 \text{ Н} \cdot \text{м}$ ;

б) точка номінального режиму  $\omega_H = 99,43 \text{ с}^{-1}$ ,  $M_H = 352 \text{ Н} \cdot \text{м}$ .

4. Для побудови всього графіка необхідно знайти величину критичного моменту машини та критичного ковзання:

$$M_k = \lambda \cdot M_H = 2,05 \cdot 352 = 721,6 \text{ Н} \cdot \text{м};$$

$$S_k = S_H \left( \lambda + \sqrt{\lambda^2 - 1} \right) = 0,05 \left( 2,05 + \sqrt{2,05^2 - 1} \right) = 0,19.$$

5. Визначити величину активного опору обмотки ротора

$$R_2 = \frac{E_{2H} \cdot S_H}{\sqrt{3} \cdot I_{2H}} = \frac{249 \cdot 0,05}{\sqrt{3} \cdot 95} = 0,076 \text{ Ом}.$$

6. Розрахувати значення критичних ковзань при роботі двигуна з різними величинами додаткових опорів у колі ротора:

$$S_{k2} = S_k \cdot \frac{(R_{д1} + R_{д2}) + R_2}{R_2} = 0,19 \cdot \frac{(0,0504 + 0,084) + 0,076}{0,076} = 0,526;$$

$$S_{k1} = S_k \cdot \frac{R_{д1} + R_2}{R_2} = 0,19 \cdot \frac{0,0504 + 0,076}{0,076} = 0,316.$$

7. Розрахувати ковзання і додатковий опір кола ротора асинхронного двигуна, що забезпечують обертання ротора з частотою  $n = 0,8n_H$ :

$$S_{H1} = \frac{n_0 - 0,8 \cdot n_H}{n_0} = \frac{1000 - 0,8 \cdot 950}{1000} = 0,24;$$

$$R_{доп} = R_2 \cdot \frac{S_{H1} - S_H}{S_H} = \frac{0,24 - 0,05}{0,05} = 0,29 \text{ Ом}.$$

8. Статичний момент дорівнює

$$M_c = M_H = 352 \text{ Н} \cdot \text{м}.$$

9. Максимальний пусковий момент дорівнює

$$M_1 = 0,85 \cdot \lambda \cdot M_H = 0,85 \cdot 2,05 \cdot 352 = 613,36 \text{ Н} \cdot \text{м}.$$

10. Момент перемикавання дорівнює

$$M_2 = 1,2 \cdot M_c = 1,2 \cdot 352 = 422,4 \text{ Н} \cdot \text{м}.$$

11. Для розрахунку природної та штучних механічних характеристик асинхронного двигуна з фазним ротором відповідно з заданими значеннями ковзання використовуються наступні співвідношення:

$$M = \frac{2M_k}{\frac{S_k + S}{S} + \frac{S}{S_k}} \quad \text{та} \quad \omega = \omega_0 (1 - S). \quad (2.50)$$

Результати розрахунків надано у табл. 2.6, згідно з якими будуються графіки механічних характеристик трифазного АД з фазним ротором.

Таблиця 2.6

Дані для побудови механічних характеристик АД

А – опір кола ротора – $R_2$										
$S$	0	0,01	0,015	0,025	$S_H=0,05$	0,1	$S_{кр}=0,19$	0,4	0,8	1
$M, Н\cdot м$	0	76	113,2	186,7	360,8	594	721,6	559,4	324	264
$\omega, с^{-1}$	104,72	103,6	103	102	99,5	94,2	84,8	62,8	20,9	0
В – опір кола ротора – $(R_2 + R_{д1})$										
$S$	0	0,01	0,025	0,05	0,1	0,2	$S_{кр}=0,316$	0,5	0,8	1
$M, Н\cdot м$	0	45,6	113,5	222,7	416	652,4	721,6	653	494	415
$\omega, с^{-1}$	104,72	103,6	102	99,5	94,2	83,7	71,6	52,3	20,9	0
С – опір кола ротора – $(R_2 + R_{д1} + R_{д2})$										
$S$	0	0,01	0,05	0,08	0,1	0,3	$S_{кр}=0,526$	0,6	0,8	1
$M, Н\cdot м$	0	27,4	136	214,4	265	622	721,6	714,5	662	594
$\omega, с^{-1}$	104,72	103,6	99,5	96,3	94,2	73,3	50	41,9	20,9	0

### 2.3.3. Контрольні запитання до теми 3

1. Вирази та графіки механічних характеристик АД.
2. Основні співвідношення для розрахунку механічних характеристик АД.
3. Ковзання АД, фізична сутність та вплив на механічну характеристику асинхронного двигуна.
4. Режими роботи АД та особливості графіків механічних характеристик асинхронного двигуна.
5. Як впливає на вид механічної характеристики зміна опору кола ротора АД фазним ротором?
6. Основні співвідношення та методика розрахунку природних та штучних реостатних механічних характеристик АД.
7. Основні етапи аналітичного методу розрахунку пускового реостата АД.
8. Аналітичний спосіб розрахунку пускового реостата АД.
9. Схема вмикання та розрахунку опору ступенів пускового реостата АД.
10. Процедура реостатного пуску АД з фазним ротором за схемою та розрахованими механічними характеристиками.
11. Як впливає зміна опору ротора на жорсткість механічної характеристики АД?

### 2.4. Тема 4. Способи і системи регулювання координат електроприводів постійного струму



## 2.4.1. Зміст та методичні вказівки до теми 4

**Основні показники регулювання швидкості.** У сучасній промисловості використовується велика кількість виробничих механізмів, що працюють із різною постійною й змінною швидкістю, у тому числі металообробні верстати, прокатні стани, підйомно-транспортні механізми, механізми вугільної, транспортної й інших галузей промисловості. Так, у металорізальних верстатах швидкість електропривода повинна регулюватися залежно від матеріалу, форми й розмірів оброблюваних деталей, типу різця й інших факторів. У прокатних станах для кожного профілю металу, що прокочується, є оптимальні значення швидкості, котрі визначають продуктивність стану і якість продукції. Зниження швидкості щодо оптимальної при прокатці веде до зменшення продуктивності й збільшенню витрат енергії внаслідок охолодження металу; надмірне збільшення швидкості погіршує якість продукції й навіть приводить до появи браку, тому що при надмірних швидкостях метал не встигає заповнити кути калібрів прокатних валків.

Регулюванням швидкості називається цілеспрямована зміна швидкості електропривода залежно від вимог технологічного процесу. Найбільше застосування одержали за видами енергії наступні способи регулювання швидкості ЕП: механічне, електромеханічне, електричне і комбіноване.

**Механічне регулювання** швидкості здійснюється за допомогою коробок швидкостей і подач шляхом перемикання шестірень із різним співвідношенням зубів, що ступінчасто змінюють передаточне відношення. Перемикання виробляється вручну або дистанційно за допомогою фрикційних багатодискових електромагнітних муфт та серводвигунів. Недоліками цього способу є:

- 1) фіксована кількість швидкостей (4-6);
- 2) ступінчастість регулювання, низька плавність;
- 3) неможливість одержання економічно вигідної або оптимальної швидкості.

**Електромеханічне регулювання** швидкості ЕП здійснюється шляхом використання багатошвидкісних двигунів і коробок швидкостей, що істотно збільшує число фіксованих швидкостей. У цьому випадку діапазон регулювання буде

$$D = D_{\text{ел}} \cdot D_{\text{мех}},$$

де  $D_{\text{ел}}$  й  $D_{\text{мех}}$  - діапазони електричного й механічного регулювання швидкості відповідно.

Загальне число фіксованих ступенів швидкості

$$Z = m \cdot y, \quad (2.51)$$

де  $m$  і  $y$  – відповідно число ступенів швидкості двигуна й коробки швидкостей.

Тут діапазон та плавність регулювання швидкості вище, але вона також змінюється ступінчасто й крім того складніть реалізації такого способу.

**Електричне регулювання** швидкості засноване на зміні електричних і магнітних параметрів ПЕД, як правило, опору кола якоря, напруги на якорі й обмотці збудження. Сучасні автоматизовані ЕП мають розвинену систему керування, що будується на принципах двозонного регулювання швидкості. У таких ЕП регулювання швидкості здійснюється у двох зонах загального діапазону регулювання

$$D_{\text{ел}} = D_U \cdot D_{\Phi}, \quad (2.52)$$

де  $D_U$  й  $D_{\Phi}$  - відповідно діапазони регулювання швидкості у першій зоні за рахунок зміни напруги на якорі й у другій зоні за рахунок зміни магнітного потоку обмотки збудження ПЕД.

Таке регулювання забезпечує високу плавність регулювання у широкому діапазоні й дає можливість вибрати оптимальне значення швидкості у цьому діапазоні.

На практиці застосовуються ЕП з комбінованими способами регулювання швидкості, що визначається особливостями технологічного процесу. Для реалізації електричних способів регулювання швидкості використовуються розімкнені й замкнені системи керування. У механізмах металургійного виробництва одержали поширення в основному електричні способи регулювання, які реалізуються шляхом впливу на параметри приводного двигуна або джерел живлення. Найбільш простим є параметричне регулювання швидкості, засноване на зміні електричних параметрів кола двигуна. Сучасні системи регулювання являють собою замкнені системи керування.

**Діапазон регулювання** швидкості обертання, який визначається відношенням максимальної швидкості до мінімальної при заданому статичному моменті опору  $D = \omega_{\text{max}} / \omega_{\text{min}}$  при  $M_c = \text{Const}$ . Діапазон регулювання зазвичай записується у вигляді відносини. Наприклад, діапазон регулювання для станів гарячої прокатки 10:1, металорізальних верстатів 40:1 і 100:1 та ін.

**Плавність регулювання** характеризується коефіцієнтом плавності, що визначається відношенням кутових швидкостей на двох сусідніх штучних механічних характеристиках в умовах статичної стійкості роботи двигуна

$$\Phi_{\text{пл}} = \omega_i / \omega_{i-1}, \quad (2.53)$$

де  $\omega_i$  й  $\omega_{i-1}$  - значення кутових швидкостей на  $i$ -го й  $(i - 1)$ -го ступенях регулювання. Цей коефіцієнт показує, що плавність регулювання тим вище, чим більше ступенів регулювання.

**Точність регулювання** визначається здатністю ЕП підтримувати відповідність швидкості заданому її значенню. Для оцінки точності регулювання користуються величиною відносного відхилення швидкості  $\Delta\omega$  від заданого її значення  $\omega$

$$\delta = \Delta\omega / \omega, \quad (2.54)$$

**Стабільність швидкості** на регульованій характеристиці визначається жорсткістю. При зниженні модуля жорсткості буде зменшуватися й точність регулювання. Для оцінки похибки регулювання використовують поняття статизму механічної характеристики, що являє собою відношення зміни швидкості двигуна, викликаного зміною навантаження від нуля до номінальної, до кутової швидкості холостого ходу на заданій регульовальній характеристиці

$$S = \Delta\omega_{\text{ном}} / \omega_{0\text{пер}}, \quad (2.55)$$

**Напрямок регулювання** швидкості - уверх або вниз від основної на природній механічній характеристиці.

**Економічність регулювання** є одним з найважливіших показників і часто визначає вибір того або іншого способу регулювання. Цей показник характеризується витратами на устаткування прийнятої системи регулювання, втратами енергії при регулюванні й надійністю експлуатації. Головною складовою експлуатаційних витрат є вартість електроенергії, витраченої на регулювання. Найважливішими показниками процесу регулювання швидкості є втрати потужності  $\Delta P$  при регулюванні й ККД  $\eta$  привода.

**Припустиме навантаження** двигуна повинно відповідати такому моменту навантаження, при якому нагрівання двигуна не перевершує припустимого (нормативного). При роботі на природній характеристиці таким навантаженням є номінальний момент, при якому у колах двигуна протікає номінальний струм і його нагрівання дорівнює нормативному. При роботі на штучних характеристиках допустимим буде таке навантаження, при якому струм двигуна дорівнює номінальному, а тим самим і його нагрівання буде нормативним.

Якщо момент на валу двигуна при будь-яких швидкостях залишається постійним, то таке регулювання називається регулюванням з постійним моментом. Потужність двигуна ( $P = M \cdot \omega$ ) при такому способі регулювання визначається максимальною швидкістю  $\omega_{\text{max}}$ . Якщо на валу двигуна при усіх швидкостях потужність незмінна, то регулювання здійснюється при постійній потужності, котра визначається величиною моменту  $M_{\text{max}}$ .

З рівняння балансу напруг кола якоря ДПС

$$\omega = (U - IR) / k \cdot \Phi \quad (2.56)$$

впливає, що можливі три принципово різних способи регулювання кутової швидкості двигуна постійного струму:

- 1) зміною опору кола якоря за допомогою резисторів або реостатне;
- 2) зміною струму збудження (магнітного потоку) двигуна або полюсне;
- 3) зміною підведеної до якоря двигуна напруги або якірне.

**Реостатне регулювання швидкості ДПС.** Воно засновано на введенні у коло якоря додаткових резисторів, є досить простим за реалізацією й тому широко використовується для регулювання швидкості, струму й моменту ДПС. Сімейство штучних електромеханічних та механічних (регулюючих) характеристик ДПС можна одержати при варіюванні опору додаткового резистора  $R_d$ . Як відомо, швидкість холостого ходу  $\omega_0$  не залежить від величини  $R_d$ , тому усі штучні характеристики перетинаються на осі швидкості у точці з координатою  $\omega = \omega_0$ ;  $I = 0$ ;  $M = 0$ . Зі збільшенням опору  $R_d$  нахил характеристик також збільшується, вони стають більш м'якими.

Незважаючи на не дуже високі техніко-економічні показники, реостатне регулювання швидкості через простоту своєї реалізації використовується досить широко тоді, коли потрібен невеликий діапазон регулювання швидкості руху виконавчого органа, або коли робота на знижених швидкостях має короткочасний характер. Зокрема, таке регулювання застосовується в ЕП підйомних кранів, деяких металорізальних верстатів, ліфтів та ін.

Штучні характеристики широко використовуються для регулювання (обмеження) струму й моменту ДПС незалежного збудження у перехідних процесах, у яких струм і момент можуть прийняти неприпустимо великі значення для ДПС. Необхідність обмеження струму (і тим самим моменту) виникає при пуску ДПС, що може бути досягнуто введенням у коло якоря додаткових пускових резисторів. Така ж необхідність виникає при реверсуванні й гальмуванні ДПС незалежного збудження.

**Регулювання швидкості ДПС зміною магнітного потоку.** Такий спосіб регулювання є одним з найбільш простих і економічних способів. Потужність, споживана обмоткою збудження двигуна, становить приблизно (2 – 2,5)% потужності двигуна, тому цей спосіб знаходить широке застосування у сучасній практиці. Зміна магнітного потоку  $\Phi$  здійснюється струмом збудження за рахунок введення у коло збудження додаткового опору. У номінальному режимі магнітне коло ЕД практично насичено, і можливість збільшення потоку незначна. Крім того, збільшення струму збудження викликає додаткове нагрівання ЕД. Тому змінювати потік можна тільки у бік його зменшення, тобто зменшенням струму збудження або ослабленням магнітного потоку.

Такий спосіб називається регулюванням швидкості уверх від основної або номінальної.

Отже при різних струмах збудження і при кутовій швидкості двигуна, рівній нулю, струм якорного кола дорівнює току короткого замикання двигуна. Цим значенням струму й визначається загальна точка перетинання електромеханічних характеристик. Напрямок регулювання швидкості - уверх від природної характеристики.

Механічні характеристики не перетинаються в одній точці на осі абсцис, тому що зі зменшенням потоку зменшується й момент короткого замикання,

який визначається за формулою

$$M_{кз} = k \cdot I_{кз} \Phi.$$

Плавність регулювання швидкості визначається кількістю ступенів регулювального реостата або спеціальних пристроїв, що регулюють напругу, яка підводиться до обмотки збудження. Даний метод широко застосовується в ЕП прокатних станів, металорізальних верстатів, різних пристроїв, що намотують.

**Регулювання швидкості ДПС напругою кола якоря.** Цей спосіб здійснюється за схемою рис. 2.16, а, у якій двигун живиться від джерела постійного струму – регульованого перетворювача (П). Вони утворюють систему перетворювач - двигун (П - Д).

Як перетворювачі використовуються електромашинні й напівпровідникові, як правило, тиристорні перетворювачі (ТП), що перетворюють напругу змінного струму у регульовану напругу постійного струму для живлення обмоток кіл якоря й збудження ДПС.

Перетворювач П характеризується у загальному випадку ЕРС  $E_d$ , напругою  $U_d$ , внутрішнім опором  $R_{п}$ , напругою керування  $U_{к}$  і коефіцієнтом підсилення

$$K_{п} = E_d / U_{к}, \quad (2.57)$$

Тоді напруга на виході П визначається співвідношенням

$$U_d = E_d - I_d \cdot R_{п}, \quad (2.58)$$

якщо опір  $R_{п}$  дуже малий, то  $U_d \approx E_d$ .

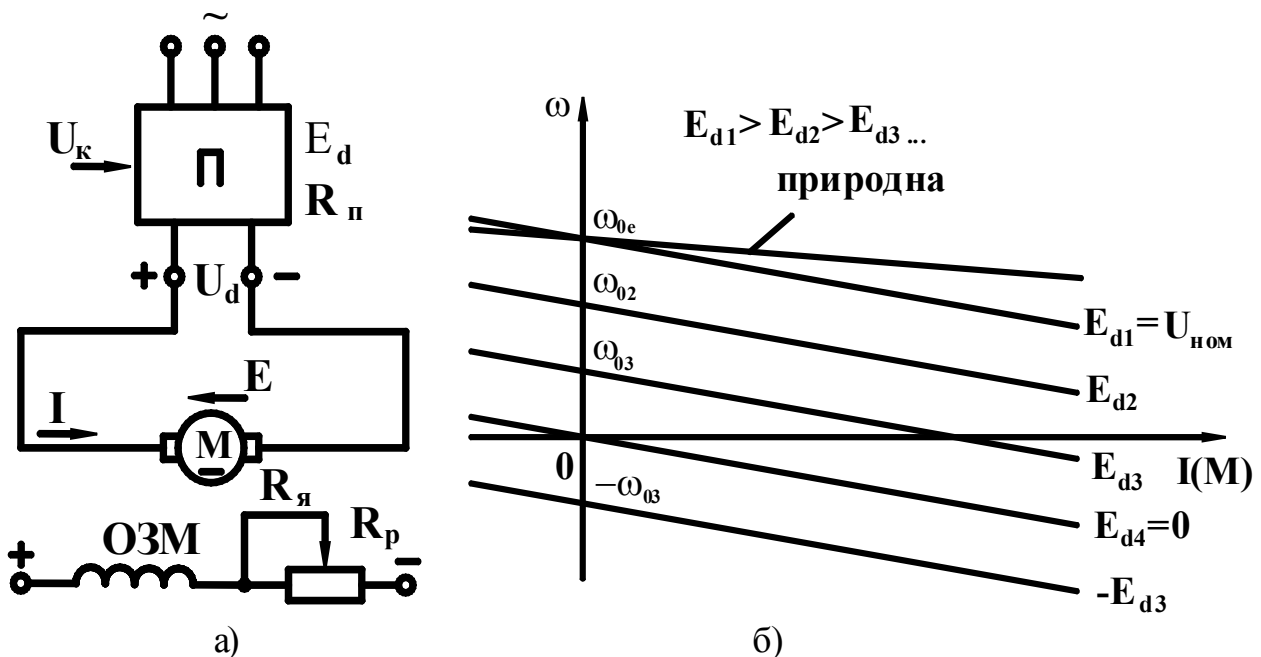


Рис. 2.16. Схема вмикання(а) й характеристики (б) ДПС

З урахуванням цього виразу для електромеханічної й механічної характеристик ДПС у системі П - Д мають вигляд:

$$\omega = \frac{K_{\text{п}} \cdot U_{\text{к}}}{\kappa \cdot \Phi} - I \cdot \frac{R_{\text{я}} + R_{\text{п}}}{\kappa \cdot \Phi} = \omega_0 - \Delta\omega; \quad (2.59)$$

$$\omega = \frac{K_{\text{п}} \cdot U_{\text{к}}}{\kappa \cdot \Phi} - M \cdot \frac{R_{\text{я}} + R_{\text{п}}}{(\kappa \cdot \Phi)^2} = \omega_0 - \Delta\omega; \quad (2.60)$$

Звідки виходить, що при зміні ЕРС  $E_d$  пропорційно змінюється швидкість  $\omega_0$  на штучних характеристиках, а нахил цих характеристик залежить від величини опорів кола якоря й перетворювача, як показано на рис. 13, б. Характеристики розташовуються в усіх чотирьох квадрантах паралельно одна до одної; при  $E_d = 0$  ДПС працює у режимі динамічного гальмування.

