

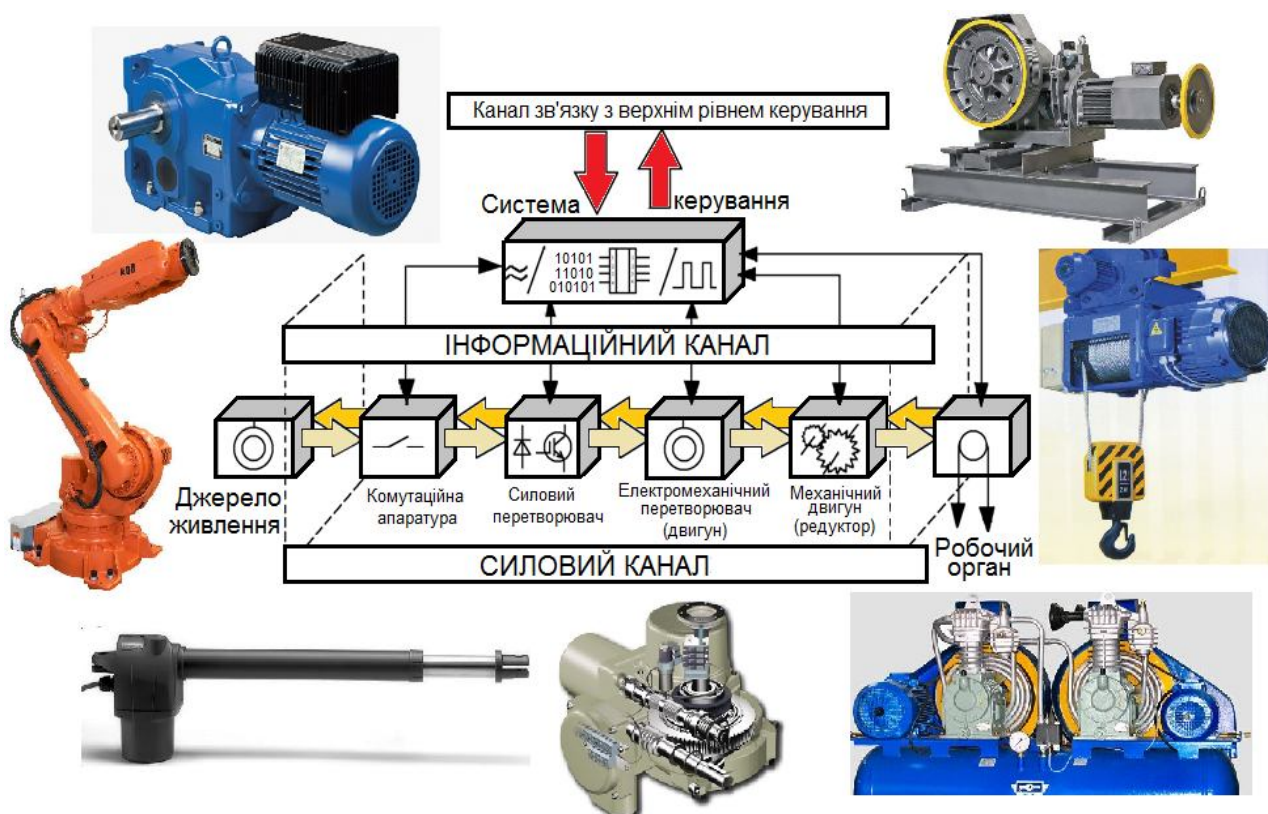
**МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ І НАУКИ УКРАЇНИ**  
**ХАРКІВСЬКИЙ НАЦІОНАЛЬНИЙ УНІВЕРСИТЕТ**  
**МІСЬКОГО ГОСПОДАРСТВА імені О. М. БЕКЕТОВА**

**Т. П. ПАВЛЕНКО, О. В. ДОНЕЦЬ, О. М. ПЕТРЕНКО**

**АВТОМАТИЗОВАНИЙ ЕЛЕКТРОПРИВОД**  
**ЗАГАЛЬНОПРОМИСЛОВИХ МЕХАНІЗМІВ**

**КОНСПЕКТ ЛЕКЦІЙ**

*(для студентів усіх форм навчання за спеціальністю  
141 – Електроенергетика, електротехніка, електромеханіка)*



**Харків**  
**ХНУМГ ім. О. М. Бекетова**  
**2018**

**Павленко Т. П.** Автоматизований електропривод загальнопромислових механізмів. Конспект лекцій (для студентів усіх форм навчання за спеціальністю 141 – Електроенергетика, електротехніка, електромеханіка) / Т. П. Павленко, О. В. Донець, О. М. Петренко ; Харків. нац. ун-т міськ. госп-ва ім. О. М. Бекетова. – Харків : ХНУМГ ім. О. М. Бекетова, 2018. – 132 с.

Автори:

д-р техн. наук, проф. Т. П. Павленко,  
канд. техн. наук, доц. О. В. Донець,  
канд. техн. наук О. М. Петренко

Рецензент

**К. М. Василів**, доктор технічних наук, професор (НУ «Львівська політехніка»)

*Рекомендовано кафедрою електричного транспорту, протокол № 6 від 23.01.2017.*

Лекції складено з метою допомоги студентам електротранспортних, електротехнічних, електромашинобудівних спеціальностей усіх форм навчання під час підготовки до занять, складання заліку з курсу «Автоматизований електропривод загальнопромислових механізмів».

© Т. П. Павленко, О. В. Донець, О. М. Петренко, 2018  
© ХНУМГ ім. О. М. Бекетова, 2018

## ЗМІСТ

Вступ.....	6
<b>ЛЕКЦІЯ 1</b> .....	7
ЕЛЕКТРОМЕХАНІЧНІ СИСТЕМИ ТА ЇХ ОСНОВНІ ЕЛЕМЕНТИ.....	7
1.1 Історія розвитку електромеханічних систем та автоматизованого електропривду.....	7
1.2 Основні положення роботи електромеханічних систем.....	10
1.3 Структура електромеханічних комплексів і систем.....	13
1.4 Класифікація загальнопромислових механізмів.....	16
Контрольні питання .....	17
<b>ЛЕКЦІЯ 2</b> .....	18
КЛАСИФІКАЦІЯ АВТОМАТИЗОВАНИХ ЕЛЕКТРОПРИВОДІВ.....	18
2.1 Загальна класифікація автоматизованих систем.....	18
2.2 Класифікація електроприводів по виду руху.....	19
2.3 Класифікація електроприводів за ступенем автоматизації.....	20
Контрольні питання .....	23
<b>ЛЕКЦІЯ 3</b> .....	24
МЕХАНІКА ЕЛЕКТРОПРИВОДУ.....	24
3.1 Основні закони механіки електроприводу.....	24
3.2 Рівняння руху електропривода.....	28
3.3 Наведена механічна ланка електроприводу.....	29
3.4 Динамічні характеристики жорсткої механічної ланки.....	32
3.5 Динамічні характеристики багатомасової механічної системи електропривода.....	36
3.6 Динамічні характеристики механічної системи з підвішеним вантажем.....	42
Контрольні питання .....	44
<b>ЛЕКЦІЯ 4</b> .....	45
ЕЛЕКТРИЧНІ МАШИНИ ПОСТІЙНОГО СТРУМУ ДЛЯ АВТОМАТИЗОВАНИХ СИСТЕМ.....	45
4.1 Класифікація електричних машин.....	45
4.2 Основні елементи машин постійного струму та їх принцип дії.....	46
4.3 Способи регулювання швидкості обертання електродвигунів постійного струму.....	51
Контрольні питання .....	53
<b>ЛЕКЦІЯ 5</b> .....	54
РЕГУЛЮВАННЯ ШВИДКОСТІ ОБЕРТАННЯ ЕЛЕКТРОДВИГУНІВ ПОСТІЙНОГО СТРУМУ ПАРАЛЕЛЬНОГО І ПОСЛІДОВНОГО ЗБУДЖЕННЯ.....	54
5.1 Регулювання швидкості обертання електродвигуна паралельного збудження шляхом зміни величини потоку збудження.....	54

5.2 Регулювання швидкості обертання електродвигуна паралельного збудження шляхом зміни опору в ланцюзі обмотки якоря.....	56
5.3 Регулювання швидкості обертання електродвигуна паралельного збудження шляхом зміни напруги, що підводиться.....	57
5.4 Регулювання швидкості обертання електродвигуна з послідовним збудженням шляхом зміни опору в головному колі.....	58
5.5 Регулювання швидкості обертання електродвигуна з послідовним збудженням із застосуванням схеми незалежного живлення обмотки збудження.....	60
Контрольні питання .....	61
<b>ЛЕКЦІЯ 6</b> .....	62
<b>ЕЛЕКТРИЧНІ МАШИНИ ЗМІННОГО СТРУМУ</b> .....	62
6.1 Класифікація і основні параметри асинхронних машин.....	62
6.2 Режими роботи асинхронних машин.....	63
6.3 Побудова та принцип дії трифазних асинхронних двигунів.....	65
6.4 Способи регулювання швидкості обертання ТАД.....	67
6.5 Синхронні машини.....	72
6.6 Побудова синхронної машини і способи її пуску.....	72
6.7 Робота синхронної машини в режимі генератора та двигуна.....	75
Контрольні питання .....	77
<b>ЛЕКЦІЯ 7</b> .....	78
<b>ЕЛЕКТРОТЕХНІЧНІ ПРИСТРОЇ КЕРУВАННЯ І ЗАХИСТУ</b> .....	78
7.1 Класифікація електричних апаратів.....	78
7.2 Апарати неавтоматичного керування.....	79
7.3 Пускорегулюючі і струмообмежуючі апарати неавтоматичного керування.....	80
7.4 Апарати керування та захисту.....	83
7.5 Командні апарати і датчики.....	91
7.6 Трансформатори. Основні параметри та принцип дії.....	94
7.7 Конструкції трансформаторів та їх призначення.....	96
7.8 Безконтактні апарати та пристрої кін. автоматики.....	99
Контрольні питання .....	103
<b>ЛЕКЦІЯ 8</b> .....	104
<b>ТИПОВІ ЗАГАЛЬНОПРОМИСЛОВІ МЕХАНІЗМИ</b> .....	104
8.1 Загальнопромислові механізми циклічної дії.....	104
8.2 Загальнопромислові механізми безперервної дії.....	111
8.3 Схеми електроприводів загальнопромислових механізмів.....	119
Контрольні питання .....	122

<b>ЛЕКЦІЯ 9 .....</b>	<b>123</b>
<b>КЕРУВАННЯ ЕЛЕКТРОТЕХНІЧНИМИ ПРИСТРОЯМИ В СИСТЕМІ</b>	
<b>ЕЛЕКТРОПРИВОДУ.....</b>	<b>123</b>
9.1 Керування ТАД з короткозамкненим ротором за допомогою магнітних пускачів.....	124
9.2 Керування ТАД з короткозамкненим ротором шляхом перемикання числа пар полюсів обмотки статора.....	124
9.3 Керування ТАД з контактними кільцями.....	126
9.4 Керування синхронними електродвигунами.....	129
9.5 Керування електродвигунами постійного струму з послідовним збудженням.....	130
Контрольні питання .....	131
<b>СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ .....</b>	<b>132</b>

## ВСТУП

Досягнення світового досвіду створення нового і модернізації діючого технологічного обладнання показує високу динаміку розвитку регульованих електроприводів, комп'ютерних засобів автоматизації, використання інформаційних засобів. Це обумовлено прагненням щодо максимального підвищення продуктивності технологічного устаткування і якості виробленої продукції. Всі провідні корпорації випускають регульовані електроприводи комплектно з комп'ютерними засобами автоматизації у вигляді програмованих систем, призначених для широкого застосування. Окупність коштів, вкладених в такі системи, є найбільш швидкою. Крім застосування, регульовані електроприводи спільно з технологічними пристроями використовуються в якості засобів регулювання технологічних змінних параметрів, наприклад, рівня, тиску, вологості, температури.

Сучасні комп'ютеризовані електроприводи оснащуються великою бібліотекою програмних засобів, за допомогою яких можна вирішувати багатофункціональні задачі керування технологічним обладнанням через систему функціональних пристроїв технологічного об'єкта.

В даний час є багато машин і механізмів, що виконують однакові чи аналогічні операції технологічних процесів різних галузей промисловості. Такі машини і механізми можна об'єднати в типові функціональні групи, наприклад різального, підйомно-транспортного та іншого обладнання.

Показані лекції розкривають питання використання автоматизованих електроприводів в загальнопромислових механізмах та оснащені сучасним ілюстраційним матеріалом, що допомагає вивченню та зрозумінню процесів, які відбуваються під час роботи автоматизованих систем.

## ЛЕКЦІЯ 1

### ЕЛЕКТРОМЕХАНІЧНІ СИСТЕМИ ТА ЇХ ОСНОВНІ ЕЛЕМЕНТИ

#### *План:*

- 1. Історія розвитку електромеханічних систем та автоматизованого електроприводу.*
- 2. Основні положення роботи електромеханічних систем.*
- 3. Структура електромеханічних комплексів і систем.*
- 4. Класифікація загальнопромислових механізмів.*

#### **1.1 Історія розвитку електромеханічних систем та автоматизованого електроприводу**

В даний час є багато машин і механізмів, що виконують однакові чи аналогічні операції технологічних процесів різних галузей промисловості. Такі машини і механізми можна об'єднати в типові функціональні групи, наприклад різального, підйомно-транспортного та іншого обладнання.

Більшість виробничих робочих машин і механізмів приводиться в рух електричними двигунами. Двигун разом з механічними пристроями (редуктори, трансмісії, кривошипно-шатунні механізми та ін.), що служать для передачі руху робочого органу машини, а також з пристроями керування і контролю, утворює електромеханічну систему.

**Електромеханічна система** – це сукупність електричних двигунів, механічних кінематичних ланок (що передають рух від електродвигуна до робочого органу машини), напівпровідникових перетворювальних пристроїв контактних електричних апаратів керування та захисту, безконтактних пристроїв керування, мікропроцесорів .

Така система служить для автоматичного керування і приведення в дію робочих органів технологічної машини з застосуванням силового напівпровідникового перетворювача, механічного передавального пристрою, електричних і мікроелектронних пристроїв керування в відповідності з умовами технологічного процесу, що в цілому складає **автоматизований електропривод**.

Історія розвитку електропривода почалася з розвитком електромеханіки (XIX ст.) Перший електропривод був створений в 1838 р. академіком Б. С. Якобі (рис. 1.1), який вперше поєднав електродвигун на човні через механічну систему з валом двигуна гребного гвинта. Джерелом живлення

електродвигуна була батарея, що складалася з сухих елементів. Такий «електрохід» розвивав швидкість 5 км/год і міг перевозити 12 пасажирів на борту, але створений електропривод не набув поширення внаслідок високої вартості і малої ємності батарей. Подальшого розвитку електроприводи набули з появою електрогенераторів різних потужностей та побутових пристроїв.

Наприклад, відомий електротехнік В. Н. Чиколев (рис. 1.2) у 1882 р. розробив електропривод для швейних машин.

Широко застосовуватися електропривод почав у військовій техніці. Наприклад, протягом 1890–1894 рр. електропривод використовувався на бойових кораблях морського флоту як підйомник зарядів із льохів до знарядь (рис. 1.3), а також для повороту збройових веж і рульових пристроїв.



Рисунок 1.1 – Перший електродвигун та електропривод для човна



Рисунок 1.2 – Перший електропривод для швейної машини

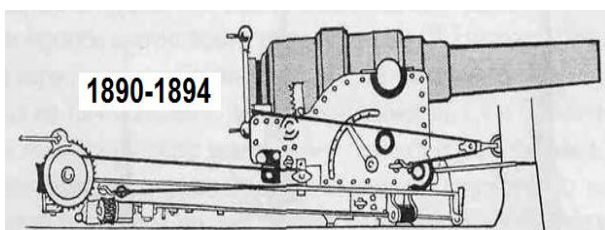


Рисунок 1.3 – Електропривод для пушок бойових кораблів

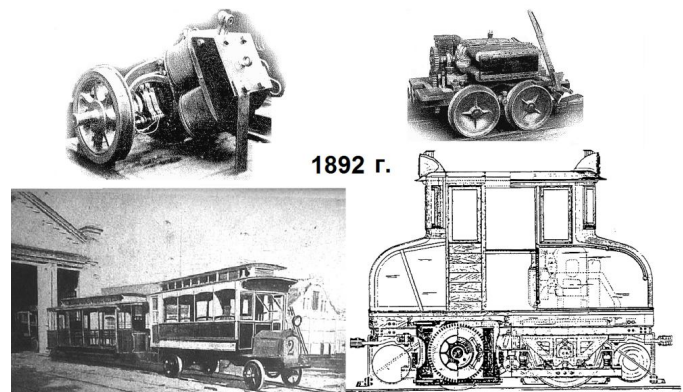


Рисунок 1.4 – Перший Київський трамвай та його електропривод.

Застосування електроприводу знайшлося і в електротранспортних пристроях, наприклад, вперше він був використаний в трамваях у 1892 р. в Києві (рис. 1.4), а потім пізніше в Москві (1903) і інших місцях.

З появою трифазного змінного струму (Н. Тесла, 1887 р.) пов'язане використання електроприводу в системах змінного струму. Наприклад,



М. О. Доливо-Добровольський вперше запропонував у 1889 р. систему електропривода трифазного електричного струму, що об'єднує декілька асинхронних двигунів з фазним і короткозамкненим ротором (рис. 1.5).

У 1893 році побудовані перші електростанції (рис. 1.6), наприклад, у Шепетівці та інших місцях, які використовували 209 асинхронних електроприводів загальної потужності 1507 кВт, та у Харкові.

У процесі створення конструкцій електроприводних систем постійного і змінного струму, розроблялися і теорії електроприводу, які об'єднували питання живлення електродвигунів, генераторів, а також можливості покращення їх характеристик та ін.

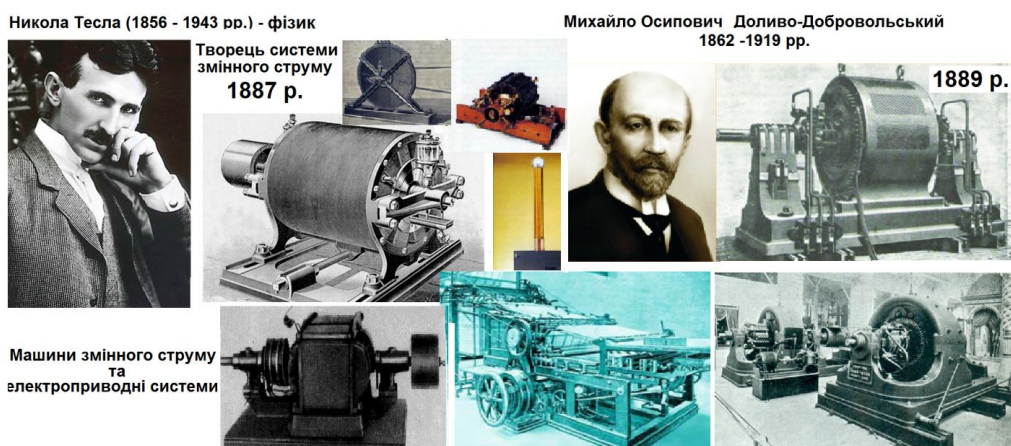


Рисунок 1.5 – Видатні вчені та системи електроприводів змінного струму



Рисунок 1.6 – Зовнішній вигляд перших електростанцій з асинхронними електроприводами

В даний час дуже значно зросла роль автоматизованих систем, заснованих на теоріях частотного регулювання швидкості електроприводів, застосування напівпровідникової техніки, перетворювачів і досягнення суміжних наук: фізики, математики, електроніки, обчислювальної техніки. Широке застосування отримали аналогові і цифрові пристрої для систем електроприводів. Це призвело до розвитку швидкодіючих електроприводів на

основі спеціальних електричних машин з високими динамічними характеристиками.