Таким чином, характеристики мають різні значення швидкості  $\omega_0$  ідеального холостого ходу, а жорсткість їх визначається величиною опорів кола якоря й перетворювача.

#### 2.4.2. Регулювання швидкості приводного двигуна постійного струму

Мета індивідуального завдання: поглибити теоретичні знання студентів з питань регулювання швидкості приводних ДПС; отримати практичні навички та вміння розрахунку швидкості ДПС при різних способах її регулювання.

**Постановка задачі.** Згідно з вихідними даними визначеного варіанта завдання, пов'язаного з регулюванням швидкості ДПС незалежного збудження, необхідно:

- 1) визначити опір додаткового резистора, який потрібно ввімкнути у коло якоря ДПС, щоб пусковий струм якоря (струм КЗ)  $I_{\text{кз}} = 2I_{\text{н}}$ ;
- 2) визначити опір, який потрібно вивести з кола якоря при досягненні швидкості ДПС  $\omega_1 = 30$  рад/с при струмі якоря  $I_{\text{я}} = 2I_{\text{н}}$ ;
- 3) розрахувати усталену швидкість двигуна при цьому додатковому опорі при  $M_c = 0,8 \cdot M_{\text{н}}$ ;
- 4) побудувати природну та штучні електромеханічні характеристики при напрузі на якоря  $U_{\text{я}} = U_{\text{ян}}$ ;  $U_{\text{я1}} = 0,75U_{\text{ян}}$ ;  $U_{\text{я2}} = 0,5U_{\text{ян}}$ ;  $U_{\text{я3}} = 0,3U_{\text{ян}}$ ;
- 5) визначити діапазон регулювання швидкості двигуна.

Вихідні дані варіантів завдання наведено у табл. 2.7,  $P_{\text{ном}} = P_{\text{н}}$ ;  $U_{\text{н}}$ ;  $I_{\text{н}}$ ;  $n_{\text{н}}$  - номінальна потужність, напруга та струм якоря і частота обертання ДПС,  $R_{\text{я}}$  - опір кола якоря.

Таблиця 2.7

Вихідні дані варіантів завдання

№ варіанта	$P_H$ , кВт	$U_{яH}$ , В	$I_H$ , А	$n_H$ , об/хв	Примітка
0	12	220	55	1400	
1	13	220	56	1550	
2	14	220	57	1650	
3	15	220	58	1750	
4	16	220	59	1950	
5	17	440	60	2150	
6	18	440	61	2300	
7	19	440	62	2450	
8	20	440	63	2650	
9	21	440	64	2750	

**Приклад задачі.** Відомі наступні вихідні дані:  $P_H = 10$  кВт,  $U_{яH} = 220$  В,  $I_H = 54$  А,  $n_H = 1630 \frac{\text{об}}{\text{хв}}$ ,  $R_я = 0,24$  Ом.

**Розв'язання задачі.** Номінальна кутова швидкість двигуна

$$\omega_H = \frac{\pi n_H}{30} = \frac{3,14 \cdot 1630}{30} = 170,6 \frac{\text{рад}}{\text{с}}.$$

Коефіцієнт ЕРС (моменту) двигуна

$$k\Phi = C_e = \frac{U_{яH} - I_H R_я}{\omega_H} = \frac{220 - 54 \cdot 0,24}{170,6} = 1,21 \text{ В} \cdot \text{с}.$$

Номінальний момент двигуна

$$M_H = C_e \cdot I_H = 1,21 \cdot 54 = 65,3 \text{ Н} \cdot \text{м}.$$

Додатковий опір  $R_{д1}$ , обмежуючий струм короткого замикання до заданого значення  $2I_H$ ,

$$R_{д1} = \frac{U_{яH}}{2I_H} - R_я = \frac{220}{2 \cdot 54} - 0,24 = 1,78 \text{ Ом}.$$

Додатковий опір  $R_{д2}$ , який при швидкості  $\omega_1 = 30$  рад/с збільшує струм до  $I_я = 2I_H$ ,

$$R_{д2} = \frac{U_{яH} - C_e \cdot \omega_1}{2I_H} - R_я = \frac{220 - 1,21 \cdot 30}{2 \cdot 54} - 0,24 = 1,46 \text{ Ом}.$$

Додатковий опір, який потрібно вимкнути з кола якоря,

$$R_д = R_{д1} - R_{д2} = 1,78 - 1,46 = 0,32 \text{ Ом}.$$

Швидкість двигуна при ввімкненому  $R_{д2}$  і  $M_c = 0,8 M_H = 52,3 \text{ Н} \cdot \text{м}$

$$\omega_c = \frac{U_H}{C_e} - \frac{M_c(R_{я} + R_{д2})}{C_e^2} = \frac{220}{1,21} - \frac{52,3(0,24 + 1,46)}{1,21^2} = 121,2 \frac{\text{рад}}{\text{с}}.$$

Швидкість ідеального холостого ходу ДПС для природної електромеханічної характеристики

$$\omega_0 = \frac{U_{яH}}{k\Phi} = \frac{220}{1,21} = 181,8 \frac{\text{рад}}{\text{с}}.$$

Швидкості ідеального холостого ходу для вказаних значень ДПС штучних характеристик при вказаних значеннях напруги якоря:

$$\omega_{01} = \frac{0,75U_{яH}}{k\Phi} = \frac{0,75 \cdot 220}{1,21} = 136,4 \frac{\text{рад}}{\text{с}};$$

$$\omega_{02} = \frac{0,5U_{яH}}{k\Phi} = \frac{0,5 \cdot 220}{1,21} = 90,9 \frac{\text{рад}}{\text{с}};$$

$$\omega_{03} = \frac{0,3U_{яH}}{k\Phi} = \frac{0,3 \cdot 220}{1,21} = 54,5 \frac{\text{рад}}{\text{с}}.$$

За отриманими даними на рис. 2.17 побудовані електромеханічні характеристики.

Нижня межа регулювання швидкості  $\omega_{min}$  визначається як

$$\omega_{min} = \frac{I_H R_{я}}{k\Phi} = \frac{54 \cdot 0,24}{1,21} = 10,7 \text{ рад/с}$$

Тоді діапазон регулювання швидкості двигуна дорівнює

$$D = \frac{\omega_H}{\omega_{min}} = \frac{170,6}{10,7} = 15,9.$$

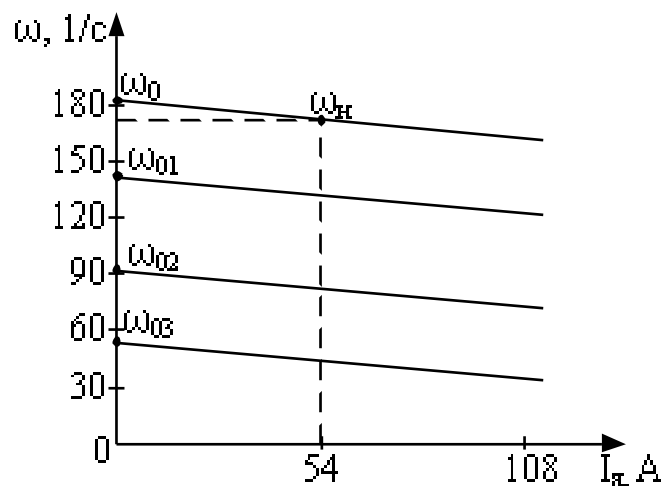




Рис. 2.17. Електромеханічні характеристики ДПС незалежного збудження

### 2.4.3. Контрольні запитання до теми 4

1. Основні показники регулювання швидкості електроприводів.
2. Сутність механічного, електромеханічного та електричного регулювання швидкості ДПС.
3. Регулювання швидкості ДПС: реостатне, зміною напруги якоря, зміною магнітного потоку обмотки збудження ДПС – сутність, основні співвідношення, схеми, графіки характеристик, особливості, недоліки та переваги.
4. Як змінюється або не змінюється швидкість ідеального холостого ходу та жорсткість механічної характеристики ДПС при зміні опору якоря, напруги якоря та магнітного моменту?
5. Як визначається швидкість ідеального холостого ходу та жорсткість характеристик ДПС?
6. Схема вмикання та характеристики електропривода системи перетворювач-двигун постійного струму (П – Д).
7. Регулювання швидкості у системі електропривода генератор – двигун постійного струму (Г – Д).
8. Методи розрахунку характеристик ДПС з урахуванням забезпечення вимог до швидкості двигуна.

## 2.5. Тема 5. Частотне регулювання координат електроприводів змінного струму

### 2.5.1. Зміст та методичні вказівки до теми 5

Частотний спосіб є одним з найбільш перспективних і широко використовуваних у цей час способів регулювання швидкості АД. Сутність його полягає у тому, що при змінненні частоти  $f_1$  напруги живлення обмотки статора асинхронного двигуна, як витікає з виразу для кутової швидкості АД

$$\omega = \omega_0 \cdot (1 - s) = \frac{2 \cdot \pi \cdot f_1}{p} \cdot (1 - s). \quad (2.61)$$

Якщо змінювати частоту  $f_1$ , можна змінювати величину швидкості  $\omega$ , а отже й синхронної частоти  $\omega_0$ . Такий спосіб регулювання швидкості дозволяє отримувати різні механічні характеристики високої жорсткості, забезпечує плавне регулювання швидкості у широкому діапазоні. При частотному способі регулювання швидкості АД не відбувається збільшення його ковзання  $s$ , як це

має місце, наприклад, при реостатному регулюванні. Тому втрати ковзання виявляються невеликими, у зв'язку з чим частотний спосіб регулювання визнаний найбільш економічним.

Важливо підкреслити, що для кращого використання АД й одержання високих енергетичних показників його роботи (коефіцієнтів потужності і корисної дії, перевантажувальної здатності) одночасно зі зміною частоти живлячої напруги необхідно змінювати й значення цієї напруги. Закон такої зміни визначається характером навантаження електропривода.

Останнім часом широке застосування одержали статичні перетворювачі частоти, що обумовлено їх високими техніко-економічними показниками, у тому числі широким діапазоном і високою плавністю регулювання швидкості, високими ККД (порядку 0,85...0,92) і швидкодією, відсутністю шумів при роботі.

Однак для кращого використання й підвищення енергетичних показників АД (коефіцієнта потужності, ККД, перевантажувальної здатності та ін.) одночасно зі зміною частоти живлячої напруги двигуна необхідно змінювати й значення цієї напруги. Зневажаючи на спадання напруги в обмотці статора, можна записати, що

$$U_1 \approx E_1 = 4,44 \cdot W_1 \cdot f_1 \cdot \Phi \cdot k_{\text{обм}}. \quad (2.62)$$

При виборі співвідношення між частотою й напругою, що підводиться до статора АД, виходять із умови збереження його перевантажувальної здатності  $\lambda$ , яка визначається відношенням критичного моменту  $M_k$  до моменту навантаження  $M_c$  у вигляді

$$\lambda = M_k / M_c = \text{Const}. \quad (2.63)$$

Звідси випливає, що для забезпечення величини  $\lambda = \text{Const}$  при частотному керуванні необхідно пропорційно частоті  $f_1$  змінювати і напругу  $U_1$ , тобто виконувати умову

$$U_1 / f_1 = \text{Const}. \quad (2.64)$$

Тоді основний закон частотного регулювання швидкості, що одержав назву формули Костенко, визначається співвідношенням

$$\frac{U_1}{U_{1\text{ном}}} = \frac{f_1}{f_{1\text{ном}}} \cdot \sqrt{\frac{M}{M_{\text{ном}}}}. \quad (2.65)$$

При роботі ПЕД у номінальному режимі або з постійним моментом навантаження цей закон спрощується й має вигляд

$$\frac{U_1}{U_{1ном}} = \frac{f_1}{f_{1ном}} \text{ або } \frac{U_1}{f_1} = \text{Const.}$$

Наведені формули дозволяють визначити взаємозв'язок між напругою  $U_1$  і частотою  $f_1$  для будь-яких необхідних режимів роботи ЕП.

Для вентиляторного характеру моменту навантаження повинна дотримуватися умова

$$U_1/f_1^2 = \text{Const}, \quad (2.66)$$

а при моменті навантаження обернено пропорційному швидкості, воно має вигляд

$$U_1/\sqrt{f_1} = \text{Const}. \quad (2.67)$$

Функціональну схему вмикання трифазного АД з короткозамкненим ротором (КЗР) й перетворювача частоти зображено на рис. 2.18.

На вхід перетворювача частоти подається стандартна за величиною й частотою ( $f_1 = 50$  Гц) трифазна напруга мережі  $U_m = U_1$ . З виходу знімається змінна напруга  $U_{рег}$  регульованої частоти  $f_{рег}$ , значення яких перебувають між собою у певних співвідношеннях, що реалізуються функціональним перетворювачем (ФП). На вхід ФП подається керуючий сигнал у вигляді напруги  $U_k$ , який і визначає характер зміни швидкості приводного ЕД.

Частотне регулювання швидкості ПЕД можливо у замкнених системах керування АЕП змінного струму, а як приводні використовуються найчастіше трифазні короткозамкнені АД. У системах частотного регулювання швидкості ЕП використовуються регульовані перетворювачі з автономним інвертором напруги (АІН) й автономним інвертором струму (АІС). У першому випадку

реалізується принцип частотного керування швидкістю, а керуючими величинами є напруга статора і її частота. У другому випадку - принцип частотно-струмового керування швидкістю, а керуючими величинами є струм статора і його частота. Статичні ПЧ діляться на перетворювачі із проміжною ланкою постійного струму (з автономними інверторами) і безпосередні перетворювачі частоти (БПЧ).

У загальному випадку задача частотного регулювання швидкості зводиться до формування механічних характеристик АД, що забезпечують необхідні перевантажувальну здатність і жорсткість в усьому діапазоні регулювання швидкості ПЕД з високими надійністю, точністю та економічністю.

У перетворювача частоти керуванню підлягають дві вихідні координати – амплітуди напруги  $U_m$  або струму  $I_m$  навантаження й частота  $f_n$  змінних напруги або струму. ПЧ характеризується двома вхідними координатами – напругою керування напругою  $U_{кн}$  або струмом  $U_{кс}$  і напругою керування частотою  $U_{кф}$ .

На рис. 2.19. зображено функціональну схему ПЧ із автономним інвертором (АІ). Перетворення напруги мережі  $U_1$  з незмінною частотою  $f_1$  у

керовану спрямовані напругу  $U_d$  або струм  $I_d$  здійснюється системою, що називають керованим джерелом (КД) відповідно напруги (КДН) або струму (КДС). Значення  $U_d$  або  $I_d$  задаються відповідно сигналами завдання  $U_{zn}$  або  $U_{zc}$ . Величини  $U_d$ ,  $I_d$  є вхідними енергетичними величинами автономного інвертора. При цьому автономний інвертор виконується як інвертор напруги з вихідними координатами  $U_n$  і  $f_n$ , якщо одержує живлення від керованого джерела напруги, або як інвертор струму з вихідними координатами  $I_n$  і  $f_n$ , якщо одержує живлення від керованого джерела струму.

Вихідні величини  $U_n$ ,  $I_n$ ,  $f_n$  керуються каналом частоти, до складу якого входить система керування інвертором (СКИ). У системі частотного керування АД канали керування АІ й КД взаємозалежні – завдання на рівень напруги й струму КД формується звичайно за допомогою функціонального перетворювача. Він забезпечує потрібне співвідношення  $U_1/f_1$  на обмотці статора АД, для чого необхідно використовувати регулятори швидкості й частоти. Основу таких ПЧ становлять автономні інвертори АІН і АІС.

Для ПЧ з АІН керований перетворювач (КП) повинен мати малий внутрішній опір, щоб забезпечити сталість напруги живлення інвертора незалежно від струму навантаження. При значному внутрішньому опорі КП умова  $U_d = \text{Const}$  забезпечується за допомогою негативного зворотного зв'язку з напруги. Тому що полярність напруги  $U_d$  не змінюється, то рекуперація енергії із кола навантаження у мережу змінного струму можлива тільки при зміні напрямку струму  $I_d$ . Для цього потрібен реверсивний КП із двома комплектами вентиляних груп, що ускладнює схему ПЧ з АІН.

Для ПЧ з АІС КП повинен забезпечувати сталість вхідного струму інвертора  $I_d$  незалежно від напруги навантаження, тобто незалежно від швидкості асинхронного двигуна – навантаження ПЧ. Умовно  $I_d = \text{Const}$  відповідає роботі КП у режимі джерела струму, що досягається за допомогою зворотних зв'язків і введення у коло постійного струму реактора з великою індуктивністю.

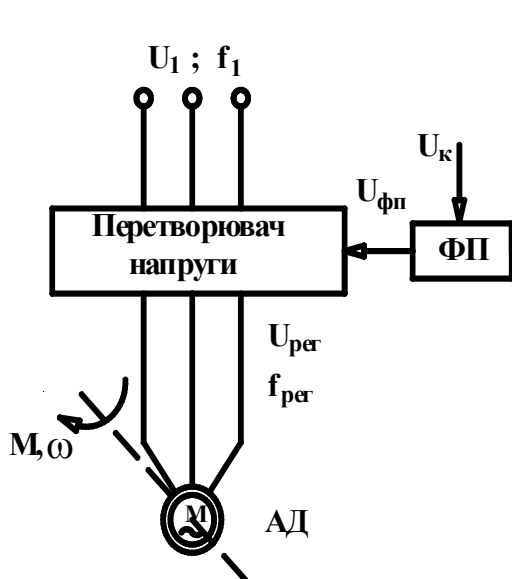


Рис. 2.18. Схема вмикання АД

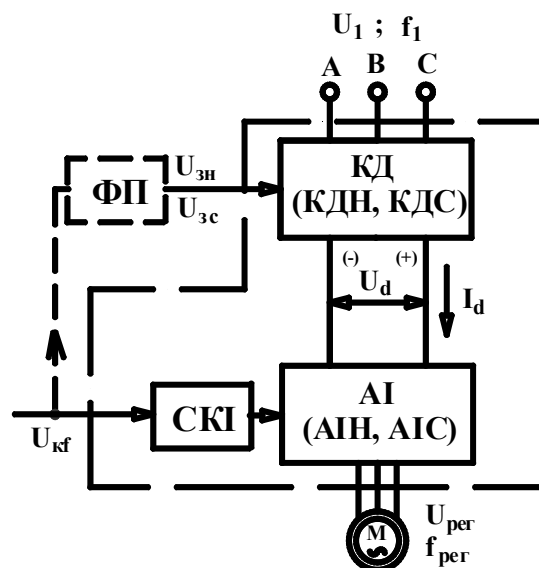


Рис. 2.19. Функціональна схема ПЧ

Перевагою ПЧ з АІ є можливість регулювання частоти у напрямках як уверх, так і униз від частоти мережі живлення змінного струму. Верхня межа зміни частоти обмежується максимально припустимими швидкістю двигуна й частотою комутації вентилів. Нижня межа частоти обмежується напругою й струмом інвертора, що приводить до нерівномірності обертання двигуна, тобто кроковому режиму.