Подальший розвиток автоматизованих систем призвело до створення складних технологічних комплексів, де використовуються декілька робочих органів або технологічно пов'язаних робочих машин, які об'єднані загальною системою керування.

## 1.2 Основні положення роботи електромеханічних систем

Сучасне промислове виробництво характеризується використанням високопродуктивних технологічних машин і механізмів, оснащених електричним приводом та системами автоматичного керування. Практично всі транспортні, промислові, медичні та побутові установки, засновані на механічному русі і використовують електричну енергію як енергетичну основу для виконання технологічних операцій та процесів.

За даними економічно розвинених країн на електропривод витрачається більше 65 % вироблюваної електроенергії.

Насиченість технологічних машин і агрегатів електроустаткуванням і засобами автоматизації настільки велика, що по вартості, складності, кваліфікації обслуговування електрична частина перевершує механічну (рис. 1.7).

Досконалість електроприводу машин і агрегатів, ступінь їх автоматизації багато в чому визначають технічний рівень робочих машин в цілому.

Виходячи з цього, більшість сучасних робочих машин слід розглядати як електромеханічні системи. Наприклад, до автоматизованої електромеханічної системи відносяться пасажирські ліфти – добре всім знайомі пристрої вертикального транспорту (рис. 1.8).



Рисунок 1.7 – Автоматизовані системи технологічного процесу



Рисунок 1.8 – Пасажирський ліфт

Робочим органом ліфта є кабіна, яка обладнана дверима, що автоматично відкриваються і закриваються. Кабіна приводиться в рух електродвигуном через механічний редуктор і канатну передачу. Система керування двигуном забезпечує, у відповідності з отриманим наказом (натискання кнопки у кабіні) або викликом (натискання кнопки виклику на поверсі) вибір напрямку руху, плавний пуск, рух зі сталою швидкістю, гальмування і точну зупинку на необхідному поверсі, автоматичне відкривання і закривання дверей кабіни і ліфтової шахти.

Електродвигун з пристроями регулювання швидкості руху і положенням кабіни, а також редуктор, канатноведучий шків, канатна передача, кабіна і противага, становлять головну електромеханічну систему ліфтової установки. Другою електромеханічною системою є пристрій відкриття і закриття дверей, що складається з електродвигуна, кінематичних і механічних ланок і системи керування дверима.

Таким чином, електромеханічні системи в поєднанні з загальною системою автоматичного керування ліфтом, а за наявності декількох ліфтів також з системою оптимізації групової роботи, утворюють автоматизований електромеханічний комплекс ліфта.

Розглянемо електромеханічну систему побутового пристрою – автоматичну пральну машину (рис. 1.9).



Рисунок 1.9 – Зовнішній вигляд автоматичної пральної машини та її основні елементи:

- 1 – кришка; 2 – передня панель; 3 – задня панель; 4 – панель керування; 5 – бак;  
6 – барабан; 7 – електронний модуль; 8 – впускний клапан; 9 – сливний насос;  
10 – амортизатор; 11 – пресостат; 12 – емність для порошків; 13 – тен;  
14 – ремень; 15 – електричний двигун*

Машина являє собою електромеханічний пристрій, що містить багатошвидкісний електродвигун обертання барабана, електронасос, електричні клапани та апаратуру програмного керування. У відповідності з встановленою

програмою прання машина автоматично виробляє прання і віджимання білизни, налив і злив води. Робота різних електричних і механічних елементів функціонально об'єднана пристроєм програмного керування. Роботу окремих елементів не можна розглядати окремо, тому що спільно вони утворюють автоматичну електромеханічну систему, що виконує єдину технологічну операцію.

Таким чином, наведені приклади, а їх число може бути багаторазово збільшено, показують, що основним технічним змістом сучасних автоматизованих робочих машин є електромеханічні **комплекси і системи**. Це найбільш складні і дорогі частини робочих машин. Їх конструювання, виготовлення та експлуатація вимагають високої кваліфікації і різноманітних технічних знань.

Більшість понять і пов'язані з ними термінологія змінюються по мірі розвитку техніки. Раніше виготовлялася робоча машина, яка комплектувалася електродвигуном, пускатчем, апаратами керування і захисту. По мірі збільшення ступеня автоматизації робочих машин, розширення їх функціональних можливостей з'явилася необхідність у більш складних електричних системах, які спеціально проектувалися для окремих видів транспорту, промислових установок, медичної техніки і ін. Тому з'явилося поняття **«автоматизований електропривод»**.

Сформувався науковий напрямок з автоматизованого електроприводу, який вивчає загальні проблеми електромеханічного перетворення енергії, керування рухом робочих органів машин з електричним приводом, оптимізації електричних і електромеханічних процесів за критеріями продуктивності, точності, технологічними параметрами та економічності (рис. 1.10).

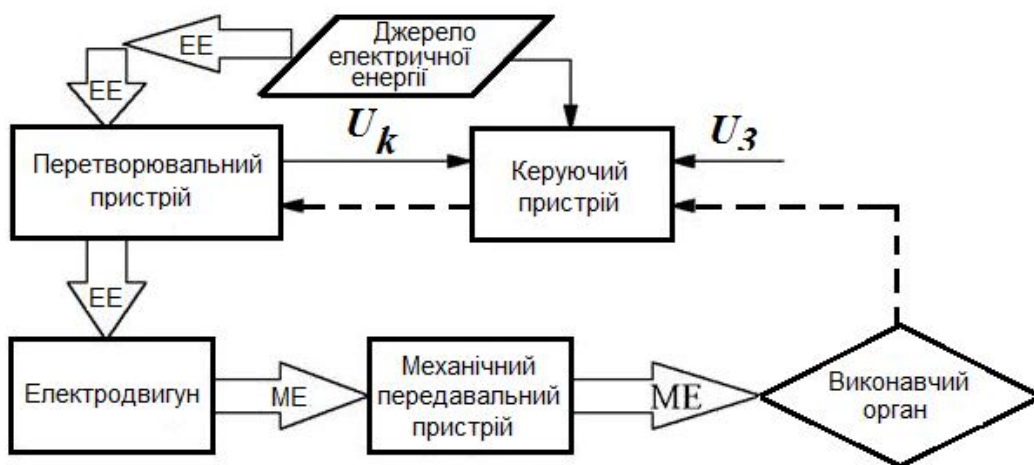
Подальший розвиток автоматизованого електроприводу пов'язано із винятком механічних передач, об'єднанням електромеханічних пристроїв з робочими органами машини. З'явилися інтегровані конструкції: наприклад, електрошпindel, електронасос, мотор-колесо та інші.

Введення електромеханічних пристроїв, а потім і локальних систем керування безпосередньо в конструкцію робочих машин істотно спростило останні, підвищило їх функціональні можливості і технічні характеристики. При цьому, були істотно підвищені вимоги до електроприводу, як за номінальними параметрами (висока швидкість обертання для високошвидкісних механізмів, великий момент для безредукторних приводів та інші), так і по їх керованості, що призвело до необхідності спільного конструювання як механічної, так і електричної частин робочих машин.





а)



б)

Рисунок 1.10 – Автоматизований електропривод механізмів (а)  
б) структурна схема

Завдяки високим технологіям з'явився напрям «механотроніка», під яким розуміється створення інтегрованих конструкцій, функціонально закінчених модулів, що поєднують в собі механічні пристрої, електричний двигун з системою його регулювання та мікропроцесорний керуючий пристрій.

### 1.3 Структура електромеханічних комплексів і систем

В структуру сучасної автоматизованої електромеханічної системи входять:

- програмний пристрій;
- датчики електричних і механічних параметрів;
- механічна частина електропривода;
- система керування технологічним процесом;
- система керування електроприводом;
- електрична силова частина електропривода;

- робочий орган машини;
- технологічний процес;
- датчики технологічних параметрів.

Існує ряд положень, що характеризують роботу електропривода:

- керування технологічним процесом за допомогою регулювання параметрів руху робочого органу машини, що є однією з основних функцій автоматизованого електроприводу;

- виконання функцій керування та захисту, які забезпечуються в сучасному електроприводі, завдяки електронним пристроям (силових напівпровідникових перетворювачів електричної енергії, мікроелектронних засобів автоматики) і мікропроцесорам, а також контактним електричним апаратам (автоматичних вимикачів, магнітних пускачів, реле та ін.)

- перетворення електричної енергії в механічну, яка необхідна для виконання конкретного технологічного процесу з найменшими витратами матеріальних і енергетичних ресурсів.

Зіставлення наведених положень визначає роботу автоматизованої електромеханічної системи та автоматизованого електроприводу, що дозволяє використовувати загальне поняття «автоматизований електропривод».

Якщо робоча машина або технологічний комплекс має в своєму складі декілька автоматизованих електромеханічних систем і (або) містить у своєму складі електричну систему підведення, розподілу і перетворення електричної енергії, то така сукупність електромеханічних та електричних систем називається **електромеханічним комплексом**.

Наприклад, розглянемо електромеханічний комплекс гірничого обладнання екскаватора (рис. 1.11).

Електричне живлення екскаватора, як рухомої машини, здійснюється при напрузі 6 (10) кВ по гнучкому кабелю. Кабель підключається до пункту живлення. Для підведення напруги на борт екскаватора служить кільцевий струмоприймач. Для комутації і захисту високовольтних кіл служить високовольтний розподільний пристрій, від якого живиться синхронний двигун електромашинного перетворювального агрегату і понижуючий трансформатор для живлення ланцюгів керування, допоміжних електроприводів та інших пристроїв.

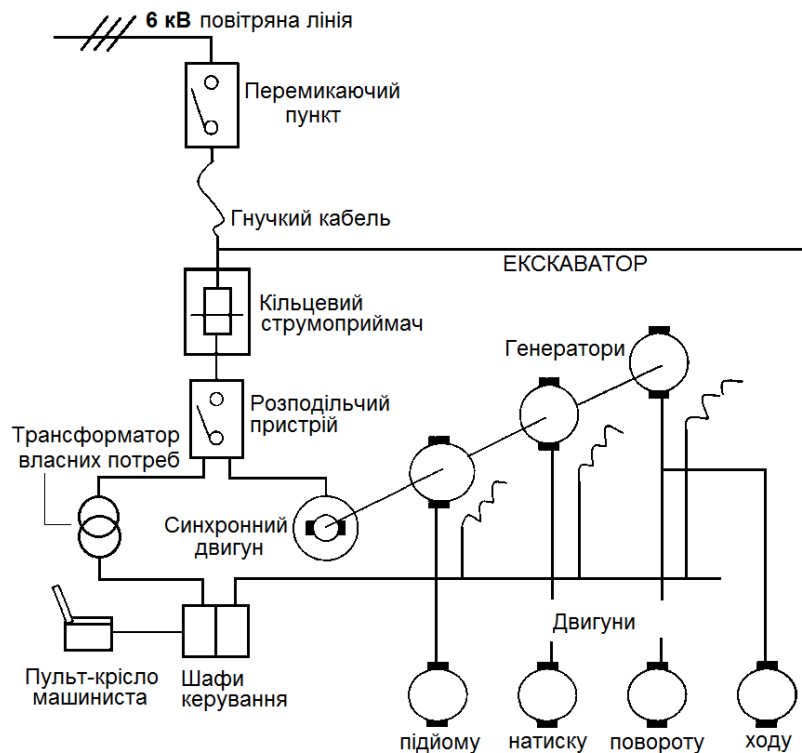
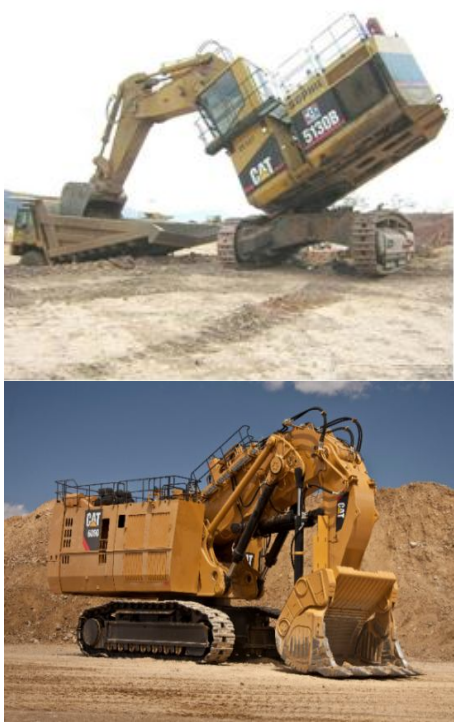


Рисунок 1.11 – Загальний вигляд та структура електромеханічного комплексу гірського екскаватора

Електропривод основних рухів екскаватора: підйому, натиску ковша, повороту і пересування – здійснюється двигунами постійного струму, які отримують живлення від індивідуальних генераторів постійного струму. Ці три генератори приводяться в обертання синхронним двигуном, який утворює з генераторами багатомашинний перетворювальний агрегат.

Для керування електроприводами служать пристрої (шафи) і пульт керування – крісло машиніста. Механічна частина електроприводів екскаватора включає в себе редуктори, барабанно-канатну передачу, зубчасту рейку приводу напору та інші елементи.

Всі різноманітні елементи електромеханічного комплексу екскаватора розглядаються і конструюються на основі єдиних вимог, що визначаються навантаженнями на ківш екскаватора і характером його руху. Загальна схема керування, що об'єднує електромеханічні та електричні системи, будується з умов технологічного процесу роботи екскаватора. Ці обставини визначають можливість і необхідність розглядати все різноманітне обладнання екскаватора як єдиний електромеханічний комплекс.

## 1.4 Класифікація загальнопромислових механізмів

До загальнопромислових установок відноситься велика група механізмів, в яких використовуються автоматизовані приводні системи. До них відносяться: конвеєри, ескалатори; багатокабінні підйомники, поточно-транспортні системи та інші, які беруть участь у механізації і автоматизації процесів.

Класифікація типових загальнопромислових механізмів наведена на рисунку 1.12. Узагальнена структура електропривода механізмів та основні елементи показані на рисунку 1.13.

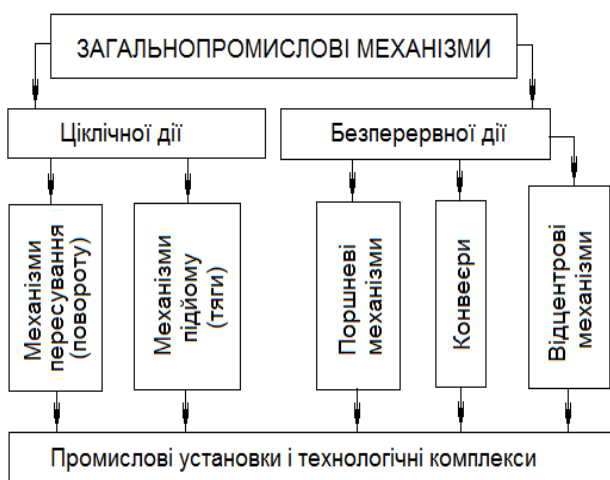


Рисунок 1.12 – Класифікація загальнопромислових механізмів



Рисунок 1.13 – Узагальнена структура електроприводу загальнопромислових механізмів:

- 1 – джерело електроенергії;
- 2 – комутаційна апаратура;
- 3 – перетворювач електричної енергії;
- 4 – електродвигун; 5 – механічна передача; 6 – робочий орган

**Інформаційні пристрої** – це пристрої, що призначені для отримання, перетворення, зберігання, розподілу та видачі інформації змінних ЕП технологічного процесу, а також для використання в системах керування ЕП і зовнішніх інформаційних системах.

**Пристрої сполучення** – це сукупність електричних і механічних елементів, що забезпечують взаємодію ЕП з суміжними системами та окремими його частинами.



Загальні вимоги, що пред'являються до електроприводу механізму:

- забезпечення заданого технологічного процесу і необхідної продуктивності;
- забезпечення необхідних умов пуску і гальмування (у тому числі за величиною прискорення) виробничих механізмів, а при необхідності реверсування та регулювання швидкості;
- обмеження динамічних і ударних перевантажень;
- забезпечення принципу керування ЕП (ручне, автоматичне, програмне);
- забезпечення надійності ЕП;
- забезпечення конструктивної захищеності електрообладнання (ступінь захисту IP) за умовами навколишнього середовища, кліматичного виконання;
- забезпечення високих економічних показників, до яких слід віднести не тільки мінімальну вартість ЕП, але і витрати електроенергії на його роботу.
- забезпечення екологічних вимог.

Таким чином, створення автоматизованого електроприводу та комплексних систем сприяє подальшому розвитку промисловості та нових типів загальнопромислових механізмів.

### **Контрольні питання**

1. Що називається електромеханічною системою?
2. Що являє собою автоматизований електропривод?
3. Хто стояв у джерела створення електроприводу?
4. Навести приклади електромеханічних систем
5. Що є основними елементами автоматизованого електроприводу механізму?
6. З чого складається структура сучасної автоматизованої системи?
7. Що називається електромеханічним комплексом?
8. Як класифікуються загальнопромислові механізми?
9. Що являє собою узагальнена структура електроприводу загальнопромислових механізмів?
10. Які основні елементи входять до структури електроприводу загальнопромислових механізмів?

## ЛЕКЦІЯ 2

### КЛАСИФІКАЦІЯ АВТОМАТИЗОВАНИХ ЕЛЕКТРОПРИВОДІВ

#### *План:*

*2.1 Загальна класифікація автоматизованих систем.*


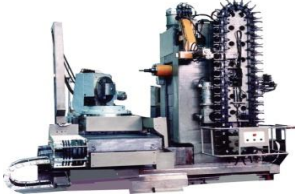

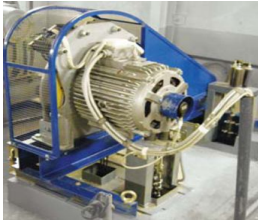

*2.2 Класифікація електроприводів по виду руху.*

*2.3 Класифікація електроприводів за ступенем автоматизації.*

#### **2.1 Загальна класифікація автоматизованих систем**

Електроприводи, що використовуються в різних технологічних установках, різноманітні за схемному і конструктивному виконанню, що пов'язано з великою різноманітністю робочих машин. Класифікація електроприводів за окремими ознаками наведено в таблці 2.1.

Таблиця 2.1 – Класифікація автоматизованих електроприводів

Класифікаційна ознака	Класифікаційні градації		
1	2	3	4
За різновидом руху електродвигуна	1. Обертальний 	2. Лінійний 	3. Багатокоординатний 
	1. Редукторний 	2. Безредукторний 	3. Конструктивно-інтегрований 

Продовження таблиці 2.1

1	2	3	4
За регульованістю	Нерегульований	Багатошвидкісний	Регульований
За ступенем автоматизації	1. Із ручним керуванням. 2. Із напіваавтоматичним керуванням. 3. Із замкнутою системою керування швидкості. 4. Із замкнутою системою керування положення, що забезпечує чітке позиціонування.		
	5. Із програмним керуванням 	6. Слідкуючий 	
За кількістю електродвигунів	1. Однодвигунний	2. Багатодвигунний	
За кількістю робочих органів	1. Індивідуальний	2. Груповий	

## 2.2 Класифікація електроприводу по виду руху

Найбільше, а до недавнього часу виключне застосування отримали електроприводи обертального руху. Однак останнім часом значна увага приділяється лінійним двигунів. В тих механізмах, де робочий орган здійснює поступальний або зворотно-поступальний рух застосування лінійних двигунів конструктивно набагато зручніше, ніж використання спеціальних кінематичних пар: наприклад, гвинт-гайка, кульково-винтові передачі, кривошипно-шатунний механізм та ін.

Через низькі енергетичні і масогабаритні показники лінійні електродвигуни не знаходили застосування. Створення нових ефективних конструкцій лінійних двигунів з живленням їх від напівпровідникових перетворювачів частоти відкриває нові можливості використання лінійних електроприводів для ряду виробничих машин, в першу чергу, для металорізальних верстатів.