Таким чином, перетворювачі частоти з АІ забезпечують двоступінчасте перетворення змінної напруги струму однієї нерегульованої частоти у змінну напругу або струм регульованої частоти. У таких ПЧ виконується подвійне перетворення електричної енергії. Кероване джерело або випрямляч перетворює енергію змінного струму однієї незмінної частоти й амплітуди живлячої напруги в енергію постійного струму. А потім енергія постійного струму перетворюється в енергію змінного струму частоти, що змінюється, і амплітуди за допомогою АІ. Схеми АІН і АІС подібні. Відмінність їх полягає у способі живлення. АІН живиться від джерела напруги через паралельний ємнісний фільтр великої ємності, а АІС - від джерела струму через послідовний індуктивний фільтр з великою індуктивністю.

Перетворювач частоти із проміжною ланкою постійного струму дозволяє плавно й у широких межах регулювати вихідну частоту незалежно від частоти напруги мережі, що живить перетворювач. Такі перетворювачі забезпечують двозонне регулювання частоти обертання привода, електричне гальмування, а також формування необхідних механічних характеристик. Основним вузлом ПЧ є автономний інвертор (АІ), що перетворює спрямовану напругу у трифазну напругу регульованої частоти (рис. 2.20).

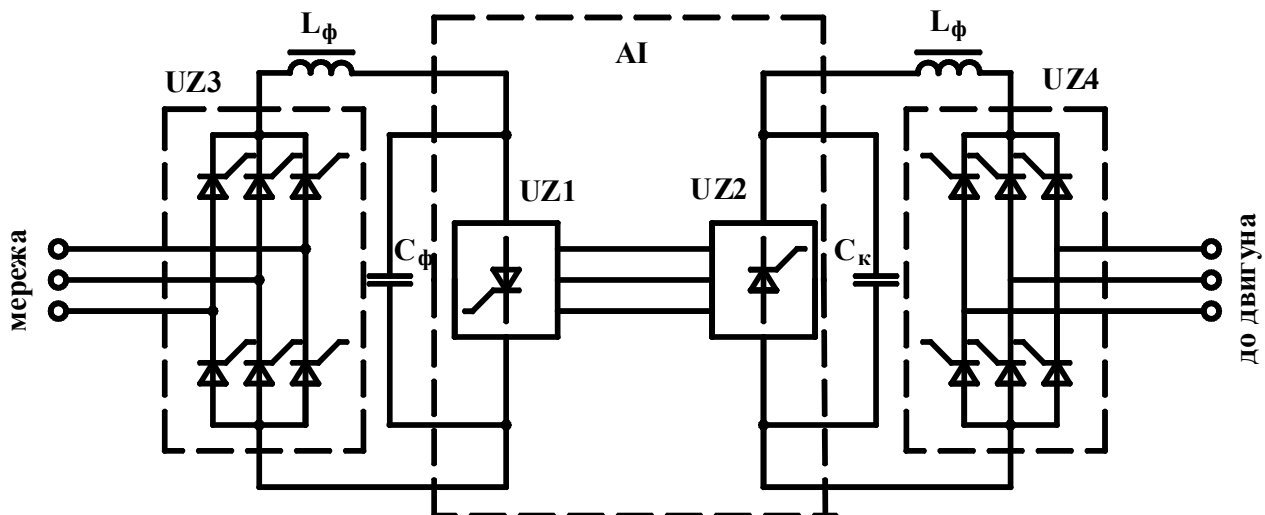


Рис. 2.20. Схема асинхронного ЕП з АІ

До складу ПЧ входять АІ із групою вентилів прямого UZ1 і зворотного UZ2 струмів, керований випрямляч UZ3 з L, C - фільтром і ведений інвертор

UZ4. Перетворення спрямованої напруги у трифазну регульованої частоти здійснюється перемиканням із заданою частотою у певній послідовності групи тиристорів у плечах мостів АІ. Для примусової комутації тиристорів використовуються конденсатори. Випрямляч UZ3 одночасно здійснює регулювання напруги ПЧ, а ведений інвертор UZ4 забезпечує проходження активної й реактивної енергії двигуна у мережу живлення у режимі електричного гальмування.

Однак, якщо розглядати систему у цілому, тобто АІН - Д, то при широкому діапазоні регулювання кутової швидкості привода й досить мінливому моменті навантаження напруга на двигуні повинна регулюватися у функції двох параметрів - частоти й моменту. Таке регулювання може бути здійснено у замкненій системі керування. Функціональну схему замкненої системи частотного регулювання з АІН із жорстким негативним зворотним зв'язком зі швидкості (ЗЗШ) зображено на рис. 2.21.

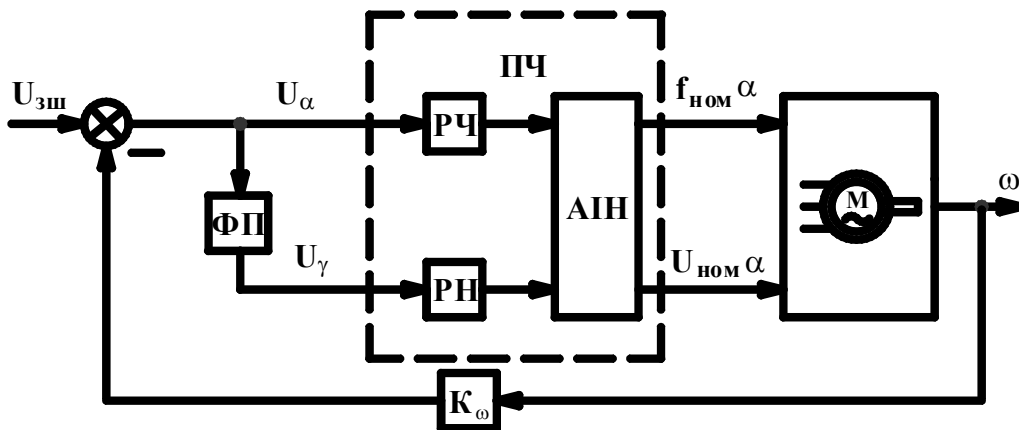


Рис. 2.21. Функціональна схема замкненої системи частотного регулювання з АІН із жорстким ЗЗШ

У замкнених системах частотного регулювання швидкості асинхронних двигунів з КЗР, керованих АІН, та жорстким ЗЗШ одночасно створюється вплив на напругу й частоту. Зв'язок між регуляторами частоти (РЧ) і напруги (РН) відбувається за допомогою функціонального перетворювача (ФП), що забезпечує необхідне співвідношення між напругою й частотою на статорі двигуна, де  $\alpha = f_1/f_{1ном}$  й  $\gamma = U_1/U_{ном}$  – коефіцієнти ЗЗ з частоти й напруги.

Стабілізація магнітного потоку двигуна за допомогою жорсткого негативного ЗЗ зі струму шляхом регулювання його напруги у функції частоти (за допомогою ФП) і навантаження забезпечує механічні характеристики двигуна з високою перевантажувальною здатністю й жорсткістю, а діапазон регулювання досягає до 20:1.

Напруга від задавача інтенсивності (ЗІ) безпосередньо надходить для завдання частоти на вхід автономного інвертора (АІ), і через перетворювач ФП - для завдання напруги на вхід керованого випрямляча (КВ) або РН. У системі керування з ТП частоти застосовується ланка постійного струму, а у СК із ФП можуть використатися зворотні зв'язки з напруги КВ або всього ТП з контуром регулювання напруги КВ або датчиком напруги (ДН) та регулятором напруги

(РН) відповідно.

В електроприводах, що працюють з частими перехідними процесами, і у випадках, коли потрібне гальмування АД з рекуперацією (віддачею) енергії у мережу, доцільно використовувати ПЧ з АІС. Для цього керований випрямляч переводиться в інверторний режим і при збереженні напрямку спрямованого струму енергія рекуперується у мережу, у цьому складається перевага АІС перед АІН.

Функціональну схему електропривода із частотно-струмовим керуванням зображено на рис. 2.22.

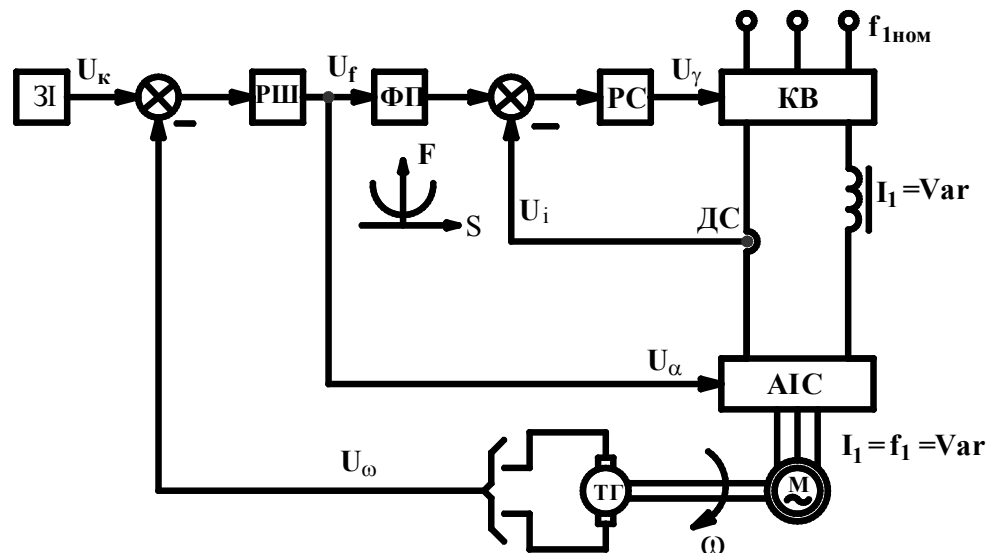


Рис. 2.22. Функціональна схема частотно-струмового регулювання швидкості з АІС

Дана схема керування є двоконтурною системою керування з жорсткими негативними ЗЗ зі швидкості і струму. Внутрішнім є контур струму, а зовнішнім є контур швидкості зі своїми регуляторами швидкості (РШ) і струму (РС), датчиками швидкості (тахогенератора (ТГ)) і струму (ДС). Функціональний перетворювач забезпечує підтримку необхідного співвідношення між напругою  $U_1$  і частотою  $f_1$ . При цьому впливом, що завдає, для АІС є напруга  $U_f = U_3 - U_\omega$ , що завдає швидкість обертання й частоту струму статора двигуна.

У системах частотно-струмового керування двигун живиться від ТП частоти з АІС. У цьому випадку КВ разом з контуром регулювання струму випрямляча утворює джерело струму. Керування АД виконується шляхом завдання струму статора й частоти АІС. Обидві величини, у свою чергу, залежать від загального сигналу керування системою, що визначає швидкість двигуна. Струм статора зв'язаний також з навантаженням двигуна.

Завданням на струм статора є вихідний сигнал функціонального перетворювача. Вихідним сигналом ФП є сигнал, пропорційний абсолютному ковзанню. Цей сигнал утворений як різницевий сигнал між сигналом  $U_\alpha$ ,

пропорційним при лінійній регулювальній характеристиці АІС частоті напруги статора, і сигналом тахогенератора  $U_{\omega}$ , пропорційним частоті обертання ротора.

Для забезпечення необхідної жорсткості механічних характеристик застосовуються контури регулювання швидкості двигуна. Вхідна напруга ФП визначається як різницевий сигнал між вихідним сигналом регулятора швидкості і сигналом тахогенератора. Завдання на швидкість уводиться через задавач інтенсивності (ЗІ) на вхід контура регулювання швидкості двигуна.

### 2.5.2. Розрахунок коефіцієнта передачі регулятора напруги системи частотного керування

Мета індивідуального завдання: поглибити теоретичні знання студентів з питань частотного керування координат асинхронного ЕП; отримати практичні навички та уміння з методики розрахунку параметрів елементів привода.

**Постановка задачі.** Для системи частотного керування швидкістю асинхронного електропривода з АІН та зворотним зв'язком з напруги, функціональну схему якої наведено на рис. 2.23, з урахуванням схеми заміщення асинхронного двигуна (АД) відомі наступні вихідні дані: номінальне ковзання  $S_{ном} = 0,02$ , відносна частота  $\nu = f_1/f_{1ном} = 0,1; 0,2...1$ , індуктивність  $L_{\phi} = 1,5$  мГн котушки індуктивності та ємність  $C_{\phi} = 40 \cdot 10^3$  мкФ згладжувального фільтра кола постійного струму, коефіцієнт передачі датчика напруги  $k_{дн} = 0,05$ , налагоджувальний коефіцієнт з напруги  $\alpha_{н} = 4$ . Значення постійної часу  $T_{в}$ , коефіцієнта передачі  $k_{в}$  та опору  $R_{\phi}$  керованого випрямляча, опір  $R_{\phi}$  резистора згладжувального фільтра, коефіцієнтів А та С для середини діапазону регулювання відносної частоти ( $\nu_c = 0,55$ ), які визначаються параметрами схеми заміщення АД, та коефіцієнт потужності  $\cos\phi_{д}$  двигуна, які надані у табл. 2.8 для кожного варіанта завдання.

Необхідно розглянути функціональну схему та розрахувати коефіцієнт передачі (перетворення) регулятора напруги системи частотного керування асинхронного електропривода з АІН.



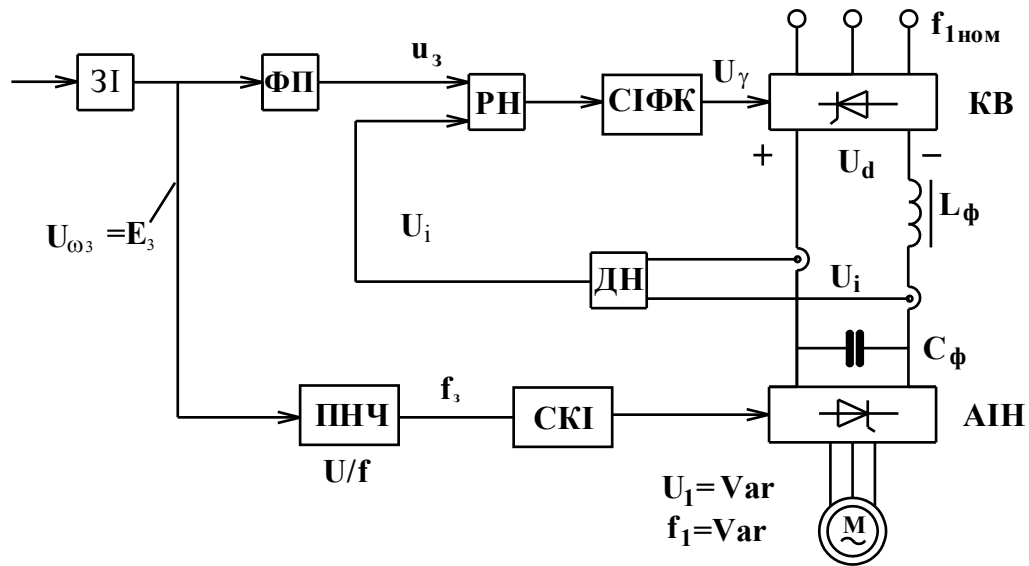


Рис. 2.23. Функціональна схема системи керування з АІН та зворотним зв'язком за напругою

Таблиця 2.8

Вихідні дані варіантів завдання

№ варіанта	$T_B, c$	$K_B$	$R_B, MOm$	$R_\phi, MOm$	$A$	$C$	$\cos\phi_d$	Примітка
0	0,001	8	0,97	5,1	5,15	13,5	0,73	
1	0,0015	10,5	1,1	5,27	5,45	13,75	0,75	
2	0,002	12,5	1,14	5,39	5,75	14,05	0,78	
3	0,0025	14	1,17	5,57	6,05	14,3	0,81	
4	0,003	16	1,21	5,87	6,35	14,65	0,84	
5	0,0032	18,5	1,25	6,17	6,65	14,9	0,87	
6	0,0035	20	1,28	6,43	6,85	15,15	0,89	
7	0,004	23	1,31	6,69	7,15	15,45	0,93	
8	0,0045	25	1,34	6,81	7,35	15,75	0,95	
9	0,005	28	1,38	7,11	7,65	16,05	0,97	

**Приклад розв'язання задачі за темою.** За наданими даними та наступними значеннями параметрів:  $T_B = 0,002c$ ,  $K_B = 20$ ,  $R_B = 1,38MOm$ ,  $R_\phi = 6,6MOm$ ,  $A = 6,46 \cdot 10^{-5}$ ,  $C = 1,49 \cdot 10^{-5}$ ,  $\cos\phi_d = 0,9$ .

Розрахувати коефіцієнт передачі регулятора напруги системи частотного керування асинхронного ЕП з АІН.

Розв'язання задачі.

1. Розрахунок активного опору кола постійного струму АІН

$$R = R_B + R_\phi = 1,38 + 6,6 = 7,98 \text{ мОм.}$$

2. Визначення коефіцієнтів пропорційності за напругою та струмом відповідно:

$$k_u = 2/\pi = 2/3,14 = 0,637 ;$$
$$k_i = 6 \cdot \cos\varphi_d / \pi = 6 \cdot 0,9 / 3,14 = 1,59 .$$

3. Визначення зведеного до кола постійного струму опору АД

$$R_d = \frac{1}{k_i \cdot k_u} \cdot \sqrt{\frac{A}{C}} = \frac{1}{1,56 \cdot 0,637} \cdot \sqrt{\frac{6,46 \cdot 10^{-5}}{1,49 \cdot 10^{-5}}} = 1,39 \text{ Ом.} \quad (2.68)$$

4. Розрахунок постійної часу згладжувального фільтра

$$T_{\phi 1} = \frac{L_\phi}{R} = \frac{1,5}{7,98} = 0,19 \text{ с;}$$

$$T_{\phi 2} = C_\phi \cdot R_d = 40 \cdot 10^3 \cdot 10^{-6} \cdot 1,39 = 55,53 \cdot 10^{-3} \text{ с.}$$

5. Визначення постійної часу об'єкта керування (кола обмотки статора АД) контура напруги

$$T_{01} = \frac{R}{R_d} \cdot (T_{\phi 1} + T_{\phi 2}) = \frac{7,98 \cdot 10^{-3}}{1,39} \cdot (0,19 + 0,0553) = 1,4 \cdot 10^{-3} \text{ с.} \quad (2.69)$$

6. Розрахунок коефіцієнта передачі регулятора напруги

$$k_{PH} = \frac{R + R_d}{\alpha_H \cdot (T_{01} + T_B) \cdot K_B \cdot K_d \cdot R_d} =$$
$$= \frac{7,98 \cdot 10^{-3} + 1,39}{4 \cdot (1,4 \cdot 10^{-3} + 0,002) \cdot 20 \cdot 0,05 \cdot 1,39} = 73,95. \quad (2.70)$$

### 2.5.3. Контрольні запитання до теми 5

1. Сутність частотного способу регулювання швидкості електродвигунів змінного струму.

2. Принципи частотного регулювання швидкості електродвигунів змінного струму, формула Костенко.

3. Закони частотного регулювання швидкості електродвигунів.
4. Призначення, функціональна схема та основні вузли частотного перетворювача з автономним інвертором.
5. Призначення функціонального перетворювача у схемах частотного керування.
6. Основні типи перетворювачів частоти, недоліки та переваги.
7. Функціональна схема розімкненої системи частотного керування за стабілізацією співвідношення  $U_1/f_1$ .
8. Типові функціональні схеми частотного регулювання швидкості асинхронних двигунів з АІН та АІС, склад, призначення елементів та робота.
9. Призначення регуляторів у системах керування.
10. Основні етапи розрахунку параметрів регулятора напруги.

## 2.6. Тема 6. Типові структури регульованих електроприводів

### 2.6.1. Зміст та методичні вказівки до теми 6

Основними типами перетворювачів, застосованих у теперішній час у керованому електроприводі постійного струму, є напівпровідникові статичні перетворювачі та у першу чергу тиристорні перетворювачі (ТП). Такі перетворювачі використовують як джерела живлення приводного електродвигуна (ПЕД). Зв'язка тиристорний перетворювач – двигун постійного струму отримала назву система ТП – Д, функціональну схему силової частини якої наведено на рис 2.24.

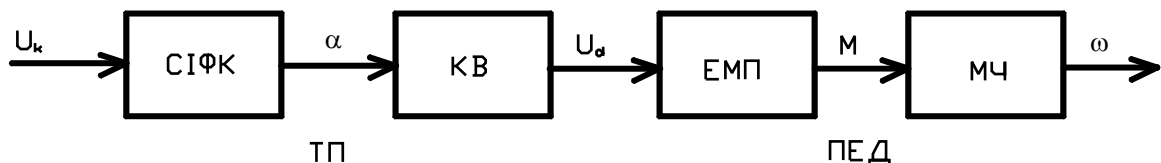


Рис 2.24. Функціональна схема системи ТП-Д

Основними вузлами такої системи є ТП, який складається із системи імпульсно-фазового керування (СИФК) та керованого випрямляча (КВ), і ПЕД постійного струму, головними частинами якого є електромеханічний перетворювач (ЕМП) енергії та механічна частина (МЧ) двигуна.

Тиристорний перетворювач постійного струму призначений для перетворення напруги змінного струму у регульовану напругу постійного струму для живлення кін обмоток якоря й збудження електричних машин у функції вхідної керуючої напруги. Основний елемент ТП – керований напівпровідниковий вентиль із трьома р – n переходами, який називають тиристором VS; схема включення тріодного тиристора та часові діаграми напруги та струму на навантаженні зображена на рис. 2.25, а і б.

Якщо немає керуючої напруги  $U_k$  на керуючому електроді (КЕ), то тиристор VS закритий, оскільки він має великий опір у прямому й

зворотному напрямках. При подачі напруги на КЕ тиристор відчиняється й працює як звичайний некерований вентиль. Включення тиристора відбувається у певні моменти часу подачі напруги  $U_k$ , тобто

$$\omega t_1 = \alpha, \quad (2.71)$$

де  $\alpha$  - кут включення (керування або регулювання), відлічуваний від початку позитивної напівхвилі.

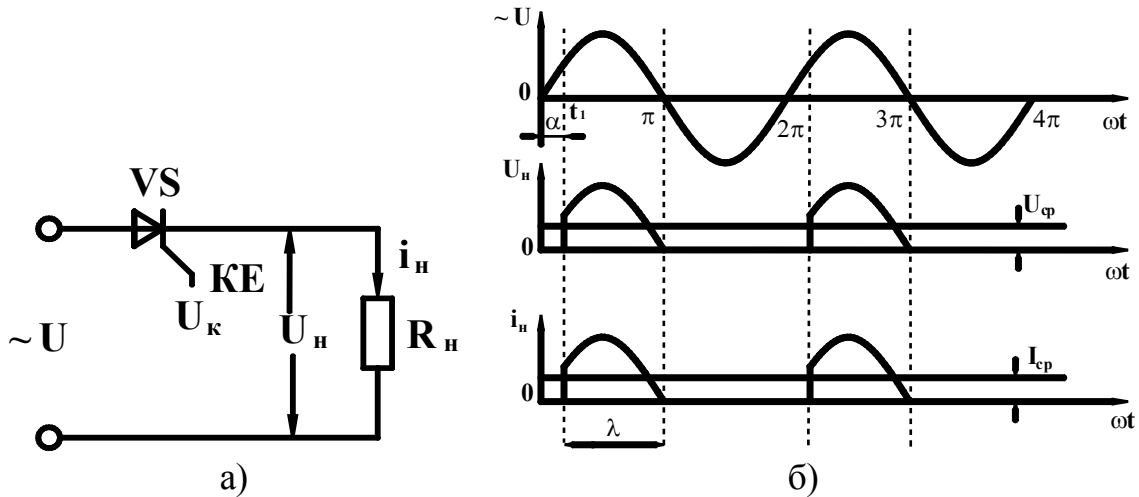


Рис. 2.25. Схема включення й часові діаграми тиристора

Час, протягом якого через тиристор VS протікає струм, визначається кутом провідності  $\lambda$ .

Таким чином, керування напругою на виході керованого вентиля зводиться до керування у часі моментами вмикання (вимикання) тиристорів. Для керування моментами часу й черговістю включення тиристорів служить система керування. Існує досить велика кількість класифікаційних ознак ТП, розглянемо деякі з них.

Залежно від способу з'єднання тиристорів у вентилях групах розрізняють нульові й мостові схеми ТП. Мостова схема ТП еквівалентна послідовному включенню двох груп вентилів нульових схем. При цьому вентилі із загальними катодами називають катодною, а із загальними анодами – анодною групами. Для збільшення потужності перетворювача й зменшення пульсацій вихідної напруги нульові й мостові схеми можуть з'єднуватися паралельно або послідовно. При паралельному з'єднанні застосовують зрівняльні реактори, які служать для вирівнювання миттєвих значень напруг одночасно працюючих обмоток трансформаторів.

ТП підрозділяють на нереверсивні, що забезпечують протікання струму у колі навантаження тільки в одному напрямку, і реверсивні, що дозволяють змінювати напрямок струму у колі навантаження. Реверсування струму досягається шляхом перемикачання у колі навантаження за допомогою спеціального перемикача або шляхом застосування двох комплектів вентилів. Реверсивні двокомплектні перетворювачі виконують за зустрічно-паралельній або перехресній схемами. При зустрічно-паралельній схемі обидва комплекти вентилів живляться від загальної обмотки трансформатора й

включені зустрічно й паралельно один одному. У перехресній схемі кожний комплект вентилів живиться від окремої обмотки, а комплекти включаються перехресно стосовно навантаження.

У двокомплектних реверсивних перетворювачах застосовують роздільне та спільне керування комплектами вентилів. У першому випадку керуючі імпульси подаються тільки на комплект вентилів, що забезпечує необхідний напрямок струму у колі навантаження. Вентилі другого комплекту при цьому не працюють. При спільному керуванні імпульси подають на обидва комплекти вентилів незалежно від напрямку струму у колі навантаження. Через неробочий комплект протікає тільки зрівняльний струм, що замикається через коло, яке включає вентилі обох комплектів і трансформаторні обмотки, при цьому минається коло навантаження. Для обмеження зрівняльного струму у коло вмикаються обмежуючі дроселі.

Залежно від того, є чи нема струму у навантаженні ТП, розрізняють режим безперервних струмів, при якому струм у навантаженні не має періодів нульового струму, і режим переривчастих струмів, при якому струм у навантаженні переривається, тобто дорівнює нулю. Режим визначається величиною кута включення, індуктивністю обмоток, а також величиною й характером навантаження.

За способом побудови системи керування: система імпульсно-фазового керування (СІФК) з горизонтальним і вертикальним керуванням.

За формою опорної напруги: СК з генераторами опорної напруги пилкоподібної й косинусоїдної форм.

За способом керування вентиляними комплектами: спільне й роздільне керування. Крім того, при спільному розрізняють погоджене й неузгоджене керування. При спільному погодженому керуванні середні значення ЕРС випрямного й інверсного комплектів рівні один одному й протилежні за знаком, але миттєві значення не рівні. Внаслідок цього в замкнених контурах, що утворені тиристорними комплектами й джерелом живлення, тече зрівняльний струм, якій необхідно обмежити реакторами (його обмежують приблизно до 10 % від номінального струму).

У випадку спільного неузгодженого керування значення ЕРС інверсного комплекту перевищує ЕРС випрямної групи. При мінімальному куті інвертування зменшується зрівняльний струм, і тому для його обмеження необхідно включення реакторів у коло зрівняльного струму значно меншої індуктивності, ніж у першому випадку.

При роздільному керуванні немає потреби у зрівняльних реакторах. Роздільне керування припускає подачу керуючих імпульсів на той комплект вентилів, що повинен у цей момент працювати. З іншого комплекту вентилів керуючі імпульси знімаються. Це виконується спеціальним логічним пристроєм, що визначає момент рівності нулю струму навантаження (вентилів) і блокує керуючі імпульси комплекту вентилів, що працював раніше. Після деякої паузи (близько 5 - 10 мс) дозволяється подача імпульсів на вентилі іншої групи. При роздільному керуванні підвищується ККД електропривода через відсутність зрівняльних струмів.

Функціональна схема ТП, яку зображено на рис. 2.26, а, складається із системи керування (блок Б1) та керованого випрямляча (КВ, блок Б2). Вхідною координатою ТП є напруга керування  $U_k$ , вихідною координатою – спрямована ЕРС, обумовлена як середня на інтервалі провідності величина в усталеному режимі  $E_d$  або напруги  $U_d$ . Вхідний блок Б1 перетворює величину  $U_k$  у кут  $\alpha$  відкриття тиристора, а вихідний блок Б2 перетворює величину кута  $\alpha$  в ЕРС  $E_d$  ТП. Як СК блок Б1 використовується система імпульсно-фазового керування, а блок Б2 являє керовані вентиляльні групи (ВГ), які відповідним чином з'єднані. Вони і утворюють керований випрямляч (КВ), що складається з комплектів тиристорів, які забезпечують перетворення напруги змінного струму у регульовану напругу постійного струму необхідного напрямку, наприклад комплекти «Вперед» і «Назад» у реверсивних ТП.

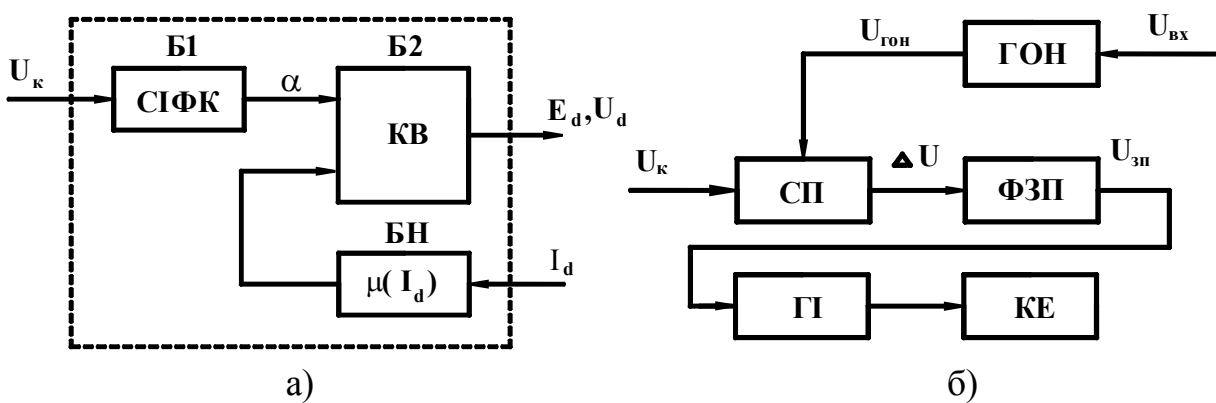


Рис. 2.26. Функціональні схеми ТП і блоку керування

На вихідну координату ТП діє вплив, що обумовлює, у виді струму  $I_d$  навантаження, який через блок навантаження (БН) надходить до блоку Б2. Вплив струму  $I_d$  на ЕРС  $E_d$  проявляється тільки у режимі переривчастих струмів. У режимі безперервних струмів ЕРС ТП є функцією тільки кута включення

$$U_d = E_{d0} \cdot \cos \alpha.$$

Принцип дії СІФК заснований на перетворенні безперервної вхідної керуючої напруги  $U_k$  при рівності його опорній напрузі у фазовий зсув імпульсу, що відмикає, часове положення якого відраховується від моменту природного відмикання тиристора. Основу СІФК складає блок керування, функціональну схему якого наведено на рис. 2.26, б, яка призначена для керування одним тиристором. До складу блока входять: генератор опорної напруги (ГОН), що синхронізується напругою живлення тиристорів, схема порівняння (СП) напруг  $U_k$  і  $U_{гон}$ , фазозсуваючий пристрій (ФЗП), що регулює фазу імпульсу, який відмикає, і генератор імпульсів (ГІ), що формує необхідні параметри імпульсів  $U_\alpha$ , які подаються на керуючі електроди (КЕ) і відмикають тиристори.

Керовані випрямлячі будуються за схемами, які аналогічні схемам випрямлячів з некерованими вентилями. Більшість КВ будується за

трифазними нульовою й мостовою схемами випрямлення, які зображено на рис. 2.27, а й б відповідно.

ТП працюють на активно-індуктивне навантаження двигуна М. Роботу тиристорів забезпечує СІФК, що змінює за заданим законом кут включення  $\alpha$ , а отже, і середні значення спрямлених напруг і струмів.

Аналіз роботи нульової схеми КВ показує, що при куті керування  $\alpha < \pi/6 (< 30^\circ)$  спрямленим струм  $i_n$  має безперервний характер, і кожний тиристор випрямляча відкритий протягом часу, що відповідає куту  $2\pi/3$ . При цьому середнє значення спрямленої напруги для кута  $\alpha \neq 0$  визначається за формулою

$$U_{н.ср} = \frac{1}{2\pi/3} \int_{\pi/6+\alpha}^{\pi} \sqrt{2}U_2 \sin \omega t \cdot d(\omega t) = U_{d0} \frac{\sqrt{3}}{3} [1 + \cos(30^\circ + \alpha)]. \quad (2.72)$$

При куті  $\alpha > \pi/6$  у спрямленому струмі з'являються паузи, що відповідає режиму переривчастих струмів.

На рис. 2.27, б наведена схема трифазного мостового керованого випрямляча. У нього входять шість тиристорів, електроди яких об'єднані у катодну й анодну групи. Так само як і у некерованому випрямлячеві, у розглянутому пристрої одночасно працюють два тиристора: один - з анодної, інший - з катодної груп. При цьому керуючий сигнал, що подається на тиристор катодної групи, випереджає на 180 град сигнал, який надходить на тиристор анодної групи.

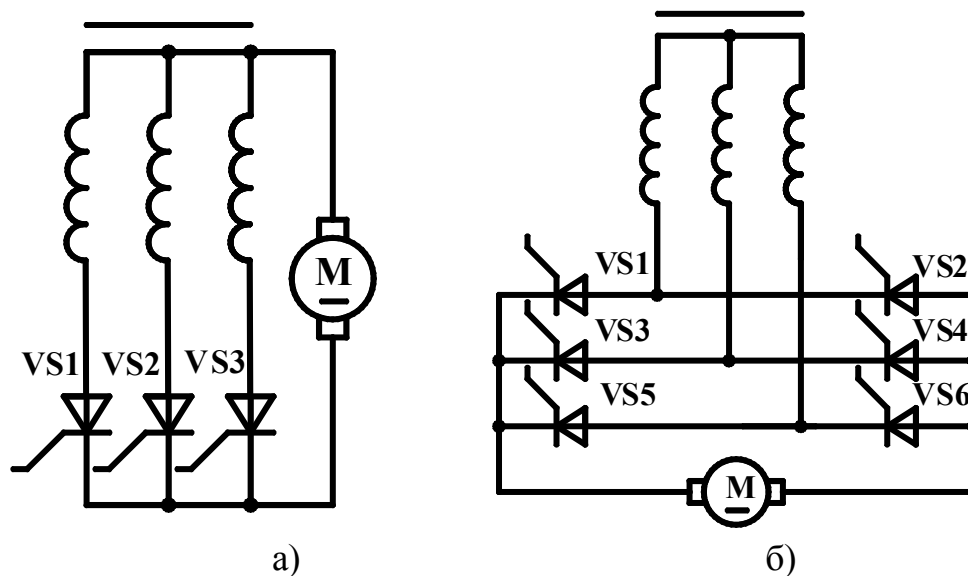


Рис. 2.27. Схеми керованих випрямлячів

Режим переривчастого струму у мостовому випрямлячеві настає при куті керування  $\alpha > \pi/3$ . У цьому режимі один з двох тиристорів, який повинен відкриватися, не зможе відкритися, й струму у навантажувальному пристрої не буде. Щоб уникнути цього, керуючі імпульси повинні мати тривалість, що відповідає куту  $\pi/3$ .

Співвідношення для середнього значення спрямленої напруги при куті  $\alpha < \pi/3$  має вигляд

$$U_{нсп} = U_{до} \cdot \cos \alpha. \quad (2.73)$$

До основних статичних характеристик тиристорного перетворювача відносяться наступні характеристики:

1) характеристика керування СІФК - залежність кута включення від напруги керування  $\alpha = f(U_k)$ ;

2) зовнішня характеристика ТП - залежність напруги або ЕРС перетворювача від струму навантаження  $U_d = f(I_d)$  при  $\alpha = \text{Const}$ ;

3) характеристика керування ТП - залежність напруги або ЕРС перетворювача від напруги керування  $U_d = E_d = f(U_k)$ ;

4) характеристика керування випрямляча - залежність напруги або ЕРС керованого випрямляча від кута включення  $U_d \approx E_d = f(\alpha)$ .

Типові графіки характеристик ТП наведено на рис. 2.28.

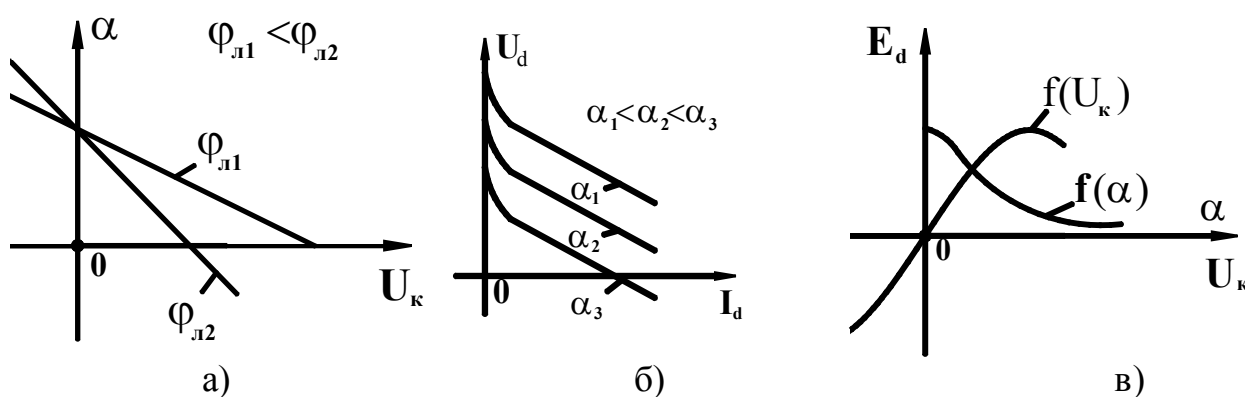


Рис. 2.28. Типові графіки характеристик ТП

У режимі безперервного струму якоря рівняння електричної рівноваги має вигляд:

$$U_d = E + I_a \cdot R_{я} + \Delta U_{тир}, \quad (2.74)$$

де  $U_d = E_{до} \cdot \cos \alpha$  - випрямлена напруга;  $E = K \cdot \Phi \cdot \omega$  - ЕРС двигуна;

$E_{до} = \frac{m}{\pi} \cdot \sqrt{2} \cdot U_{2л} \cdot \sin \frac{\pi}{m} = K_{сх} \cdot U_{2ф}$  - максимальне значення випрямленої ЕРС

при куті керування  $\alpha = 0$  ( $K_{сх}$  - коефіцієнт, значення якого залежать від схеми випрямлення);  $\Delta U_{тир}$  - спад напруги на відкритих тиристорах;  $U_{2ф}$ ,  $U_{2л}$  -

відповідно фазна і лінійна напруги вторинної обмотки узгоджувального трансформатора або мережі;  $R_{я} = r_{оя} + r_{дп} + r_{ко} + r_{др} + r_{тр} + R_{екв}$  - сумарний опір якорного

кола;  $r_{оя}$ ,  $r_{дп}$ ,  $r_{ко}$  - відповідно опір обмотки якоря, додаткових полюсів і компенсаційній;  $r_{тр}$  - зведений до кола випрямленої напруги опір трансформатора;

$R_{екв} = x_{тр} \cdot m / 2 \cdot \pi$  - еквівалентний опір, що враховує зменшення випрямленої напруги внаслідок комутації тиристорів;  $m$  - кількість пульсацій випрямленої напруги за період змінної напруги мережі



(пульсаційність перетворювача);  $m=3$  і  $m=6$  відповідно для трифазної нульової і мостової схем випрямлення;  $x_{тр}$  - індуктивний опір трансформатора.