Багатокоординатні електроприводи на основі спеціальних крокових електродвигунів є вітчизняною розробкою і знаходять застосування у високоточних робототехнічних установках, складальних автоматах та для інших пристроях.

Під *регулюємістю електроприводу* розуміється можливість зміни або точного підтримання швидкості, прискорення або моменту (зусилля) приводного електродвигуна.

Історично склалося, що більшість існуючих електроприводів виконано на базі короткозамкнених асинхронних електродвигунів, що не допускають у стандартній схемі їх живлення регулювання швидкості або моменту. Модифікацією одношвидкісних асинхронних електродвигунів є двох і тришвидкісні двигуни.

Електроприводи з багатошвидкісними двигунами дають можливість отримувати дві або три фіксовані робочі швидкості, але не можуть забезпечити плавного регулювання швидкості в заданому діапазоні. До подібних по керованості електроприводам можна також віднести електроприводи з реостатно-контакторним керуванням. Такі приводи не мають можливості регулювання моменту і прискорення електроприводу, а також формування необхідного характеру зміни швидкості в часі. Тому електропривод з багатошвидкісними електродвигунами і з контакторним керуванням не може розглядатися як регульований.

Поняття регульований електропривод включає в себе наступне:

- встановлення за завданням будь-якій швидкості в межах заданого діапазону;
- стабілізацію встановленого значення швидкості з заданою точністю при збурюючих впливах, наприклад, зміни навантаження на валу двигуна;
- регулювання моменту, що розвиває двигун в руховому і гальмівному режимах, і прискорення (уповільнення) приводу;
- формування необхідного характеру зміни швидкості в часі  $V = f(t)$  з заданою точністю.

В даний час все більш широко використовуються регульовані електроприводи. Наприклад, залежно від діапазону регулювання швидкості, електроприводи поділяються на:

- електроприводи з обмеженим діапазоном регулювання (не більше 2:1);
- електроприводи загального призначення з діапазоном регулювання не вище 100:1;
- широкорегулюючі електроприводи з діапазоном регулювання швидкості близько 1 000:1;
- високоточні електроприводи (діапазон регулювання 10 000:1);
- прецизійні електроприводи (діапазон регулювання 30 000:1 і вище).

Величина діапазону регулювання визначає точність регулювання і швидкодію електроприводу.

### **2.3 Класифікація електроприводів за ступенем автоматизації**

Така класифікація включає в себе електроприводи з системами керування, що розрізняються за їх функціональними можливостями і складностями. Найбільш прості електроприводні системи з ручним керуванням характерні для нерегульованих електроприводів. Такі електроприводи мають систему керування на основі релейно-контакторної апаратури, яка виконує функції вмикання, переривання, захисту та блокування.

Керування електроприводом з напівавтоматичною дією відбувається оператором за допомогою командного контролера, кнопок керування і інших апаратів. Система керування містить елементи автоматичного керування і регулювання, що забезпечують автоматичну зміну параметрів електропривода (наприклад, перемикання ступенів опору пускового реостата в функції струму або часу) відповідно з командами оператора. Такі системи характерні, наприклад, для електроприводу вантажопідіймальних кранів.

Для регульованого електроприводу, як правило, використовуються замкнуті САР по струму і швидкості. У цьому випадку керування може здійснюватися оператором, як це робиться, наприклад, машиністами екскаваторів, реверсивних прокатних станів та інших машин. Завдання на швидкість може також визначатися системою технологічної автоматики (наприклад, папероробні машини, дозатори та інші машини). Наступною різновидом є позиційні електроприводи, що забезпечують точну зупинку робочого органу механізму в заданому положенні. Системи керування таких електроприводів містять замкнутий контур положення, що діє постійно або при вході робочого органу в зону точної зупинки.

Якщо вплив, що задає параметри руху робочого органу визначається програмними засобами, то такі електроприводи складають клас електроприводів з числовим програмним керуванням (ЧПК). Приводи з ЧПК містять замкнуті контури регулювання швидкості та положення.

Якщо положення робочого органу повинно змінюватися відповідно до завдання, характер якого заздалегідь невідомий, то функцією електроприводу в цьому випадку є спостереження і відпрацювання цього завдання з необхідною точністю. Такий електропривод називається *слідкуючим*.

Одним з визначальних питань при проектуванні електромеханічних комплексів є вибір системи автоматизованого електроприводу.

В останні роки регульований електропривод активно витісняє нерегульований. Техніко-економічними підставами для застосування регульованого електроприводу є:

- технологічні вимоги, що пов'язані з необхідністю регулювання моменту, швидкості та положення в ході технологічного процесу (наприклад, металорізальні верстати, вантажопідіймальні крани та ін.);
- можливість оптимізації технологічного процесу за рахунок регулювання електромеханічних параметрів (наприклад, прокатні стани та ін.);
- підвищення ефективності використання електроенергії, її економія при використанні регульованого електроприводу (насоси, вентилятори та інші машини);
- автоматизація робочих машин і технологічних комплексів, яка в більшості випадків неможлива без використання регульованого електроприводу;
- забезпечення стабільності якості виробленої продукції (при зміні параметрів сировини, умов виробництва, знос інструменту, потребують адаптації технологічного процесу для збереження якості продукції);
- створення гнучких технологій, машинних комплексів і виробництв (тобто комплексу машинного обладнання, який може перебудовуватися на випуск нової продукції без зміни самих робочих машин).

Наведений перелік показує, що регульований електропривод є, особливо в перспективі, визначальним видом автоматизованого електроприводу.

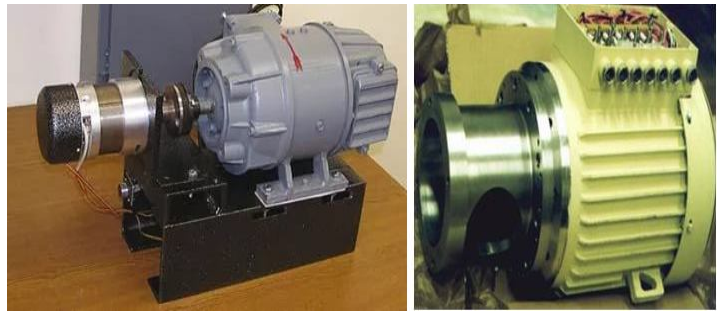
Основними системами автоматизованого електроприводу є:

- асинхронний двигун з короткозамкненим ротором з живленням від напівпровідникового перетворювача частоти ПЧ-АД;
- вентильний двигун (безщітковий двигун постійного струму з напівпровідниковим комутатором) на базі синхронної машини – ВД;
- двигун постійного струму з живленням від тиристорного або транзисторного перетворювача – ТП-Д;
- асинхронний вентильний каскад на базі асинхронного двигуна з фазним ротором і тиристорного перетворювача – АВК.

До числа перспективних електроприводів слід також віднести крокові електроприводи та вентильно-індукторний електропривод (рис. 2.1).



Крокові електроприводи



Вентильно-індукторні електроприводи

Рисунок 2.1 – Перспективні конструкції електроприводів

Таким чином, класифікація електроприводів дуже різноманітна. Тому для кожної області використовується необхідна конструкція електроприводів, яка має визначені характеристики та параметри.

### Контрольні питання

1. Як взагалі класифікуються автоматизовані системи?
2. Як класифікуються електроприводи по виду руху?
3. Що є поняттям «регульований електропривод»?
4. Як поділяються електроприводи в залежності від діапазону регулювання їх швидкості?
5. Як класифікуються електроприводи за ступенем автоматизації?
6. Які існують системи керування електроприводами?
7. Що визначають поняття регульований і нерегульований електропривод?
8. Перелічити основні системи автоматизованого електроприводу.

## ЛЕКЦІЯ 3

### МЕХАНІКА ЕЛЕКТРОПРИВОДУ

**План:**

**3.1 Основні закони механіки електроприводу.**

**3.2 Рівняння руху електропривода.**

**3.3 Наведена механічна ланка електроприводу.**

**3.4 Динамічні характеристики жорсткої механічної ланки.**

**3.5 Динамічні характеристики багатомасової механічної системи електропривода.**

**3.6 Динамічні характеристики механічної системи з підвішеним вантажем.**

#### 3.1 Основні закони механіки електроприводу

Призначення електроприводу – це створення руху робочих машин і керування ними. До параметрів руху відносяться (табл. 3.1):

Таблиця 3.1 – Параметри руху механізмів електропривода

Поступальний рух			Обертальний рух		
Параметр	Позначення	Розмірність	Параметр	Позначення	Розмірність
Шлях	$S$	м	Кут повороту	$\varphi$	радіан
Швидкість	$V = \frac{dS}{dt}$	м / с	Кутова швидкість (частота обертання)	$\omega = \frac{d\varphi}{dt}$	рад/с; 1/с
Прискорення	$a = \frac{dV}{dt} = \frac{d^2S}{dt^2}$	м / с <sup>2</sup>	Кутове прискорення	$\varepsilon = \frac{d\omega}{dt} = \frac{d^2\varphi}{dt^2}$	рад/с <sup>2</sup> ; 1/с <sup>2</sup>
Сила	$F$	Н	Обертаючий момент	$M = F \cdot R$	Н·м
Маса	$m$	кг	Момент інерції	$J$	кг м <sup>2</sup>

Зміна параметрів руху робочих органів машини відбувається при впливі на їх кінематичний ланцюг (механічну частину) сил  $F$ . Для обертального руху фізичним аналогом сили є момент  $M$  (Н·м).



Момент обертання створюється силою, прикладеною до плеча (плече – найкоротша відстань від осі обертання до лінії дії сили), наприклад, до радіусу барабана вантажопідйомної лебідки (рис. 3.1, *а*) або парою сил, що виникають в електродвигунах обертального руху (рис. 3.1, *б*).

Момент обертання  $M$ , що розвивається електродвигуном, може бути:

- позитивним, коли двигун працює в руховому режимі, перетворюючи електричну енергію в механічну;
- негативним (гальмівним), коли двигун працює в генераторному режимі або режимі противключення, перетворюючи механічну енергію в електричну.

Рух тіл механічних ланок або кінематичного ланцюга робочої машини підкоряється законам Ньютона.