З урахуванням  $E = K \cdot \Phi \cdot \omega$  вирази для електромеханічної і механічної характеристик мають вигляд:

$$\omega = \frac{E_{do} \cdot \cos\alpha - I_{я} \cdot R_{я} - \Delta U_{тир}}{K \cdot \Phi}; \quad (2.75)$$

$$\omega = \frac{E_{do} \cdot \cos\alpha - \Delta U_{тир}}{K \cdot \Phi} - \frac{M \cdot R_{я}}{(K \cdot \Phi)^2}. \quad (2.76)$$

### 2.6.2. Розрахунок параметрів та характеристик електропривода системи ТП-Д

Мета індивідуального завдання: поглибити теоретичні знання студентів за принципами побудови та властивостей ЕП системи ТП-Д; отримати практичні навички та уміння з методики розрахунку параметрів та побудови графіків характеристик привода системи ТП-Д.

**Постановка задачі.** У склад електропривода системи тиристорний перетворювач-двигун постійного струму входять нереверсивний тиристорний перетворювач з керованим випрямлячем, зібраним за трифазною мостовою схемою, та приводний електродвигун постійного струму з незалежним збудженням.

Відомі наступні номінальні (паспортні) дані приводного електродвигуна (ПЕД): потужність  $P_H = 17$  кВт, напруга  $U_H = 220$  В, струм якоря  $I_H = 82,4$  А, максимальна частота обертання  $n_{max} = 3000$  хв<sup>-1</sup>, момент інерції двигуна  $J_D = 0,3$  кг · м<sup>2</sup>, а також опори обмотки якоря  $r_{оя}$ , додаткових полюсів  $r_{дп}$ , обмотки збудження  $r_{оз}$ , момент інерції робочого механізму  $J_{мх}$ , номінальна частота обертання  $n_H$ , індуктивність обмотки якоря  $L_{оя}$ , значення яких надані у табл. 2.9 для кожного варіанта завдання.

Тиристорний перетворювач приєднується до трансформатора, який живиться від трифазної промислової мережі та має наступні паспортні дані: повна потужність 25 кВА, номінальні лінійні напруги первинної  $U_{1л} = 380$  В та вторинної  $U_{2л} = 209$  В обмоток, струм вторинної обмотки  $I_{2н}$ , напруга  $U_{кз}$  та потужність  $\Delta P_{кз}$  короткого замикання (табл. 2.9). Амплітудне значення косинусоїдної опорної напруги перетворювача  $U_{оп.м} = 10$  В.

Необхідно скласти:

- 1) спрощені функціональну та принципову електричну схеми системи ТП-Д;
- 2) розрахувати параметри системи;
- 3) розрахувати і побудувати графіки зовнішньої характеристики тиристорного перетворювача;

4) розрахувати та побудувати графіки механічної характеристики привода.

Таблиця 2.9

Вихідні дані варіантів завдання

№ варіанта	$r_{о\text{я}}$ , Ом	$r_{дп}$ , Ом	$I_3$ , А	$J_{мх}$ , кг·м <sup>2</sup>	$U_{кз}$ , %	$\Delta P_{кз}$ , Вт	$n_n$ , хв <sup>-1</sup>	$L_{о\text{я}}$ , Гн	$I_{2н}$ , А	Примітка
0	0,125	0,075	3	0,15	4,5	532	750	0,012	52,6	
1	0,15	0,095	3,4	0,24	4,5	545	820	0,016	54,2	
2	0,175	0,105	4,2	0,28	4,8	584	870	0,019	58,2	
3	0,2	0,125	4,8	0,32	5,2	620	900	0,024	62,4	
4	0,225	0,145	5,2	0,36	5,6	744	925	0,027	66,8	
5	0,25	0,165	5,6	0,42	5,2	769	950	0,032	71,4	
6	0,275	0,185	6,2	0,46	5,8	797	985	0,036	74,5	
7	0,3	0,2	6,7	0,52	6,2	812	1000	0,04	78,2	
8	0,325	0,205	7	0,56	6,8	832	1200	0,042	81,2	
9	0,34	0,23	7,2	0,59	7,1	854	1350	0,062	83,4	

**Приклад розв'язання задачі.** За наданими даними та наступними значеннями параметрів:  $r_{о\text{я}} = 0,125$  Ом,  $r_{дп} = 0,08$  Ом,  $I_3 = 4$  А,  $U_{кз} = 4.5$  %,  $\Delta P_{кз} = 541$  Вт,  $n_n = 750$  хв<sup>-1</sup>,  $L_{о\text{я}} = 0,019$  Гн,  $J_{мх} = 0,5 \cdot J_{д}$ ,  $I_{2н} = 62,8$  А.

1. Складання спрощених функціональної та принципової електричної схем неререверсивного тиристорного електропривода.

2. Визначення повного опору фази трансформатора

$$z_{тр} = \frac{U_{2ф} \cdot U_{кз}}{100 \cdot I_{2н}} = \frac{209 \cdot 4,5}{\sqrt{3} \cdot 100 \cdot 62,8} = 0,086 \text{ Ом},$$

де  $U_{2ф} = U_{2л} / \sqrt{3}$  - номінальна фазна напруга вторинної обмотки трансформатора.

3. Розрахунок активного опору фази вторинної обмотки трансформатора

$$r_{тр} = \frac{\Delta P_{кз}}{3 \cdot I_{2н}^2} = \frac{541}{3 \cdot 62,8^2} = 0,046 \text{ Ом}.$$

4. Визначення індуктивного опору та індуктивності фази трансформатора відповідно:

$$x_{\text{тр}} = \sqrt{z_{\text{тр}}^2 - r_{\text{тр}}^2} = \sqrt{0,086^2 - 0,046^2} = 0,073 \text{ Ом};$$

$$L_{\text{тр}} = \frac{x_{\text{тр}}}{2 \cdot \pi \cdot f_M} = \frac{0,073}{2 \cdot 3,14 \cdot 50} = 0,2 \text{ мГн.}$$

5. Розрахунок еквівалентного опору, обумовленого комутацією тиристорів,

$$R_{\text{екв}} = \frac{x_{\text{тр}}}{2 \cdot \pi} \cdot m = \frac{0,073}{2 \cdot 3,14} \cdot 6 = 0,07 \text{ Ом.}$$

6. Визначення повних опору та індуктивності якірного кола відповідно:

$$R_{\text{я}} = r_{\text{оя}} + r_{\text{дп}} + 2 \cdot r_{\text{тр}} + 2 \cdot R_{\text{екв}} = 0,125 + 0,08 + 2 \cdot 0,046 + 2 \cdot 0,07 = 0,436 \text{ Ом};$$

$$L_{\text{я}} = L_{\text{оя}} + 2 \cdot L_{\text{тр}} = 19 \cdot 10^{-3} + 2 \cdot 0,2 \cdot 10^{-3} = 19,4 \text{ мГн.}$$

7. Розрахунок електромагнітної постійної часу кола якоря

$$T_{\text{я}} = \frac{L_{\text{я}}}{R_{\text{я}}} = \frac{19,4 \cdot 10^{-3}}{0,457} = 0,044 \text{ с.}$$

8. Визначення електромеханічної постійної кола якоря

$$T_M = \frac{(J_{\partial} + J_{\text{як}}) \cdot R_{\text{я}}}{(k \cdot \Phi)^2},$$

де  $k$  та  $\Phi$  - конструктивний коефіцієнт та магнітний потік обмотки збудження електродвигуна, а величина  $k \cdot \Phi = C_e$  є коефіцієнт електрорушійної сили двигуна.

Величина цього коефіцієнта визначається із рівняння балансу напруг для кола якоря при номінальному навантаженні згідно з виразом

$$C_e = k \cdot \Phi = \frac{U_H - I_H \cdot (r_{\text{оя}} + r_{\text{дп}})}{\omega_H} = \frac{220 - 78,5 \cdot (0,125 + 0,08)}{78,5} = 2,6 \text{ В} \cdot \text{с},$$

де  $\omega_H$  - номінальна кутова швидкість електродвигуна,

$$\omega_H = \frac{2 \cdot \pi}{60} \cdot n_H = \frac{2 \cdot 3,14}{60} \cdot 750 = 78,5 \text{ с}^{-1}.$$

Тоді електромеханічна постійна дорівнює

$$T_M = \frac{(0,3 + 0,5 \cdot 0,3) \cdot 0,457}{(2,6)^2} = 0,03 \text{ с.}$$

9. Розрахування модуля коефіцієнта жорсткості механічної характеристики приводного двигуна

$$\beta = \frac{(k \cdot \Phi)^2}{R_{\text{я}}} = \frac{2,6^2}{0,457} = 14,8 \frac{(\text{В} \cdot \text{с})^2}{\text{Ом}}.$$

10. Визначення коефіцієнта перетворювання тиристорного перетворювача

$$K_{\text{тп}} = \frac{E_{\text{до}}}{U_{\text{оп.м}}/2} = \frac{k_{\text{сх}} \cdot U_{2\text{ф}}}{10/2} = \frac{2,34 \cdot 209}{5 \cdot \sqrt{3}} = 56,5,$$

де  $E_{\text{до}} = \frac{m}{\pi} \cdot \sqrt{2} \cdot U_{2\text{л}} \cdot \sin \frac{\pi}{m} = k_{\text{сх}} \cdot U_{2\text{ф}}$  - максимальне значення випрямленої ЕРС перетворювача при куті керування  $\alpha = 0$ ;  $k_{\text{сх}}$  - коефіцієнт, значення якого залежить від схеми випрямлення, наприклад  $k_{\text{сх}} = 2,34$  і  $k_{\text{сх}} = 1,17$  - для трифазних мостової і нульової схем випрямлення відповідно.

11. Визначення постійної часу тиристорного перетворювача

$$\tau = \frac{1}{f_M \cdot m} + (0,007 \dots 0,01) = \frac{1}{50 \cdot 6} + (0,007 + 0,01) \text{ с,}$$

де  $f_M$  та  $m$  - частота та кількість пульсації випрямленої напруги за період напруги мережі ( $m = 3$  і  $m = 6$  для трифазних нульової та мостової схем).

12. Розрахунок коефіцієнта перетворювання  $K_d$  та постійної часу  $T_d$  приводного двигуна:

$$K_d = \frac{1}{k \cdot \Phi} = \frac{1}{2,6} = 0,385 (\text{В} \cdot \text{с})^{-1};$$

$$T_d = \sqrt{T_{\text{я}} \cdot T_M} = \sqrt{0,043 \cdot 0,03} = 0,036 \text{ с.}$$

13. Розрахувати та побудувати графіки зовнішньої характеристики тиристорного перетворювача за формулою

$$U_d = E_{\text{до}} \cdot \cos \alpha - \left( r_{\text{тп}} + \frac{x_{\text{тп}}}{2 \cdot \pi / m} \right) \cdot I_d - \Delta U_{\text{тп}} =$$

$$= 283 \cdot \cos \alpha - \left( 0,046 + \frac{0,073}{2 \cdot 3,14/6} \right) \cdot I_d - 1,5,$$

де  $\Delta U_{\text{тп}} = (1 \dots 2) \text{ В}$  - падіння напруги на тиристорах;

$I_d = I_{\text{я}}$  - струм на навантаженні тиристорного перетворювача.

Розрахунки зробити для трьох значень кута  $\alpha = 60, 90, 120$  град. За результатами розрахунків складається табл. 2.10. За даними цієї таблиці будуються графіки зовнішньої характеристики, які наведені на рис. 2.29.

Таблиця 2.10

Розрахункові дані для зовнішніх характеристик

$\alpha \backslash I_d$	$I_d, A$	0	50	100	150	200
$\alpha_1 = 60^\circ$	$E_d, B$	139,65	133,85	128,5	122,2	116,4
$\alpha_2 = 90^\circ$	$E_d, B$	-1,5	-7,3	-13,1	-18,9	-24,7
$\alpha_3 = 120^\circ$	$E_d, B$	-142,65	-148,45	-154,2	-160	-165,8

14. Розрахувати та побудувати графіки механічної характеристики тиристорного електропривода за формулою

$$\omega = \frac{E_{do} \cdot \cos \alpha - \Delta U_{\text{тип}}}{k \cdot \Phi} - \frac{M \cdot R_{\text{я}}}{(k \cdot \Phi)^2} = \frac{283 \cdot \cos \alpha - 1,5}{2,6} - M \cdot \frac{0,457}{(2,6)^2},$$

де  $M$  - обертовий момент на валу приводного двигуна.

Розрахунки зробити для трьох значень кута  $\alpha = 60, 90, 120$  град. За результатами розрахунків складається табл. 2.11. За даними цієї таблиці будуються графіки механічної характеристики електропривода системи ТП - Д, які наведені на рис. 2.30.

Таблиця 2.11

Розрахункові дані для механічних характеристик

$\alpha \backslash M$	$M, H \cdot m$	0	50	100	150	200
$\alpha_1 = 60^\circ$	$\omega, c^{-1}$	53,9	50,5	47,1	43,7	40,3
$\alpha_2 = 90^\circ$	$\omega, c^{-1}$	-0,58	-4	-7,4	-10,8	-14,2
$\alpha_3 = 120^\circ$	$\omega, c^{-1}$	-53,9	-57,3	-60,7	-64,4	-67,5

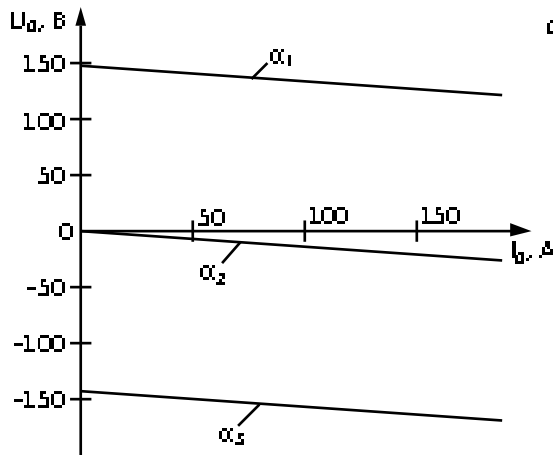


Рис. 2.29. Графік зовнішньої характеристики ТТ

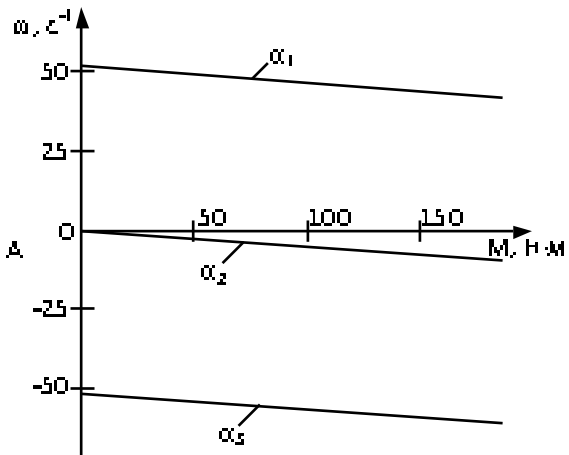


Рис. 2.30. Графік механічної характеристики ДПС

15. Провести аналіз побудованих характеристик та зробити висновки.

### 2.6.3. Контрольні запитання до теми 6

1. Спрощені функціональна та електрична принципова схеми системи ТТ-Д, склад та призначення елементів.
2. Тиристорний перетворювач, класифікація, принцип дії та робота, основні елементи та їх призначення.
3. Основні розрахункові співвідношення для параметрів та показників якості системи ТТ-Д.
4. Основні статичні характеристики керування тиристорного перетворювача, їх графіки та особливості.
5. Електромеханічна та механічна характеристики системи ТТ-Д, їх графіки та особливості.
6. Поняття безперервного та переривчастого режимів роботи тиристорного перетворювача.
7. Основні типові схеми керованих випрямлячів, їх характеристика та робота.
8. Динамічні властивості тиристорного перетворювача.
9. Переваги та недоліки системи ТТ-Д.

## 2.7. Тема 7. Енергетика електропривода

### 2.7.1. Зміст та методичні вказівки до теми 7

**Основні типові теплові режими роботи електроприводів.** Вибір двигуна за потужністю та перевантажувальною здатністю виконується на підставі номінальних даних двигуна, зазначених на щитку, у каталогах та довідниках. Розрахунок потужності та вибір двигуна повинен виконуватися з

урахуванням вимог технологічного процесу та режиму роботи виробничого механізму. Різноманіття реальних режимів роботи робочих машин, які відрізняються величиною і характером зміни навантаження та швидкості протягом циклу, його тривалістю, співвідношенням часу роботи та паузи, зумовлює також різні режими роботи електродвигунів.

Відповідно до міжнародної класифікації передбачається вісім типових номінальних теплових режимів роботи двигунів, що умовно позначені S1...S8, із яких режими S1, S2 та S3 є основними. Основними факторами, на яких ґрунтується ця класифікація, є особливості нагрівання й охолодження двигунів, а також характер зміни навантаження.

**Тривалий номінальний** режим роботи S1 характеризується незмінним навантаженням і тривалою роботою, протягом якої перевищення температури усіх частин двигун досягає усталеного значення, але не перевищує допустимої величини  $\tau_{\text{кдоп}}$ .

**Короткочасний** режим роботи S2 - це такий режим, у якому періоди незмінного навантаження чергуються з паузами. Причому за час роботи  $t$  двигуна перевищення температури не досягає усталеного значення, а під час паузи  $t_0$  двигун встигає охолонути до температури навколишнього середовища. Стандартні (номінальні) значення тривалості роботи складають: 10, 30, 60 і 90 хв.

**Повторно-короткочасний** режим роботи S3 характеризується короткочасними періодами роботи з незмінним навантаженням та паузами. Однак під час роботи температура двигуна не встигає досягти кінцевого перегріву  $\tau_{\text{к}}$ , тобто усталеного значення, а під час паузи двигун не охолоджується до температури навколишнього середовища. При цьому температура двигуна зростає від циклу до циклу, поки не наступить усталений тепловий режим, при якому уся теплота, що виділилася у двигуні, віддається у навколишнє середовище. У результаті цього перевищення температури  $\tau(t)$  коливається щодо середнього значення  $\tau_{\text{сєр}}$ . Кінцевий перегрів або максимальне перевищення температури  $\tau_{\text{к}} = \tau_{\text{мак}}$  незначно відрізняється від середнього значення перегріву  $\tau_{\text{сєр}}$ , коли  $T_{\text{ц}} \ll T_{\text{н}}$  (де  $T_{\text{ц}}$  - час циклу;  $T_{\text{н}}$  - стала часу нагрівання двигуна). Тому найбільше значення часу циклу для режиму S3 не повинно перевищувати 10 хв.