**Перший закон Ньютона** – закон інерції. Для поступального руху цей закон говорить – кожне тіло зберігає стан спокою або прямолінійного рівномірного руху до тих пір, поки зовнішні сили не виведуть його з цього стану. Математичне формулювання цього закону:

$$\frac{dV}{dt} = 0, \quad \sum_1^i \vec{F}_i = 0. \quad (3.1)$$

На тіло діє декілька зовнішніх сил (сила, що створюється двигуном, сила тяжіння, сили тертя та інші). Для того, щоб тіло перебувало в стані спокою або прямолінійного рівномірного руху, необхідно, щоб сума векторів сил, діючих на тіло, була рівна нулю. Розглянемо сили, що діють на тіло, яке знаходиться на похилій площині (рис. 3.2).

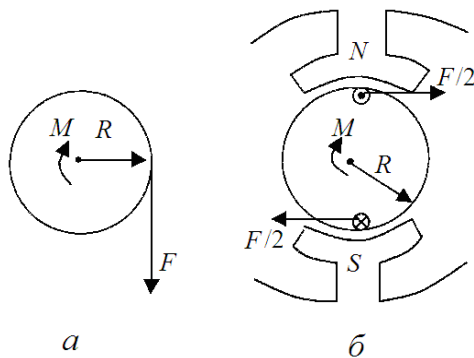


Рисунок 3.1 – Формування крутного моменту:

*а* – барабан вантажопідйомної лебідки;  
*б* – розподіл сил  $F$  при обертанні ротора двигуна;

$R$  – відстань (плече) від центру обертання до точки прикладання сили  $F$ ;  
 $N, S$  – постійні магніти;  
 $M$  – момент обертання

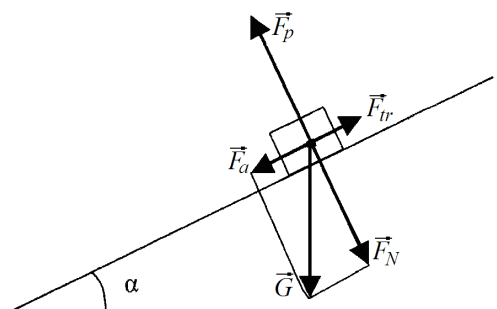


Рисунок 3.2 – Сили, що діють на тіло, які знаходяться на похилій площині

На тіло діють: сила тяжіння  $\overline{G}$ , яка може бути розкладена на силу  $\overline{F}_a$ , спрямовану по похилій площині, і нормальну силу  $\overline{F}_N$ , сила тертя  $\overline{F}_{tr}$ , спрямована проти сили  $\overline{F}_a$ , і сила реакції опори  $\overline{F}_p$  спрямована проти нормальної сили  $\overline{F}_N$ . Якщо  $\overline{G} + \overline{F}_p + \overline{F}_{tr} = 0$ , то тіло буде перебувати в стані спокою або рівномірного руху вниз по похилій площині. Якщо  $\overline{G} \cdot \sin \alpha < \overline{F}_{tr}$ , то тіло буде перебувати в стані спокою, тому що сили тертя не можуть створювати руху.

Стосовно до обертальному руху перший закон Ньютона може бути сформульований наступним чином: тіло, що має фіксовану вісь обертання, буде знаходитися в стані спокою або рівномірного обертання до тих пір, поки додані моменти не виведе його з цього стану, тобто:

$$\frac{d\omega}{dt} = 0 \quad \text{якщо} \quad \sum_1^i M_i = 0 \quad (3.2)$$

Розглянемо, які моменти можуть діяти на тіло обертання, наприклад, ротора електродвигуна:

- $M_{el}$  – електромагнітний момент, створюваний електродвигуном;
- $M_c$  – момент опору руху активний, струм, що прикладений до робочого органу машини (навантаження на валу). Цей момент створюється силами тяжіння (наприклад, в електроприводах вантажопідіймальних лебідок, ліфтів та ін.), силами вітру (наприклад, електропривод повороту баштових кранів), тиском стисненого повітря (електропривод компресорів) та ін. Моменти активного опору руху можуть, як перешкоджати руху, так і створювати рух. Тому знак може бути позитивним, якщо напрямок моменту збігається зі знаком, і негативним, якщо його напрямок протилежний знаку швидкості обертання;
- $M_{cp}$  – реактивні моменти опору руху, прикладаються до робочого органу машини. Ці моменти виникають, як реакція на рух робочого органу і завжди перешкоджають руху (наприклад, момент від сил різання в приводах головного руху металорізальних верстатів, момент від аеродинамічних сил в електроприводах вентиляторів та ін.), тобто при  $\omega = 0$ ;  $M_{cp} = 0$ ;
- $M_{tr}$  – момент від сил тертя в підшипниках та інші елементи кінематичного ланцюга робочої машини; момент тертя завжди перешкоджає руху; його відмінність від реактивного моменту опору полягає в тому, що  $M_{tr}$  присутня і при швидкості, яка дорівнює нулю; більш того  $M_{tr}$  при спокої зазвичай значно перевищує момент тертя при русі.

Знаки всіх моментів визначаються відносно знаку швидкості обертання: якщо момент сприяє руху – він позитивний, якщо перешкоджає – він від’ємний (негативний). Алгебраїчна сума всіх моментів визначає результуючий момент, що прикладений до валу електродвигуна.

**Другий закон Ньютона** – закон динаміки – для поступального руху – імпульс сили дорівнює зміні кількості руху

$$Fdt = d(mV) \quad (3.3)$$

*Імпульс сили* – це вектор, що дорівнює добутку сили на час її дії. *Кількість руху* – це вектор, що дорівнює добутку швидкості на масу тіла. Якщо маса постійна, то:

$$\overline{F} = m \frac{dV}{dt} = m\overline{a}, \quad (3.4)$$

де  $\overline{F} = \sum_1^i \overline{F}_i$  – сума векторів сил.

Цей закон встановлює, що якщо результуюча сила не дорівнює нулю, то тіло отримує прискорення (уповільнення), величина якого залежить від величини сили і часу її застосування.

Для обертального руху другий закон Ньютона формулюється наступним чином: імпульс моменту дорівнює зміні кількості руху:

$$M_{\Sigma} dt = d(J\omega) \quad (3.5)$$

Кількість руху – добуток моменту інерції обертючих мас на їх кутову швидкість.

Момент інерції  $J(\text{кгм}^2)$  – параметр, що аналогічний за змістом маси при поступальному русі, характеризує міру інерції тіл, що обертаються відносно фіксованої осі обертання. Момент інерції матеріальної точки з масою  $m$  дорівнює добутку маси на квадрат відстані від точки до осі обертання, тобто  $J = mR^2$ .

Момент інерції тіла є сума моментів інерції матеріальних точок, складових цього тіла. Він може бути виражений через масу тіла і його розміри. Значення моменту інерції для тіл обертання наводяться в каталогах і довідниках. Іноді в каталогах дається значення махового моменту  $GD^2$ . Тоді момент інерції визначається як:

$$J = \frac{GD^2}{4} \quad (3.6)$$

Механічна інерційність обертючої маси залежить не тільки від її величини, а й діаметра. При одній і тій же масі, тіло, що має більший діаметр, володіє

значно великим моментом інерції. Тому малоінерційні електродвигуни прагнуть конструювати з меншим діаметром ротора більшої довжини. Навпаки, коли до складу кінематичного ланцюга робочої машини включається маховик, його доцільно конструювати з великим діаметром.

Якщо момент інерції постійний, то рівняння другого закону Ньютона можна представити у вигляді

$$M_{\Sigma} = J \frac{d\omega}{dt} , \quad (3.7)$$

де  $M_{\Sigma}$  – алгебраїчна сума моментів, прикладених до тіла обертання.

**Третій закон Ньютона** – закон рівності дії і протидії – сили (моменти) з якими два тіла діють один на одного, рівні за величиною і протилежно спрямовані.

Цей закон пояснює, зокрема, дія реактивних сил (моментів) з опору руху. Наприклад, з якою силою різець впливає на оброблюваний метал, з такою ж силою, але протилежно спрямованої, метал впливає на різець, викликаючи появу на валу двигуна приводу різання реактивного моменту опору. Закон пояснює також наявність реакції опори. Саме в силу цього закону необхідно кріплення двигуна до фундаменту або станини. Якщо, наприклад, не закріпити статор двигуна фланцевого виконання, то під навантаженням його ротор не буде обертатися, а буде обертатися незакріплений статор.

### 3.2 Рівняння руху електропривода

Розглянемо рух електродвигуна, на валу якого додано: електромагнітний момент, що розвивається електродвигуном  $M$  і моменти опору руху, перераховані в п. 3.1.

Згідно другого закону Ньютона (3.7):

$$M + M_{ca} + M_{cp} + M_{tr} = J \frac{d\omega}{dt} . \quad (3.8)$$

З урахуванням правила визначення знаків:

$$M \mp M_{ca} - M_{cp} - M_{tr} = J \frac{d\omega}{dt} . \quad (3.9)$$

Знак моменту активного опору руху залежить від того, сприяє цей момент руху або перешкоджає. Наприклад, якщо двигун обертає вантажопідйомну лебідку і виробляє підйом вантажу, то  $M_{ca}$  буде негативним, якщо проводиться спуск вантажу, то  $M_{ca}$  – позитивний.

Позначивши суму моментів опору руху, як  $M_c$  – момент з опору руху або статичний момент на валу електродвигуна:

$$M_c = M_{ca} + M_{cp} + M_{tr} , \quad (3.10)$$

отримаємо

$$M - M_c = J_{\Sigma} \frac{d\omega}{dt} . \quad (3.11)$$

Це рівняння, що демонструє другий закон Ньютона, називають рівнянням руху електроприводу.

Зазначимо, що в цьому рівнянні всі моменти додані до валу двигуна, а момент інерції відображає інерційності всіх мас, пов'язаних з валом електродвигуна і вчиняють разом з ним механічний рух.