Цей режим роботи ПЕД характеризується відносною тривалістю вмикання (ТВ) у відсотках

$$ТВ\% = \frac{t_p}{t_p + t_0} \cdot 100 = \frac{t_p}{T_{\text{ц}}} \cdot 100, \quad (2.77)$$

де  $t_p, t_0, T_{\text{ц}}$  - час роботи, паузи і циклу відповідно.

Стандартні значення ПВ, за якими розраховуються та серійно випускаються двигуни, складають: 15, 25,40 і 60 % при тривалості циклу  $T_{ц} = 10$  хв.

Для цих режимів виготовляються серійні електричні машини. Стосовно до цих режимів надалі проводиться їх тепловий аналіз і надаються інженерні методи еквівалентування реальних графіків навантаження з метою розрахунку потужності та вибору типу двигунів для усіх практичних випадків.

Крім зазначених основних режимів роботи S1, S2, S3, передбачено ще п'ять, котрі уточнюють основні та спрощують задачу вибору двигуна для довільного графіка навантаження.

**Поняття навантажувальної діаграми електропривода.** Зміна моменту навантаження та швидкості у функції часу характерна для багатьох механізмів, працюючих з деякою періодичністю, які називаються механізмами циклічної дії. Основою для розрахунку потужності ПЕД є навантажувальна діаграма та діаграма швидкості (тахограма) виконавчого органа ВМ.

Під **навантажувальною діаграмою виконавчого органа ВМ** або робочої машини (РМ) розуміється графічне відображення залежності зведеного до валу двигуна статичного моменту  $M_c(t)$  навантаження від часу. Ця діаграма розраховується за технологічними даними та параметрами кінематичного кола привода.

Наприклад, для механізму з обертовим рухом виконавчого органу РМ статичний момент визначається як

$$M_c = \frac{M_{рм}}{i \cdot \eta}, \quad (2.78)$$

де  $M_{рм}$  - момент навантаження, який створює РМ;  $i$  та  $\eta$  - передаточне відношення та ККД механічної передачі відповідно.

**Діаграма швидкості або тахограма** є залежність швидкості лінійного  $V_{вo}(t)$  або обертового  $\omega_{вo}(t)$  руху виконавчого органу від часу. Вона також відображається у виді графіка зведеної до валу двигуна швидкості у часі.

Залежність **електромагнітного обертового моменту двигуна  $M(t)$**  від часу називається навантажувальною діаграмою приводного електродвигуна. Вихідними даними для її побудови є навантажувальна діаграма та тахограма ВО механізму, маси або моменти інерції виконавчого органу та елементів механічної передачі. Навантажувальна діаграма ПЕД будується за допомогою рівняння механічного руху або балансу моментів за формулою

$$M = M_c \pm J \frac{d\omega}{dt} = M_c \pm J \cdot \varepsilon = M_c \pm M_{дин}, \quad (2.79)$$



де  $M_{\text{дин}}$  - динамічний момент, який визначається зведеним сумарним моментом інерції  $J$  та заданим прискоренням  $\varepsilon$  на ділянці розгону (пуску) і сповільненням на ділянці гальмування тахограми  $\omega(t)$ .

Якщо графік швидкості  $\omega(t)$  прийняти на ділянках розгону та гальмуванні лінійними, то динамічний момент на цих ділянках дорівнює відповідно:  $M_{\text{динр}}$  та  $M_{\text{динг}}$ :

$$\left. \begin{aligned} M_{\text{динр}} &= \frac{J \cdot \Delta\omega}{\Delta t} = \frac{J \cdot \omega_{\text{уст}}}{t_p} = \text{Const}; \\ M_{\text{динг}} &= -\frac{J \cdot \omega_{\text{уст}}}{t_r}. \end{aligned} \right\} \quad (2.80)$$

Взагалі навантажувальна діаграма ЕП є графічне відображення залежності основних механічних та електричних його координат від часу, до яких відносяться електромагнітний обертовий момент, струм та потужність приводного двигуна, тобто це є відповідно  $M = M(t)$ ,  $I = I(t)$  та  $P = P(t)$ .

Вони використовуються для оцінки перевантажувальної здатності, перевірки попередньо обраного двигуна на нагрів та відносну тривалість включення. Вони враховують статичні та динамічні навантаження на валі ПЕД протягом роботи механізму. Статичні навантаження визначаються технологічними параметрами, які характеризують роботу ВМ, а динамічні оцінюються інерційними моментами рухомих частин ЕП. На рис. 2.31 наведені приклади навантажувальних діаграм виконавчого органу та двигуна. Перша (рис. 2.31, а) показує, що ВО створює у процесі роботи протягом часу  $t_1$  момент навантаження  $M_{c1}$ , а протягом  $t_2$  - момент  $M_{c2}$ .

З тахограми (рис. 2.31, б) видно, що рух ВО складається із ділянок розгону, (пуску), руху з усталеною швидкістю, гальмування та паузи. Тривалості цих ділянок відповідно  $t_n, t_y, t_r$  та  $t_0$ , а тривалість циклу складає

$$T_{\text{ц}} = t_n + t_y + t_r + t_0 = t_1 + t_2 + t_0. \quad (2.81)$$

За формулою (2.80) розраховується динамічний момент  $M_{\text{дин}}$  для різних ділянок тахограми та будується його графік (рис. 2.31, в). Використовуючи співвідношення (2.79), розраховується та будується графік навантажувальної діаграми ПЕД (рис. 2.31, г).

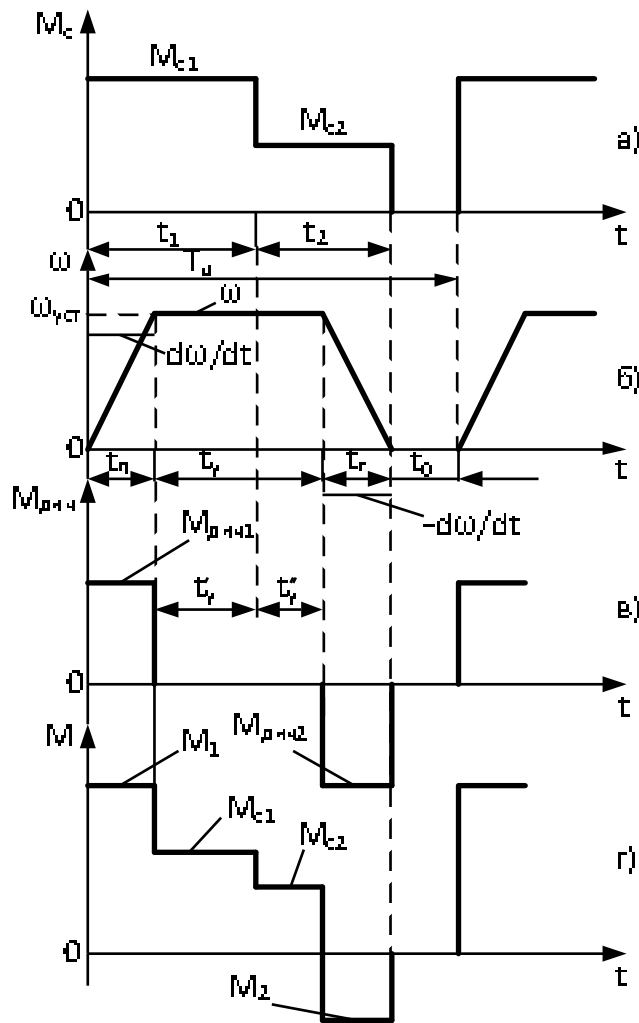


Рис. 2.31. Діаграми для розрахунку потужності двигуна: а - навантажувальна діаграма виконавчого органу ( $M_{c1}$  та  $M_{c2}$  - зведені навантажувальні моменти робочої машини); б - тахограма виконавчого органу; в - графік динамічного моменту; г - навантажувальна діаграма двигуна.

Як правило, типова навантажувальна діаграма механізму вимагає побудови тахограми  $\omega(t)$ , графіків прискорення та сповільнення  $\pm d\omega/dt$  і ривка  $d^2\omega/dt^2$ . З іншого боку, при невеликій зміні швидкості величиною  $d\omega/dt$  нехтують. Тоді навантажувальна діаграма двигуна співпадає з навантажувальною діаграмою механізму.

**Методика побудови навантажувальної діаграми та вибір приводного двигуна.** Електродвигун є основним елементом привода, тому правильний розрахунок потужності та вибір ПЕД гарантує нормальну роботу механізму та забезпечує необхідні техніко-економічні показники технологічного процесу.

Таким чином, потужність ПЕД повинна відповідати розрахунковому навантаженню. Крім необхідної потужності правильний вибір ПЕД здійснюється з урахуванням наступних факторів та умов:

- за родом струму та режимом роботи;

- за конструктивним виконанням, тобто за ступенем захисту (захищений, закритий, вибухозахищений);
- за засобом охолодження (самовентильований, з природним охолодженням, з примусовою вентиляцією) та кліматичним виконанням;
- за швидкістю, вибір якої за наявності редуктора визначається заданою швидкістю ВО робочої машини та передаточним числом редуктора.

Для проєктованого ЕП вибір номінальних швидкості двигуна і передаточного числа редуктора повинен вирішуватися шляхом техніко-економічного порівняння декількох варіантів привода. Для приводів з напруженими динамічними режимами правильний вибір цих параметрів дозволяє підвищити економічну ефективність електромеханічної системи.

Вибір електродвигуна виконується частіше у такій послідовності:

- на основі навантажувальної діаграми робочої машини  $M_{pm} = f(t)$  та діаграми швидкості (тахограми)  $\omega_{pm} = f(t)$  виконується попередній вибір двигуна;

- перевіряється попередньо обраний двигун на нагрівання;
- перевіряється двигун на перевантажувальну здатність.

Якщо обраний двигун не відповідає одній з цих умов перевірки, то береться двигун більшої потужності й розрахунок повторюється. Порядок розрахунку потужності попереднього вибору та перевірки ПЕД розглянемо на прикладі діаграм, які наведені на рис. 2.31, а та б.

На першому етапі визначається орієнтовано розрахунковий момент двигуна за формулою

$$M_{розр} \geq k_3 \cdot M_{ce}, \quad (2.82)$$

де  $k_3$  - коефіцієнт запасу, який враховує динамічні режими двигуна при роботі з підвищеними струмами та моментами;  $M_{ce}$  - еквівалентний статичний момент навантаження.

Якщо момент навантаження  $M_c$  змінюється у часі та навантажувальна діаграма механізму має декілька ділянок, як наведено на рис. 2.31, а, тоді момент  $M_{ce}$  визначається як середньоквадратична величина

$$M_{ce} = \sqrt{\sum_{i=1}^n (M_{ci}^2 \cdot t_i) / T_{ц}}, \quad (2.83)$$

де  $M_{ci}$  та  $t_i$  відповідно момент та тривалість  $i$ -ої ділянки навантажувальної діаграми ( $i = \overline{1, n}$ );  $n$  - кількість ділянок циклу роботи механізму.

Для регульованого електропривода визначається розрахункова швидкість виконавчого органу. Як правило, за розрахункову приймається швидкість ВО в усталеному режимі, тобто  $\omega_{розр} = \omega_{уст}$  (рис. 2.31, б).

На другому етапі визначається розрахункова потужність двигуна як

$$P_{\text{розр}} = M_{\text{розр}} \cdot \omega_{\text{розр}} = k_3 \cdot M_{\text{се}} \cdot \omega_{\text{уст}} \quad (2.84)$$

Згідно з каталогом за значеннями розрахункових потужності, швидкості та з урахуванням вищевказаних факторів і умов обирається приводний двигун, який повинен відповідати параметром живлячої мережі та силових перетворювачів, до яких він вмикається.

Далі обраний двигун перевіряється на перевантажувальну здатність, для чого використовується навантажувальна діаграма двигуна (рис. 2,31,г). З діаграми обирається максимальний момент (у нашому випадку  $M_{\text{max}_{\text{дг}}} = M_{1_{\text{дг}}}$ ) та порівнюється з максимально допустимим моментом двигуна  $M_{\text{max}_{\text{дв}}}$ , при цьому повинно виконуватися співвідношення

$$M_{\text{max}_{\text{дв}}} \geq M_{1_{\text{дг}}} = M_{\text{max}_{\text{дг}}} \quad (2.85)$$

Якщо співвідношення (2.85) виконується, то ПЕД забезпечує задане прискорення на ділянці розгону; якщо ні - графік руху на цій ділянці буде відрізнятись від заданого. У цьому випадку необхідно обирати інший більш потужний двигун та повторити перевірку на перевантаження.

Для двигунів постійного струму та синхронних величина моменту  $M_{\text{max}} = M_{\text{доп}} = (1,5 \dots 2,5) \cdot M_{\text{ном}}$ , а для асинхронних двигунів цей момент дорівнює критичному, тобто  $M_{\text{max}} = M_{\text{кр}}$ .

Обраний двигун може перевірятися за умовами пуску шляхом порівняння його пускового моменту  $M_{\text{п}}$  з моментом, обумовленим навантаженням при пуску  $M_{\text{сп}}$ , тобто

$$M_{\text{п}} \geq M_{\text{сп}} \quad (2.86)$$

У даному випадку як момент навантаження при пуску обирається момент  $M_{\text{сп}} = M_{\text{с1}}$ .

Таким чином, навантажувальна діаграма електроприводу характеризує залежність моменту двигуна, струму або потужності у функції часу за цикл роботи виробничого механізму. Вихідними даними для побудови навантажувальної діаграми двигуна є навантажувальна діаграма робочого механізму  $M_{\text{рм}} = f(t)$  швидкості (тахограма)  $\omega_{\text{рм}} = f(t)$ . Вони повинні бути задані або зазначені параметрами та умовами технологічного процесу, що дозволяють побудувати ці діаграми.

Навантажувальна діаграма робочої машини може мати будь-який вигляд. Однак РМ та ЕП, які працюють у повторно-короткочасному режимі, мають інтервал часу (цикл)  $T_{\text{ц}}$ , через який сукупність технологічних операцій повторюється. Якщо характер дії робочої машини такий, що режими роботи не повторюються (ліфт, підйомний кран та ін.), будують навантажувальні діаграми для найбільш імовірного чи важкого циклу. Навантажувальна діаграма двигуна враховує як статичні, так і динамічні навантаження у перехідних режимах, що

долаються електроприводом протягом циклу роботи механізму, будується на підставі рівняння руху (2.79).

### 2.7.2. Розрахунок та побудова навантажувальної діаграми і вибір ПЕД

Мета індивідуального завдання: поглибити знання студентів про методику розрахунку потужності та вибору ПЕД з використанням навантажувальної діаграми; отримати практичні навички та уміння з розрахунку та побудови навантажувальної діаграми на прикладі ЕП механізму мостового крана.

**Постановка задачі.** Згідно з вихідними даними варіанта завдання та навантажувальною діаграмою та тахограмою механізму пересування мостового крана, які наведені на рис. 2.32:

- 1) розрахувати навантажувальну діаграму ПЕД механізму мостового крана;
- 2) побудувати графік навантажувальної діаграми ПЕД;
- 3) розрахувати потужність та вибрати ДПС незалежного збудження для механізму пересування мостового крана.

Вихідні дані варіантів завдання наведено у табл. 2.12, де  $S$  - відстань пересування вантажу,  $V$  та  $a$  - лінійні швидкість в усталеному режимі та прискорення (сповільнення) пересування,  $a_{\text{доп}}$  - допустиме значення прискорення (сповільнення),  $i$  - передаточне відношення редуктора,  $D$  - діаметр ходових коліс мостового крана,  $\eta$  - ККД передаточного пристрою механізму,  $M_{\text{рм1}}$  та  $M_{\text{рм2}}$  - моменти статичного опору на валу РМ при русі з вантажем та без вантажу,  $J_1$  та  $J_2$  - зведені моменти інерції механізму при русі з вантажем та без, час пауз  $t_{01}$  та  $t_{02}$ .

Таблиця 2.12

Вихідні дані для варіантів завдання

№ варіанта	$S$ , м	$a_{\text{доп}}$ , м/с <sup>2</sup>	$i$	$D_{\text{к}}$ , м	$\eta$	$M_{\text{рм1}}$ , Н·м	$M_{\text{рм2}}$ , Н·м	$J_{1,2}$ , кг·м <sup>2</sup>	$J_{2,2}$ , кг·м <sup>2</sup>	$t_{01} = t_{02}$ , с	$V$ , м/с	Примітка
1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13
0	20	0,2	15	0,6	0,75	2500	1500	17	10	40	1	
1	21	0,25	15	0,6	0,76	2600	1600	18	11	45	1,1	
2	22	0,3	15	0,6	0,77	2700	1700	19	12	50	1,2	
3	23	0,35	15	0,6	0,78	2800	1800	20	13	55	1,3	
4	24	0,4	15	0,6	0,79	2800	1900	21	14	60	1,4	
5	25	0,2	15	0,6	0,8	3000	2000	22	15	40	1,5	
6	26	0,25	15	0,6	0,81	3100	2100	23	16	45	1,6	
7	27	0,3	15	0,6	0,82	3200	2200	24	17	50	1,7	
8	28	0,35	15	0,6	0,83	3300	2300	25	18	55	1,8	
9	30	0,4	15	0,6	0,84	3400	2400	26	19	60	1,9	

**Приклад задачі за темою.** Відомі наступні дані механізму пересування мостового крану, працюючого у повторно-короткочасному режимі і цикл роботи якого включає: переміщення крану з вантажем та без вантажу на задану відстань з урахуванням пуску та гальмування ПЕД та визначеними паузами відповідно навантажувальної діаграми механізму:  $S = 20$  м;  $V = 1,5$  м/с;  $a_{\text{доп}} = \pm 0,3$  м/с<sup>2</sup>;  $i = 15$ ;  $D_k = 0,6$  м;  $\eta = 0,8$ ;  $M_{\text{рм1}} = 3000$  Н·м;  $M_{\text{рм2}} = 2200$  Н·м;  $J_1 = 22$  кг·м<sup>2</sup>;  $J_2 = 16,9$  кг·м<sup>2</sup>;  $t_{01} = t_{02} = 60$  с.

Необхідно: розрахувати та побудувати графік навантажувальної діаграми, розрахувати потужність та вибрати ПЕД механізму мостового крану.

**Розв'язання задачі.**

1. Час пуску і гальмування

$$t_{\text{п}} = t_{\text{г}} = V_{\text{рм}}/a_{\text{доп}} = 1,5/0,3 = 5 \text{ с.}$$

2. Шлях, пройдений за час пуску і гальмування

$$S_{\text{п}} = S_{\text{г}} = \frac{a_{\text{доп}} \cdot t_{\text{п}}^2}{2} = \frac{0,3 \cdot 5^2}{2} = 3,75 \text{ м.}$$

3. Шлях, пройдений з усталеною швидкістю

$$S_{\text{у}} = S - 2 \cdot S_{\text{п}} = 20 - 2 \cdot 3,75 = 12,5 \text{ м.}$$

4. Час руху з усталеною швидкістю

$$t_{\text{у}} = S_{\text{у}}/V_{\text{рм}} = 12,5/1,5 = 8,4 \text{ с.}$$

5. Допустиме кутове прискорення ПЕД

$$\varepsilon_{\text{доп}} = a_{\text{доп}}/\rho = 0,3/0,02 = 15 \text{ рад/с}^2,$$

де  $\rho = \frac{D_k}{2 \cdot i} = \frac{0,6}{2 \cdot 15} = 0,02$  м – радіус зведення.

6. Момент опору, зведений до валу двигуна при русі відповідно з вантажем і без вантажу:

$$M_{\text{с1}} = \frac{M_{\text{рм1}}}{i \cdot \eta} = \frac{3000}{15 \cdot 0,8} = 250 \text{ Н} \cdot \text{м};$$

$$M_{\text{с2}} = \frac{M_{\text{рм2}}}{i \cdot \eta} = \frac{2200}{15 \cdot 0,8} = 183 \text{ Н} \cdot \text{м.}$$

7. Динамічні моменти відповідно при русі з вантажем і без вантажу:

$$M_{\text{дин1}} = J_1 \cdot \varepsilon_{\text{доп}} = 22 \cdot 15 = 330 \text{ Н} \cdot \text{м};$$

$$M_{\text{дин2}} = J_2 \cdot \varepsilon_{\text{доп}} = 16,9 \cdot 15 = 253,5 \text{ Н} \cdot \text{м}.$$

8. Момент двигуна при пуску та гальмуванні при русі з вантажем:

$$M_{\text{п1}} = M_{\text{с1}} + M_{\text{дин1}} = 250 + 330 = 580 \text{ Н} \cdot \text{м};$$

$$M_{\text{г1}} = M_{\text{с1}} - M_{\text{дин1}} = 250 - 330 = -80 \text{ Н} \cdot \text{м}.$$

9. Момент двигуна при пуску й гальмуванні при русі без вантажу:

$$M_{\text{п2}} = M_{\text{с2}} + M_{\text{дин2}} = 183 + 253,5 = 436,5 \text{ Н} \cdot \text{м};$$

$$M_{\text{г2}} = M_{\text{с2}} - M_{\text{дин2}} = 183 - 253,5 = -70,5 \text{ Н} \cdot \text{м}.$$

На підставі отриманих даних будується навантажувальна діаграма двигуна шляхом графічного сумування ординат складових моментів за час пуску усталеного руху та гальмування ПЕД (рис. 2.32).

Для розрахунку потужності та вибору ПЕД використовується навантажувальна діаграма механізму мостового крану (рис. 2.32 а). Для чого необхідно визначити.

Час роботи механізму пересування

$$t_{\text{п}} + t_{\text{г}} + t_{\text{р}} = t_{\text{роб1}} = t_{\text{роб2}} = 5 + 8,4 + 5 = 18,4 \text{ с}.$$

Відносна тривалість вмикання механізму та його ПЕД

$$T_{\text{В}}\% = \frac{t_{\text{роб1}} + t_{\text{роб2}}}{T_{\text{ц}}} 100 = \frac{18,4 + 18,4}{156,8} 100 = 23,2 \%,$$

де  $T_{\text{ц}} = t_{\text{роб1}} + t_{\text{роб2}} + t_{01} + t_{02} = 18,4 + 18,4 + 60 + 60 = 156,8 \text{ с}$  - час циклу роботи.

Зведе значення еквівалентного моменту навантаження до стандартного (номінального) значення  $P_{\text{Вн}} = 25\%$

$$M_{\text{рм.пр}} = \sqrt{\frac{M_{\text{рм1}}^2 \cdot t_{\text{роб1}} + M_{\text{рм2}}^2 \cdot t_{\text{роб2}}}{t_{\text{роб1}} + t_{\text{роб2}}}} \cdot \sqrt{\frac{P_{\text{В}}}{P_{\text{Вн}}}} =$$

$$= \sqrt{\frac{3000^2 \cdot 18,4 + 2200^2 \cdot 18,4}{18,4 + 18,4}} \cdot \sqrt{\frac{23,2}{25}} = 2534 \text{ Н} \cdot \text{м}.$$

Розрахункова потужність двигуна

$$P_{\text{роз}} = \frac{K_3 \cdot M_{\text{рм.пр}} \cdot \omega_{\text{рм}}}{\eta} = \frac{1,3 \cdot 2534 \cdot 5}{0,8} = 25,9 \cdot 10^3 \text{ Вт} = 20,59 \text{ кВт},$$

де  $\omega_{\text{рм}} = 2V/D_k = 2 \cdot 1,5/0,6 = 5 \text{ рад/с}$  – кутова швидкість механізму.

Необхідна номінальна швидкість двигуна

$$\omega_{\text{н}} = \frac{V}{\rho} = \frac{1,5}{0,02} = 75 \frac{\text{рад}}{\text{с}}.$$

Вибираємо за каталогом двигун типу ДП-42 з номінальними даними:  
 $U_{\text{н}} = 220 \text{ В}$ ;  $P_{\text{н}} = 21 \text{ кВт}$  при  $\text{ПВ}_{\text{н}} = 25\%$ ,  $n_{\text{н}} = 660 \frac{\text{об}}{\text{хв}}$ ;  $J_{\text{дв}} = 1,0 \text{ кг} \cdot \text{м}^2$  тощо.

Далі здійснюється перевірка обраного ПЕД на перевантажувальну здатність з моменту, для чого необхідно визначити наступні величини.

Зведені моменти інерції системи при русі з вантажем та без вантажу:

$$J_{\Sigma 1} = K \cdot J_{\text{дв}} + J_1 = 1,2 \cdot 1,0 + 22 = 23,2 \text{ кг} \cdot \text{м}^2;$$

$$J_{\Sigma 2} = K \cdot J_{\text{дв}} + J_2 = 1,2 \cdot 1,0 + 16,9 = 18,1 \text{ кг} \cdot \text{м}^2,$$

де  $K = 1,2$  - коефіцієнт, що враховує моменти інерції сполучних муфт і гальмових шківів приводу.

Динамічні моменти при пуску і гальмуванні відповідно при русі з вантажем і без вантажу:

$$M_{\text{дин1}} = J_{\Sigma 1} \cdot \varepsilon_{\text{доп}} = 23,2 \cdot 15 = 348 \text{ Н} \cdot \text{м};$$

$$M_{\text{дин2}} = J_{\Sigma 2} \cdot \varepsilon_{\text{доп}} = 18,1 \cdot 15 = 271,5 \text{ Н} \cdot \text{м}.$$

Необхідний момент двигуна при пуску і гальмуванні:

- при русі з вантажем

$$M_{\text{п1}} = M_{\text{с1}} + M_{\text{дин1}} = 250 + 348 = 598 \text{ Н} \cdot \text{м};$$

$$M_{\text{г1}} = M_{\text{с1}} - M_{\text{дин1}} = 250 - 348 = -98 \text{ Н} \cdot \text{м}.$$

- при русі без вантажу

$$M_{\text{п2}} = M_{\text{с2}} + M_{\text{дин2}} = 183 + 271,5 = 454,5 \text{ Н} \cdot \text{м};$$

$$M_{\text{г2}} = M_{\text{с2}} - M_{\text{дин2}} = 183 - 271,5 = -88,5 \text{ Н} \cdot \text{м}.$$



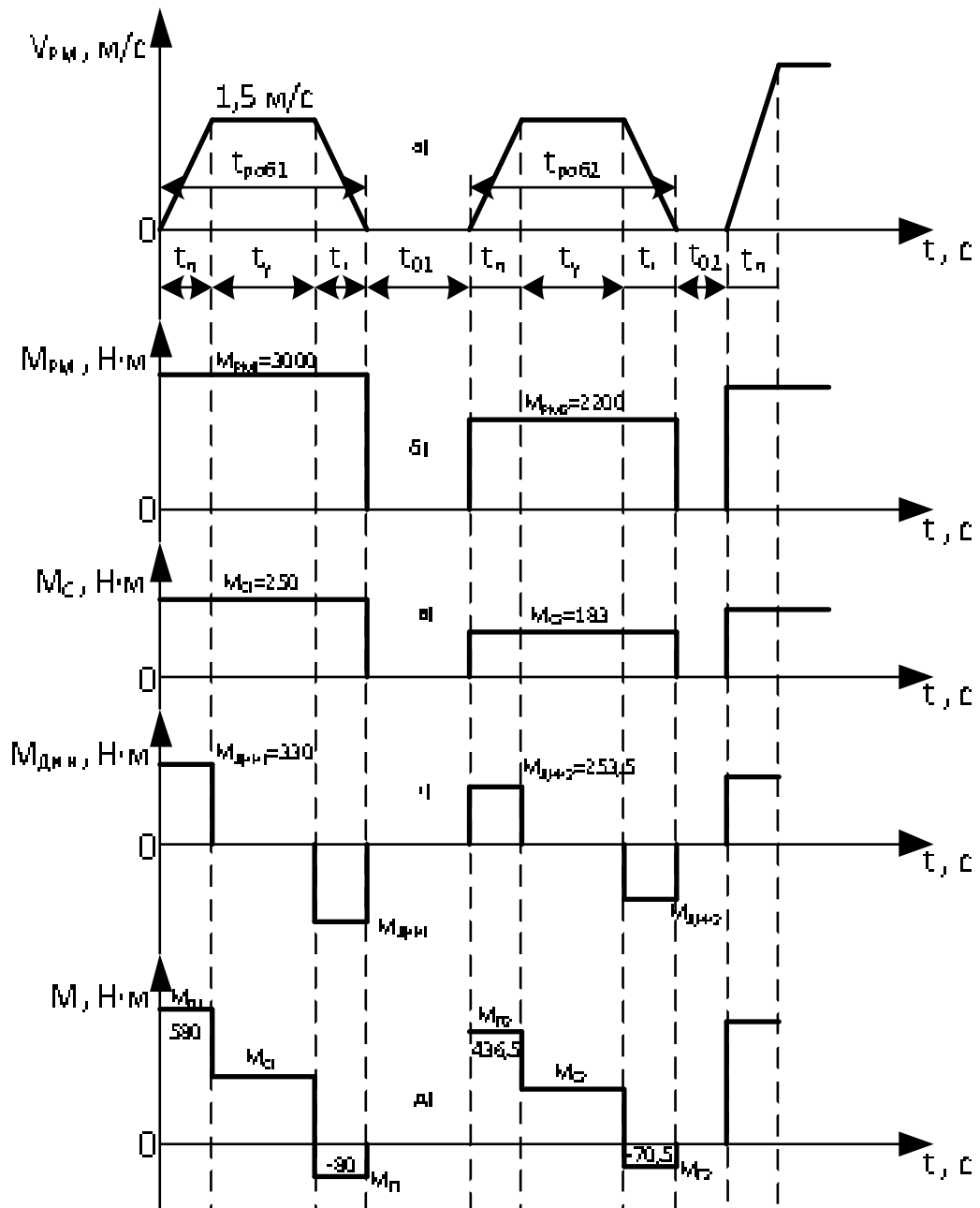


Рис. 2.32. Навантажувальна діаграма механізму пересування та ПЕД

Еквівалентний момент двигуна, зведений до номінального ПВ<sub>н</sub>

$$\begin{aligned}
 M_{\text{екв}} &= \sqrt{\frac{M_{\text{П1}}^2 \cdot t_{\text{п}} + M_{\text{Г1}}^2 \cdot t_{\text{Г}} + M_{\text{П2}}^2 \cdot t_{\text{п}} + M_{\text{Г2}}^2 \cdot t_{\text{Г}}}{t_{\text{роб1}} + t_{\text{роб2}}}} \cdot \sqrt{\frac{\text{ПВ}}{\text{ПВ}_{\text{н}}}} = \\
 &= \sqrt{\frac{598^2 \cdot 5 + 250^2 \cdot 8,4 + 98^2 \cdot 5 + 454,5^2 \cdot 5 + 183^2 \cdot 8,4 + 88,5^2 \cdot 5}{18,4 + 18,4}} \cdot \sqrt{\frac{23,2}{25}} \\
 &= 302,3 \text{ Н} \cdot \text{м}.
 \end{aligned}$$

Номінальний момент двигуна

$$M_H = 9550 \cdot \frac{P_H}{n_H} = 9550 \cdot \frac{21}{660} = 303,9 \text{ Н} \cdot \text{м}.$$

Оскільки  $M_H > M_{\text{екв}}$ , то двигун підходить за нагріванням.

Допустимий момент двигуна  $M_{\text{доп}} = (2 \dots 2,5)M_H$  більше знайденого максимального значення при пуску  $M_{H1} = 598 \text{ Н} \cdot \text{м}$ . Отже, обраний двигун задовольняє так само вимогам перевантажувальної здатності.

### 2.7.3. Контрольні запитання до теми 7

1. Типові теплові режими роботи приводних двигунів, їх характеристика.
2. Поняття навантажувальної діаграми та тахограми і тривалості циклу роботи ПЕД.
3. Відносна тривалість ПЕД, як визначається та стандартні значення.
4. Методика розрахунку навантажувальної діаграми ПЕД.
5. Методика побудови графіку навантажувальної діаграми ПЕД.
6. Сутність розрахунку потужності ПЕД методами середніх втрат та еквівалентних величин (потужності, струму та моменту).
7. Основні етапи розрахунку потужності та вибору ПЕД.
8. Сутність перевірки обраного ПЕД за умовами нагрівання, перевантажувальної здатності тощо.
9. Особливості розрахунку динамічного моменту ПЕД у режимах пуску та гальмування.
10. Основні енергетичні показники електроприводів, напрямки та методи їх підвищення.

## 2.8. Тема 8. Перехідні процеси в електроприводах

### 2.8.1. Зміст та методичні вказівки до теми 8

Неусталеними або перехідними називаються процеси, що виникають в електроприводі при його переході з одного усталеного стану до іншого в результаті різних збурюючих та керуючих впливів, створюваних робочою машиною, системою керування та джерелом живлення. Такий режим роботи ЕП супроводжується зміною запасу енергії в елементах системи. Якщо при цьому відбувається накопичування або віддача запасеної енергії, то перехідний процес протікає за аперіодичним законом. Коли відбувається обмін енергією між елементами системи, то перехідний процес має коливальний характер.

Можна назвати такі основні причини виникнення перехідних процесів:

- зміна навантаження  $M_c$  на валу двигуна;
- зміна моменту двигуна при переході його з однієї характеристики на іншу при пуску, гальмуванні, реверсуванні та регулюванні швидкості;

- зміна параметрів приводу;
- коливання напруги живлення тощо.

Перехід з одного усталеного стану до іншого внаслідок наявності різного роду інерційностей відбувається не миттєво, а у часі. При цьому змінюються у часі механічні (швидкість, прискорення кутове переміщення), так і електричні величини (струм, ЕРС та ін.).

Для більшості відповідальних виробничих механізмів металургійних цехів (прокатні стани, мостові крани та ін.) перехідні процеси здобувають винятково важливе значення, тому що частота і тривалість їх протікання впливає на продуктивність виробництва. Якість виконання багатьох технологічних операцій визначається також перехідними процесами (механічна обробка деталей на верстатах, підйомні установки, точна зупинка приводів, що стежать, та ін.). Крім того, механічні й електричні навантаження в більшості випадків визначаються перехідними процесами. Усе це зумовлює необхідність аналізу перехідних процесів у електроприводі.

Правильно вибраний та розрахований електропривод разом з САК повинен забезпечити не тільки необхідну точність регулювання координат, але й якісне протікання перехідних процесів без небезпечних динамічних навантажень та недопустимого перерегулювання. Характер протікання й тривалість перехідних процесів багато в чому залежать від різного роду інерційностей в електромеханічній системі, до яких відносяться:

- механічна інерційність рухомих частин електроприводу;
- електромагнітна інерційність, зумовлена індуктивністю обмоток електричних машин і апаратів;
- теплова інерційність електричних машин.

Кожна з зазначених інерційностей враховується відповідними постійними (сталими) часу, які мають розмірність часу. Сталі часу є основними параметрами перехідних процесів і дозволяють дати їм кількісну оцінку. Перехідні процеси, що зумовлені тільки одним видом інерційності – механічною, електромагнітною або тепловою, називаються відповідно механічними, електромагнітними й тепловими перехідними процесами. Перехідні процеси, у яких одночасно враховується механічна й електромагнітна інерційність, називаються електромеханічними перехідними процесами.

Фізичні явища, що відбуваються в АЕП у перехідних режимах, відрізняються великою складністю. Їх математичний опис приводить до нелінійних диференціальних рівнянь, розв'язання яких можливе лише при використанні математичного моделювання.

Для електроприводів з лінійними механічними характеристиками у результаті розв'язання стаціонарних лінійних диференціальних рівнянь, які описують процеси у них, отримують вирази для моменту, струму якоря та кутової швидкості як функції часу у наступному вигляді:

$$M = M_c(1 - e^{-t/T_M}) + M_{\text{поч}} \cdot e^{-t/T_M}; \quad (2.87)$$

$$I_{я} = I_c(1 - e^{-t/T_M}) + I_{поч} \cdot e^{-t/T_M}; \quad (2.88)$$

$$\omega = \omega_c(1 - e^{-t/T_M}) + \omega_{поч} \cdot e^{-t/T_M}; \quad (2.89)$$

де  $M_{поч}$ ,  $I_{поч}$  та  $\omega_{поч}$  – початкові значення відповідних величин у початковий момент часу, тобто  $t = 0$ ;  $M_c$ ,  $I_c$  та  $\omega_c$  – усталені значення відповідних величин, обумовлених навантаженням;  $T_M$  – електромеханічна постійна часу.

З даних випливає, що момент, струм якоря та швидкість двигуна в перехідних режимах змінюються за одним експоненціальним законом. Причому теоретично тривалість перехідного процесу дорівнює нескінченності. Однак практично можна вважати, що перехідний процес закінчується за час  $t_{пп} = (3 \dots 4)T_M$ . При цьому при  $t = 3T_M$  поточне значення відрізняється від кінцевого тільки на 5%, а при  $t = 4T_M$  – на 2%.

Наведені вирази дозволяють розрахувати різні перехідні процеси в електроприводах з двигунами постійного струму (пуск, гальмування, реверс, накидання та скидання навантаження тощо). У кожному конкретному випадку необхідно визначати електромеханічну постійну, а також початкові та кінцеві значення моменту, струму та швидкості. При постійному навантаженні  $M_c = const$ :

$$T_M = J/\beta = J \cdot \Delta\omega/\Delta M, \quad \omega_c = \omega_{уст} = \omega_0 - M_c/\beta; \quad (2.90)$$

- для ЕП постійного струму

$$T_M = J \cdot \omega_0/M_{кз}, \quad (2.91)$$

- для асинхронного ЕП

$$T_M = J \cdot \omega_0 \cdot S_H/M_H. \quad (2.92)$$

Таким чином, для аналізу та розрахунку перехідних процесів потрібно знати постійну часу  $T_M$ , котра являє собою час, протягом якого швидкість двигуна досягає свого усталеного значення під дією незмінного моменту, що дорівнює пусковому.

Розглянемо перехідні процеси на прикладі пуску ДПС незалежного збудження за допомогою одноступінчастого реостата з опором  $R_d$ .

Перехідні процеси в цьому випадку описуються наведеними вище рівняннями, в які необхідно лише підставити початкові та кінцеві значення змінних, що відповідають даному режиму. Ці значення визначаються аналітично за допомогою рівняння або графіка (рис 2.33, а) механічної характеристики.

Згідно з рис. 2.33, а початкові значення змінних:  $M_{поч} = M_{п}$ ,  $\omega_{поч} = 0$ . Кінцеві усталені значення  $\omega_c = \omega_{c1}$ ,  $M_c = M_{c1}$ .

З урахуванням цих значень рівняння (2.87) та (2.89) набувають вигляду:

$$\left. \begin{aligned} M &= M_{c1} (1 - e^{-t/T_M}) + M_{поч} \cdot e^{-t/T_M}; \\ & \end{aligned} \right\}$$

(2.93)

$$\omega = \omega_{c1} (1 - e^{-t/T_M}),$$

де  $T_M = \frac{J(R_a + R_d)}{(k\Phi)^2}$  – електромеханічна постійна часу.