Для поступального руху рівняння руху електропривода

$$F - F_c = m \frac{dV}{dt} . \quad (3.12)$$

де  $F$  – зусилля, що розвивається двигуном;

$F_c$  – зусилля опору руху на штоку цього двигуна;

$m$  – маси рухомих елементів, що пов'язані зі штоком двигуна;

$V$  – лінійна швидкість штока двигуна.

### 3.3 Наведена механічна ланка електроприводу

Якщо робочий орган машини безпосередньо пов'язаний з валом електродвигуна, то для аналізу руху електромеханічної системи: двигун – робочий орган, можна користуватися рівнянням (3.11). Така кінематична схема використовується, наприклад, для вентиляторів, насосів і ряду інших машин. Однак у багатьох випадках робочий орган машини пов'язаний з валом електродвигуна через систему передач: зубчастих, канатних та інших. В цьому разі безпосереднє використання рівняння (3.11) неможливо, тому що моменти  $M_{el}$  і  $M_c$  прикладені до різних валів, а інерційні маси обертаються з різними швидкостями.

Для можливості використання рівняння руху виникає завдання приведення всіх моментів опору і моментів інерції окремих кінематичних ланок до одного валу, зазвичай до валу електродвигуна. Таке приведення є тільки розрахунковою операцією.

Принцип приведення моментів полягає в збереженні рівності потужностей. Приведення моментів інерції проводиться на основі принципу збереження кінетичної енергії (рис. 3.3).

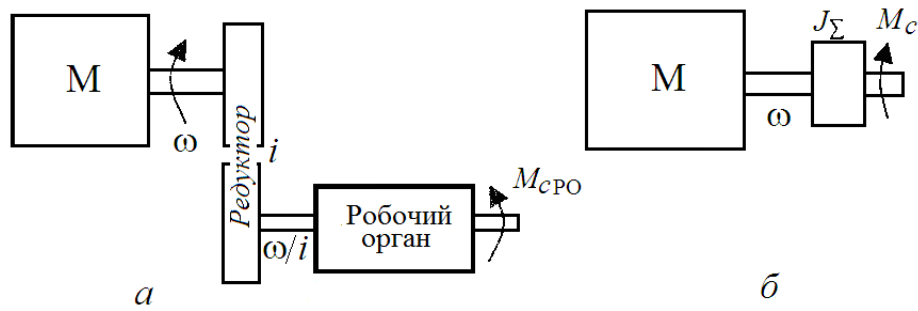


Рисунок 3.3 – Приведення моментів опору та інерції до валу двигуна: *а* – кінематична (реальна) схема з’єднання робочого органу з валом двигуна через редуктор; *б* – розрахункова схема з’єднання робочого органу з валом двигуна

Для приведення всіх моментів опору і моментів інерції окремих кінематичних ланок до валу двигуна необхідно виконання умови, що приводить до рівності потужностей:

$$M_{cPO} \cdot \omega_{PO} = M_c \cdot \omega, \quad (3.13)$$

де  $M_{cPO}$  – момент опору робочого органу;

$\omega_{PO}$  – кутова швидкість робочого органу;

$M_c$  – момент опору, приведений до валу електродвигуна;

$\omega$  – кутова швидкість обертання вала двигуна.

З урахуванням втрат в редукторі в рівняння (3.13) вводиться ККД ( $\eta$ ):

$$M_{cPO} \cdot \omega_{PO} = M_c \cdot \omega \cdot \eta_{red}. \quad (3.14)$$

Отже, якщо відомий статичний момент на валу  $M_{cPO}$ , то статичний момент, що приведений до валу двигуна, визначається за формулою:

$$M_c = \frac{M_{cPO}}{\omega/\omega_{PO} \cdot \eta_{red}} = \frac{M_{cPO}}{i \cdot \eta_{red}}, \quad (3.15)$$

що є загальним правилом приведення статичного моменту вала двигуна і реального статичного моменту на валу  $M_{cPO}$  робочого органу.

Для приведення моменту інерції робочого органу  $J_{PO}$  до валу двигуна необхідно дотримуватися рівності кінетичних енергій:

$$\frac{J_{PO} \cdot \omega_{PO}^2}{2} = \frac{J_{PO} \cdot \omega^2}{2}. \quad (3.16)$$

Отже, наведений до валу двигуна момент інерції робочого органу визначається за формулою:

$$J'_{PO} = \frac{J_{PO}}{i^2}. \quad (3.17)$$

В результаті приведення статичного моменту та моменту інерції до валу двигуна замість реальної кінематичної схеми отримуємо розрахункову (див. рис. 3.3, б), на підставі якої можна користуватися рівнянням руху електроприводу.

$$M - M_c = (J_{rot} + J'_{PO}) \cdot \frac{d\omega}{dt} \quad \text{або} \quad M - M_c = J_{\Sigma} \frac{d\omega}{dt}, \quad (3.18)$$

де  $J_{rot}$  – момент інерції ротора двигуна.

У деяких кінематичних схемах робочих машин присутні ланки з поступальним рухом. Розглянемо такий випадок на прикладі кінематичної схеми вантажопідійомної лебідки (рис. 3.4).

Статичний момент (активний) створюється силою ваги вантажу на гаку лебідки  $G = m_g \cdot g$ .

Цей момент прикладається до валу барабана лебідки і дорівнює:

$$M_{c(bap)} = m_g \cdot g R_{bap}, \quad (3.19)$$

де  $R_{bap}$  – радіус барабану.

Для того, щоб привести статичний момент на валу двигуна для випадку підйому вантажу, необхідно скористатися формулою (3.16):

$$M_c = \frac{M_{c(bap)}}{i \cdot \eta_{red}} = \frac{m_g \cdot g R_{bap}}{i \cdot \eta_{red}}. \quad (3.20)$$

При цьому наведений статичний момент для режимів підйому і спуску вантажу буде різним.

При підйомі вантажу наведений до валу двигуна статичний момент буде дещо більше, що пов'язано з подоланням двигуна моменту опору  $M_{tr}$  за рахунок сил тертя. При спуску вантажу, наведений до валу двигуна момент опору буде трохи менше, тому що сили тертя діють згідно з гальмівним моментом двигуна.

Тому при спуску вантажу момент опору визначається як:

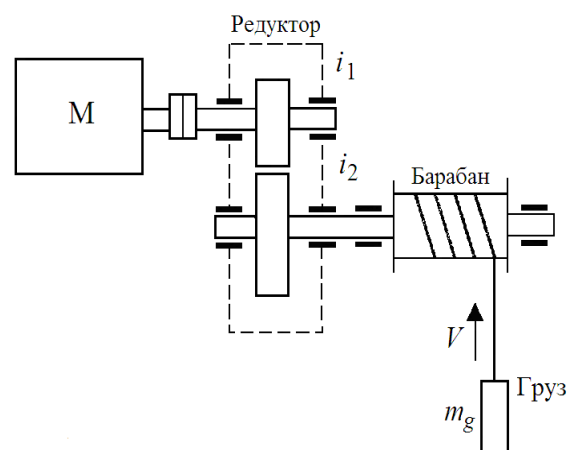


Рисунок 3.4 – Кінематична схема вантажопідійомної лебідки

$$M_c = \frac{M_{c(bap)}}{i} \cdot \eta_{nep}. \quad (3.21)$$

Слід зауважити, що ця особливість проявляється лише у разі приведення активного статичного моменту.

Для знаходження сумарного моменту інерції механічної системи скористуємося формулою (3.20) та принципом рівності кінетичних енергій:

$$\frac{m_g \cdot V^2}{2} = \frac{J_g \cdot \omega^2}{2}, \quad (3.22)$$

де  $J_g$  – момент інерції маси вантажу  $m_g$  лінійно рухається зі швидкістю  $V$  приведений до обертальному руху зі швидкістю вала двигуна  $\omega$ .

Якщо  $V = \omega_{bap} \cdot R_{bap}$ , то

$$J_g = \frac{m_g \cdot R_{bap}^2}{i^2}. \quad (3.23)$$

В результаті приведення сумарний приведений до валу двигуна момент інерції розглянутої системи дорівнює:

$$J_{\Sigma} = J_{rot} + J_{i1} + \frac{J_{i2} + J_{bap} + m_g \cdot R_{bap}^2}{i^2}, \quad (3.24)$$

де  $J_{i1}$ ,  $J_{i2}$  – моменти інерції редуктора з передавальними ланками  $i1$  та  $i2$ .

Таким чином, рівняння руху електроприводу для режиму підйому вантажу являє собою:

$$M_{el} - \frac{m_g \cdot g \cdot R_{bap}}{i \cdot \eta_{red}} = \left( J_{rot} + J_{i1} + \frac{J_{i2} + J_{bap} + m_g \cdot R_{bap}^2}{i^2} \right) \cdot \frac{d\omega}{dt}. \quad (3.25)$$

Дане рівняння застосовується для розрахунку параметрів при підйомі вантажів.

### 3.4 Динамічні характеристики жорсткої механічної ланки

Механічна частина електропривода включає в себе: ротор (якір) електродвигуна, робочий орган машини і систему механічних передач та трансмісій. Якщо всі елементи механічної частини у всіх рухах мають рівну або пропорційну швидкість (обертання або лінійну), то така механічна система може розглядатися як жорстка. У цьому випадку, користуючись формулами приведення параметрів до валу двигуна, можна розглядати систему як жорстка механічна ланка з загальним приведеним моментом інерції  $J_{\Sigma}$ .

Для аналізу динамічних характеристик системи скористаємося рівнянням (3.11) руху електроприводу. Таку механічну систему називають одномасовою.

В операторній формі рівняння (3.8) має вигляд:

$$M(p) - M_c(p) = J_{\Sigma} p \cdot \omega(p) \quad (3.26)$$



Об'єктами регулювання швидкості механічної системи є:

– механічна ланка електроприводу, що характеризується наведеним моментом інерції  $J_{\Sigma}p$ ;

– вихідний параметр (швидкість  $\omega$ ) жорсткої механічної ланки;

– керуючий вплив (момент обертання двигуна  $M$ );

– збуджуючий вплив (статичний момент  $M_c$ ).