Криві перехідних процесів за моментом та швидкістю наведені на рис. 2.33, б.

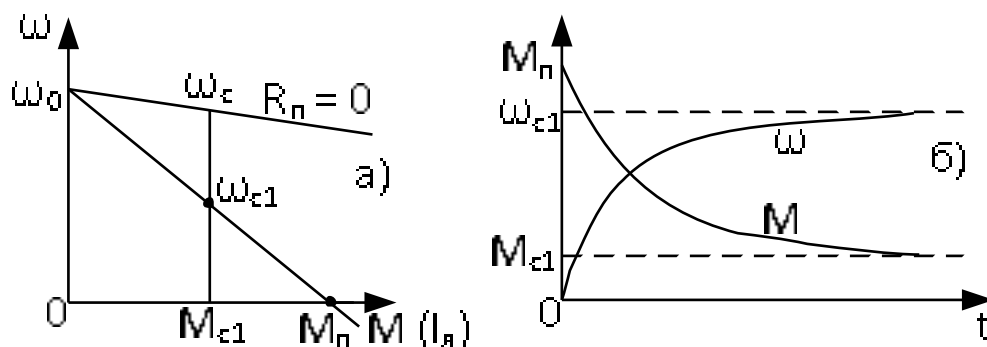


Рис. 2.33. Механічні характеристики (а) та криві перехідного процесу (б) при пуску ДПС в одну ступінь

Розглянемо перехідні процеси в ЕП постійного струму з лінійними механічними характеристиками при ступінчастому пуску за допомогою реостата з числом ступенів  $m = 3$  згідно з пусковими характеристиками (рис. 2.34).

При ступінчастому пуску момент двигуна на кожному ступені змінюється в заздалегідь обраних межах від пускового моменту  $M_1$  до моменту перемикання  $M_2$ . Тому розрахунок перехідних процесів потрібно робити для кожного ступеня, використовуючи раніше отримані вирази (2.87) та (2.89), що для  $i$  – го ступеня мають вигляд:

$$\left. \begin{aligned} M_i &= M_c (1 - e^{-t/T_{Mi}}) + M_1 \cdot e^{-t/T_{Mi}}, \\ \omega_i &= \omega_{ci} (1 - e^{-t/T_{Mi}}) + \omega_{поч} \cdot e^{-t/T_{Mi}}. \end{aligned} \right\} \quad (2.94)$$

Для визначення початкових і усталених (кінцевих) значень змінних зручно користуватися пусковими характеристиками (рис. 2.34).

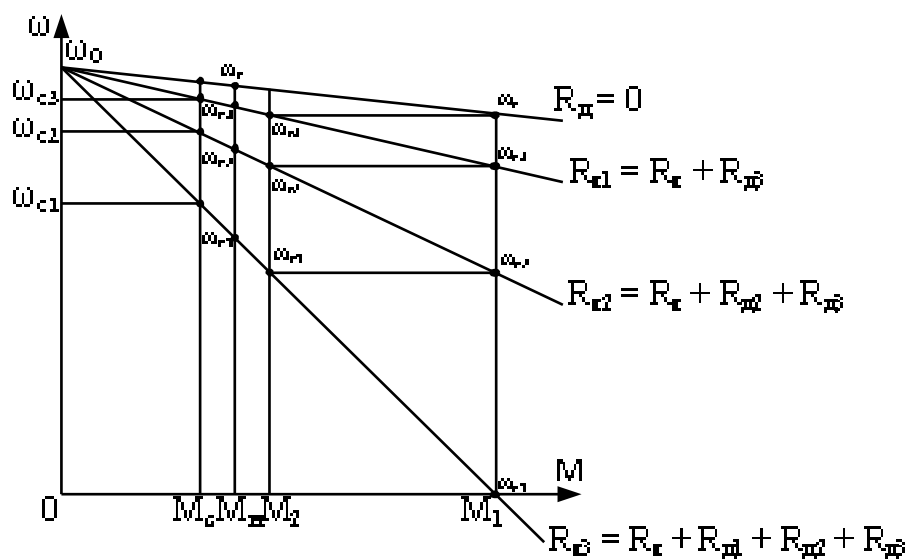


Рис. 2.34. Механічні характеристики при ступінчастому пуску ЕП

З урахуванням позначень, прийнятих на рис. 2.34, маємо для першого ступеня

$$\left. \begin{aligned} M_1 &= M_c (1 - e^{-t/T_{M1}}) + M_1 \cdot e^{-t/T_{M1}}; \\ \omega_1 &= \omega_{c1} (1 - e^{-t/T_{M1}}), \end{aligned} \right\} \quad (2.95)$$

де  $T_{M1} = \frac{J R_{я3}}{(k\Phi)^2}$  та  $T_{M1} = \frac{J(\omega_0 - \omega_{H1})}{M_H}$  - відповідно електромеханічна стала часу для приводу ДПС незалежного збудження та АД з фазним ротором при пуску на першому ступеню.

Для визначення часу перехідного процесу на першому ступені необхідно в перше рівняння (2.95) підставити  $t = t_{пп1}$ . При цьому момент двигуна повинен дорівнювати моменту перемикавання  $M_2$ , і зазначене рівняння набуває вигляду

$$M_2 = M_c (1 - e^{-t_{пп1}/T_{M1}}) + M_1 \cdot e^{-t_{пп1}/T_{M1}},$$

звідки час перехідного процесу на першому ступеню

$$t_{пп1} = T_{M1} \ln \frac{M_1 - M_c}{M_2 - M_c}. \quad (2.96)$$

Аналогічно для будь-якого ступеня

$$t_{ппi} = T_{Mi} \ln \frac{M_1 - M_c}{M_2 - M_c}. \quad (2.97)$$

Час перехідного процесу на природній характеристиці, як уже зазначалося вище,  $t_{\text{пп. пр}} = (3 \dots 4)T_M$ , де  $T_M = \frac{JR_{я}}{(k\Phi)^2}$  або  $T_M = \frac{J\omega_0 S_H}{M_H}$  - сталі часу на природних характеристиках ДПС та АД.

Сумарний час перехідного процесу при пуску у три ступені визначається як

$$t_{\text{пп}} = (T_{M1} + T_{M2} + T_{M3}) \ln \frac{M_1 - M_c}{M_2 - M_c} + (3 \dots 4)T_M. \quad (2.98)$$

При переході з одного ступеня на інший кінцева швидкість першого ступеня буде початковою для другого, а значення моментів перемикавання  $M_1$  та  $M_2$  залишаються однаковими для всіх ступенів. Тому для другого ступеня рівняння моменту і швидкості набувають вигляду:

$$M_{II} = M_c(1 - e^{-t/T_{M2}}) + M_1 \cdot e^{-t/T_{M2}}; \quad (2.99)$$

$$\omega_{II} = \omega_{c2}(1 - e^{-t/T_{M2}}) + \omega_{к1} \cdot e^{-t/T_{M2}},$$

де  $T_{M2} = \frac{JR_{я2}}{(k\Phi)^2}$  та  $T_{M2} = \frac{J(\omega_0 - \omega_{H2})}{M_H}$  - електромеханічна стала часу для другого ступеня відповідно для приводу постійного струму та асинхронного.

Варто звернути увагу на те, що відлік часу для кожного ступеня починається при  $t = 0$ , коли відбувається перемикавання на іншу характеристику. Крім того, усталене значення швидкості визначається точкою перетину відповідної механічної характеристики з лінією  $M_c = \text{const}$ , незалежно від того, чи буде досягнута ця швидкість фактично в даному режимі (рис. 2.34). Для зручності практичних розрахунків поточний час  $t$  вибирається кратним  $T_M$ .

Аналогічним способом записуються вирази для моменту двигуна і швидкості для третього ступеня пускового реостата. При розгоні на природній характеристиці ці вирази мають наступний вигляд:

$$\left. \begin{aligned} M &= M_c(1 - e^{-t/T_M}) + M_1 \cdot e^{-t/T_{M2}}; \\ \omega &= \omega_c(1 - e^{-t/T_M}) + \omega_{к3} \cdot e^{-t/T_{M2}}, \end{aligned} \right\} \quad (2.100)$$

де  $T_M$  - електромеханічна стала для природної характеристики.

### 2.8.2. Розрахунок перехідних процесів в ЕП з абсолютно жорсткими зв'язками

Мета індивідуального завдання: поглибити теоретичні знання студентів з типових перехідних процесів в електроприводах з абсолютно жорсткими зв'язками; отримати практичні навички та уміння з методики розрахунку параметрів та побудови графіків перехідних процесів при реостатному пуску привода постійного струму.

**Постановка задачі.** Згідно з вихідними даними варіанта завдання необхідно:

1) надати розрахункову схему пускового реостата ДПС незалежного збудження з числом ступенів  $m = 3$ ;

2) визначити опори якірного кола  $R_{я1}, R_{я2}$  та  $R_{я3}$  пускового реостата, якщо максимальний момент ДПС  $M_1 = 2,5M_H$ ; статичний момент опору  $M_c = 0,8M_H$ ;

3) розрахувати та побудувати графіки залежностей моменту  $M(t)$  та кутової швидкості  $\omega(t)$  у часі при пуску ДПС і визначити тривалість перехідного процесу;

Вихідні дані варіантів завдання наведено у табл. 2.13, де номінальні потужність  $P_H$ , напруга  $U_H$  та струм  $I_H$  якоря, частота обертання  $n_H$ , опір кола якоря  $R_я$ , момент інерції системи  $J$ .

Таблиця 2.13

Вихідні дані варіантів завдання

№ варіанта	$P_H$ , кВт	$U_H$ , В	$I_H$ , А	$n_H$ , об/хв	$R_я$ , Ом	$J$ , кг·м <sup>2</sup>	Примітка
1	2	3	4	5	6	7	8
0	10	220	55	750	0,11	0,2	
1	12	220	58	1000	0,12	0,25	
2	14	220	61	1200	0,13	0,3	
3	16	220	64	1450	0,15	0,35	
4	18	220	67	1700	0,17	0,4	
5	20	440	70	1000	0,19	0,45	
6	22	440	73	1200	0,21	0,5	
7	24	440	76	1450	0,22	0,55	
8	26	440	79	1700	0,24	0,6	
9	28	440	82	1950	0,26	0,65	

**Приклад задачі.** Відомі наступні вихідні дані ДПС незалежного збудження:  $P_H = 15,4$  кВт,  $U_H = 220$  В,  $I_H = 73$  А,  $n_H = 1500$  об/хв.,  $R_я = 0,1275$  Ом,  $J = 0,35$  кг·м<sup>2</sup>.

**Розв'язання задачі.**

Номінальний момент ДПС

$$M_H = 60P_H / (2\pi \cdot n_H) = 60 \cdot 15400 / (6,28 \cdot 1500) = 98 \text{ Н} \cdot \text{м}.$$

Пусковий момент та статичний момент опору:

$$M_1 = 2,5M_H = 2,5 \cdot 98 = 245 \text{ Н} \cdot \text{м};$$

$$M_c = 0,8M_H = 0,8 \cdot 98 = 78,4 \text{ Н} \cdot \text{м}.$$

Пусковий струм



$$I_1 = \frac{M_1}{k\Phi} = \frac{245}{1,342} = 182,5 \text{ А.}$$

де  $k\Phi = 30(U_H - I_H \cdot R_{я}) / (\pi \cdot n_H = 30(220 - 73 \cdot 0,1275) / (3,14 \cdot 1500) = 1,342 \text{ В} \cdot \text{с.}$

Опір якірного кола на першій ступіні

$$R_{я3} = \frac{U_H}{I_1} = 1,205 \text{ Ом.}$$

Відношення моментів перемикавання

$$\lambda = \frac{M_1}{M_2} = \sqrt[3]{\frac{R_{я3}}{R_{я}}} = \sqrt[3]{\frac{1,205}{0,1275}} = 2,124.$$

Моменти перемикавання

$$M_2 = \frac{M_1}{\lambda} = \frac{245}{2,124} = 115,35 \text{ Н} \cdot \text{м.}$$

Опори якірного кола на другому і третьому ступенях:

$$R_{я2} = \frac{R_{я3}}{\lambda} = \frac{1,205}{2,124} = 0,567 \text{ Ом;}$$

$$R_{я1} = \frac{R_{я2}}{\lambda} = \frac{0,544}{2,124} = 0,267 \text{ Ом.}$$

Усталене значення швидкості на першому ступеню

$$\omega_c = \frac{U_H}{k\Phi} - \frac{M_c \cdot R_{я3}}{(k\Phi)^2} = \frac{220}{1,342} - \frac{78,4 \cdot 1,205}{(1,342)^2} = 111,48 \frac{1}{\text{с.}}$$

Рівняння моменту і швидкості двигуна для першого ступеня:

$$M_1 = M_c(1 - e^{-t/T_{M1}}) + M_1 \cdot e^{-t/T_{M1}} = 78,4 \cdot (1 - e^{-t/0,234}) + 245 \cdot e^{-t/0,234};$$

$$\omega_1 = \omega_{c1}(1 - e^{-t/T_{M1}}) = 111,48 \cdot (1 - e^{-t/0,234}).$$

де  $T_{M1} = \frac{J R_{я3}}{(k\Phi)^2} = \frac{0,35 \cdot 1,205}{(1,342)^2} = 0,234 \text{ с}$  - електромеханічна стала часу при роботі двигуна на першому ступені. Електромеханічна стала часу на другій, третій пускових та природній характеристиках:

$$T_{M2} = \frac{JR_{я2}}{(k\Phi)^2} = \frac{0,35 \cdot 0,567}{(1,342)^2} = 0,11 \text{ с,}$$

$$T_{M3} = \frac{JR_{я1}}{(k\Phi)^2} = \frac{0,35 \cdot 0,267}{(1,342)^2} = 0,051 \text{ с,}$$

$$T_M = \frac{JR_{я}}{(k\Phi)^2} = \frac{0,35 \cdot 1,275}{(1,342)^2} = 0,024 \text{ с.}$$

Тривалість перехідного процесу

$$t_{пп} = (T_{M1} + T_{M2} + T_{M3}) \ln \frac{M_1 - M_c}{M_2 - M_c} + 4T_M =$$

$$= (0,234 + 0,11 + 0,024) \ln \frac{245 - 78,4}{115,35 - 78,4} + 4 \cdot 0,024 = 0,554 \text{ с.}$$

### 2.8.3. Контрольні запитання до теми 8

1. Що називається перехідним процесом системи?
2. Види перехідних процесів в електроприводах.
3. Фізична сутність перехідних процесів в ЕП.
4. Основні показники якості електропривода у перехідному режимі.
5. Рівняння руху електропривода в усталеному та перехідному режимах.
6. Основні співвідношення для моменту, струму якоря та кутової швидкості приводного двигуна та їх графіки у часі.
7. Електромагнітна та електромеханічна постійні часу, їх фізична сутність та як вони визначаються.
8. Як визначається та змінюється величина часу розгону двигуна на кожній ступені багатоступінчастого пускового реостата?
9. Як визначається та змінюється величина часу розгону двигуна на кожній ступені багатоступінчастого пускового реостата?
10. Як визначається початкові та кінцеві (усталені) значення моменту, струму якоря та швидкості двигуна при реостатному пуску?
11. Як визначається опір якорного кола на кожній ступені багатоступінчастого пускового реостата?
12. Як визначається тривалість перехідного процесу при пуску ДПС, тобто загальний час пуску двигуна?

### 2.9. Зміст практичних та лабораторних занять

При вивченні дисципліни проводяться лабораторні роботи за наступними темами.

Дослідження двигуна постійного струму з паралельним збудженням при пуску та гальмуванні.

Дослідження асинхронного двигуна з фазним ротором при пуску та гальмуванні.

Дослідження режимів роботи системи генератор – двигун (Г – Д).

Визначення втрат потужності та коефіцієнта корисної дії ДПС.

Темами практичних занять є:

- розрахунок характеристик та пускового реостата ДПС з паралельним збудженням;

- розрахунок механічних характеристик та пускового реостата асинхронного двигуна з фазним ротором;

- розрахунок та побудова навантажувальної діаграми ЕП механізму мостового крану та вибір приводного двигуна;

- розрахунок перехідних процесів в системах ЕП з абсолютно жорсткими та пружними зв'язками.

## Література

### Основна

1. Попович М.Г. та ін. Теорія електропривода: Навч. посібник. -К.: Вища шк.,1993. - 427 с.
2. Чиликин М.Г., Сандлер А.С. Общий курс электропривода: Учебник. -М.: Энергоатомиздат, 1981.- 576 с.
3. Кажан В.Є. Теорія електропривода. Частина 1: Конспект лекцій. - Дніпропетровськ: НМетАУ, 2006. - 72 с.
4. Кажан В.Є. Теорія електропривода. Регулювання координат та системи керованих електроприводів. Частина 2: Навч. посібник. - Дніпропетровськ: НМетАУ, 2007. - 72 с.
5. Кажан В.Є. Теорія електропривода. Частотне регулювання, структури та енергетика електроприводів. Частина 3: Навч. посібник. -Дніпропетровськ: НМетАУ, 2008. - 87 с.
6. Попович М.Г. та ін. Електромеханічні системи автоматичного керування та електроприводи: Навч. посібник. -К.: Либідь, 2005. - 680 с.
7. Москаленко В.В. Автоматизированный электропривод: Учебник. -М.: Энергоатомиздат, 1986.- 416 с.
8. Фотиев М.М. Электроприводы и электрооборудование металлургических цехов: Учебник. 3-е изд. -М.: Металлургия, 1990.- 352с.
9. Бычков В.П. Электропривод и автоматизация металлургического производства: Учеб. пособие. -М.: Высшая шк., 1987.- 312 с.
10. Малкин Б.М. и др. Методические указания к выполнению лабораторного практикума по дисциплине «Электрооборудование».- Днепропетровск: ДМетИ, 1987.- 52 с.

- 11.Худолеев Г.В. Методические указания к выполнению курсового проекта по дисциплине «Теория электропривода». - Днепропетровск: ГМетАУ, 1998.- 42 с.
- 12.Башарин А.В. и др. Управление электроприводами: Учеб. пособие. Л.: Энергоиздат,1982.- 392 с.

### **Додаткова**

- 13.Колб Ант. А., Колб А.А. Теорія електроприводу: Навч. посібник. - Дніпропетровськ: НГУ, 2006. - 511 с.
- 14.Белов М.П. и др. Автоматизированный электропривод типовых производственных механизмов и технологических комплексов: Учебник.- 2-е изд., стер. -М.: Академия, 2004. - 506 с.
- 15.Соколовский Г. Г. Электроприводы переменного тока с частотным регулированием. Учебник. -М.: Академия, 2006. - 272 с.
- 16.Белов М.П. и др. Инжиниринг электроприводов и систем автоматизации: Учеб. пособие. -М.: Академия, 2006. - 368 с.
- 17.Казачковський М. М. Автономні перетворювачі та перетворювачі частоти: Навч. посібник. -Дніпропетровськ: НГУ, 2000. - 196 с.
- 18.Справочник по автоматизированному электроприводу/ Под ред. В.А. Елисеева и А.В. Шинянского. -М.: Энергоатомиздат,1983. - 616с.
- 19.Іващенко В.П., Тараканов А.К., Должанський А.М. та ін. Організація виконання кваліфікаційних робіт у Національній металургійній академії України: Навч. посібник. – Дніпропетровськ: НМетАУ, 2007. – 73 с.
- 20.Державний стандарт України ДСТУ 3008-95 «Документація. Звіти у сфері науки і техніки. Структура і правила оформлення». – К.: Держстандарт України, 1995. – 38 с.