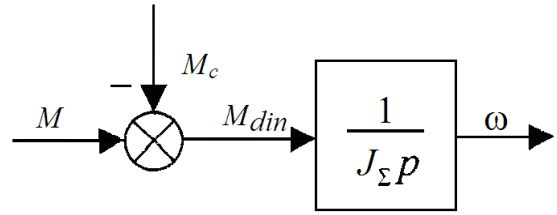


Рисунок 3.5 – Структурна схема жорсткої механічної ланки

Структурна схема механічної жорсткої ланки показана на рисунку 3.5.

Передатна функція жорсткої механічної ланки визначається з рівняння (3.26):

$$W_{M \rightarrow \omega}(p) = \frac{\omega(p)}{M_{din}(p)} = \frac{1}{J_{\Sigma}p} . \quad (3.27)$$

Цієї ланки відповідає диференційне рівняння:

$$M(t) - M_c(t) = M_{din}(t) = J_{\Sigma} \frac{d\omega}{dt} , \quad (3.28)$$

яке відображає другий закон Ньютона. Результуючий момент (різниця моментів: двигуна  $M(t)$  і статичного  $M_c(t)$ ), струм, що прикладений до інерційної маси  $J_{\Sigma}p$ , називають динамічним моментом  $M_{din}(t)$ .

Таким чином, механічна частина електропривода, якщо вона представлена жорсткою наведеною механічною ланкою, має динамічну характеристику інтегруючої ланки. Якщо результуючий динамічний момент на вході механічної ланки (див. рис. 3.5) дорівнює нулю, то механічна система перебуває в стані рівномірного руху, в окремому випадку – в стані спокою (перший закон Ньютона).

Інтегруюча ланка має властивість «запам'ятовування». Якщо на вході ланки  $M_{din} = 0$  – це не означає, що кутова швидкість  $\omega = 0$ . Визначити по вхідному сигналу величину вихідного, в даному випадку, не можна. Для цього необхідно знати ту швидкість, яку мала інерційна маса  $J_{\Sigma}$  до того, як  $M_{din} = 0$ . Якщо величина  $M_{din} = const$  позитивна, то швидкість переходу механічної ланки (з часом  $t$ ) лінійно зростає з постійним кутовим прискоренням  $\varepsilon = \frac{M_{din}}{J_{\Sigma}}$ .

Прискорення механічної ланки буде тривати до тих пір, поки  $M_{din}$  не стане

рівним нулю. При від'ємному (негативному) значенні  $M_{din}$  механічна ланка буде сповільнюватися (якщо початкова швидкість  $\omega_0$  не дорівнює нулю).

Рішенням диференційного рівняння (3.28) для випадку за умови:  $M_{din}(t) = const$ ;  $M(t) = const$ ;  $M_c(t) = const \in$  визначення кутової швидкості

$$\omega = \omega_0 \pm \varepsilon t, \quad (3.29)$$

Формула (3.29) відображає перехідну функцію механічної жорсткої ланки, показаної на рисунку 3.6.

Якщо електромагнітний момент  $M = M_{el}$  двигуна лінійно змінюється зі зміною швидкості:

$$M_{el} = \beta(\omega_0 - \omega), \quad (3.30)$$

а статичний момент  $M_c(t) = const$ , то рівняння (3.28) має вигляд.

$$\beta(\omega_0 - \omega) - M_c = J_{\Sigma} \frac{d\omega}{dt}, \quad (3.31)$$

що відповідає характеристиці, показаної на рисунку 3.7 (де  $\beta$  – коефіцієнт тертя).

У розглянутому випадку залежність зміни кутової швидкості від часу  $\omega = f(t)$  має характер експоненти (див. рис. 3.7).

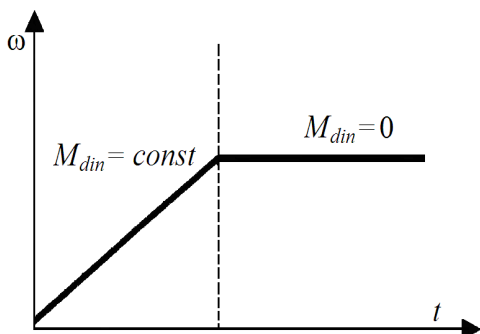


Рисунок 3.6 – Перехідна характеристика механічної жорсткої ланки

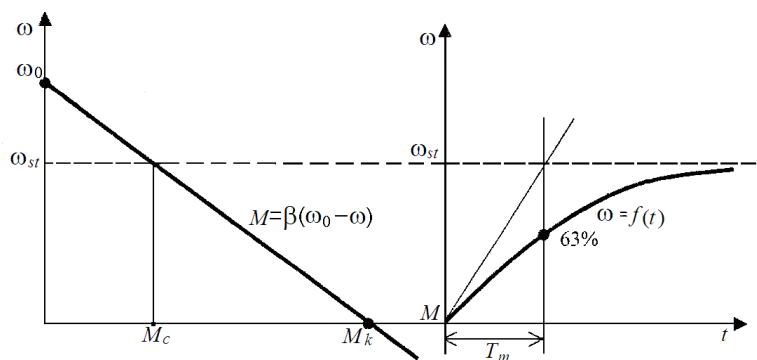


Рисунок 3.7 – Перехідна характеристика механічної ланки при лінійно змінному динамічному моменті

Після приведення рівняння до канонічного виду отримаємо:

$$T_m \frac{d\omega}{dt} - \omega = \omega_{st}, \quad \omega_{st} = \omega_0 - \frac{M_c}{\beta} = \omega_0 - \Delta \omega_c \quad (3.32)$$

де  $\omega_{st}$  – стале значення кутової швидкості механічної ланки;

$T_m$  – електромеханічна постійна часу (с):  $T_m = \frac{J}{\beta}$ .

У початковий момент часу прискорення двигуна буде найбільшим, рівним  $\varepsilon_0 = \frac{\beta \omega_0}{J_\Sigma} = \frac{\omega_0}{T_m}$ . По мірі зменшення динамічного моменту прискорення буде зменшуватися: коли момент двигуна і статичний момент зрівняються, прискорення буде дорівнювати нулю, і механічна ланка буде обертатися з постійною швидкістю. За час  $T_m$  швидкість двигуна збільшується на 63% від її сталого значення (див. рис. 3.7). Протягом постійної часу  $T_m$  механічна ланка розганяється від нульової до усталеної швидкості під дією  $M_{din} = const$  і рівного моменту при нульовій швидкості.

Таким чином, величина  $T_m$  характеризує динамічні властивості механічної ланки. Для одного і того ж двигуна, що має лінійну характеристику залежності моменту двигуна від швидкості  $\omega = f(t)$ , розглянемо, для прикладу, три процеси (рис. 3.8), при яких, відповідно, будуть змінюватися і кутові швидкості від  $\omega_0$  до  $\omega_{st}$ . При цьому характерно те, що час розгону двигуна при холостому ході і під навантаженням, а також час переходу з однієї швидкості на іншу при зміні навантаження виявляються рівними і становлять приблизно  $(3 - 4)T_m$ .

У зв'язку з тим, що  $T_m = \frac{J_\Sigma}{\beta}$  є важливим для оцінки динамічних властивостей механічної ланки електроприводу, то його передатну функцію у відповідності з рівнянням (3.15) представляють:

$$W_{M \rightarrow \omega}(p) = \frac{1/\beta}{T_m p} = \frac{K_d}{T_m p} \quad (3.33)$$

Таким чином, для визначення динамічних характеристик механічної жорсткої ланки необхідно розрахувати параметри, від яких залежить його рух і, відповідно, керування рухом.

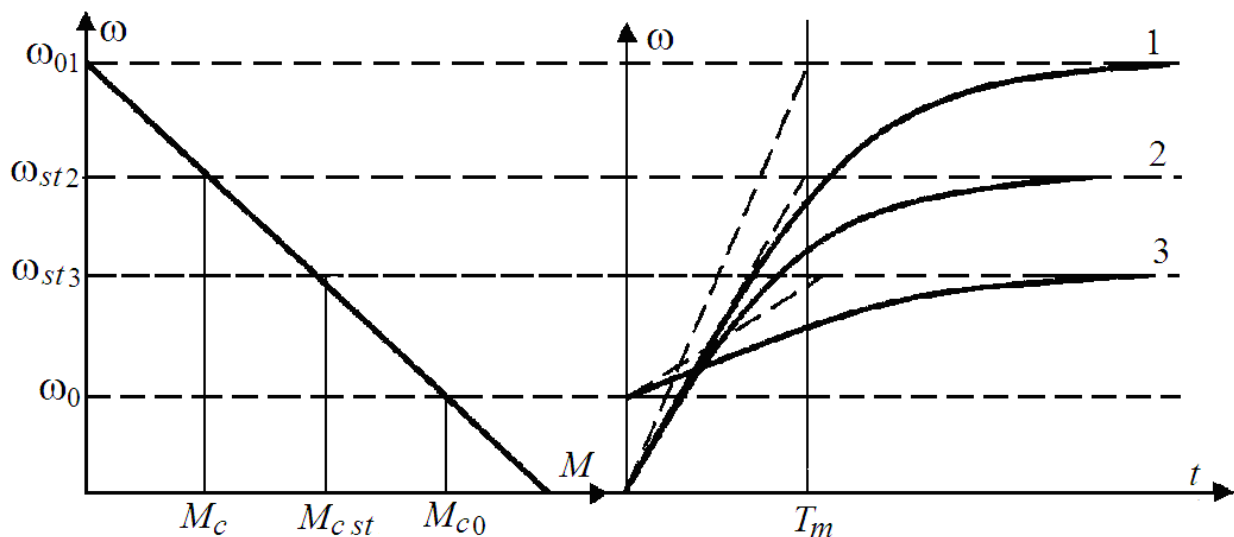


Рисунок 3.8 – Перехідні характеристики механічної ланки в трьох випадках:

1 – розгін двигуна при холостому ході ( $M_c = 0$ ); 2 – розгін двигуна при статичному моменті ( $M_c$ ); 3 – період зміни статичного моменту від початкового значення  $M_{c0}$  до кінцевого значення  $M_{cst}$ .

### 3.5 Динамічні характеристики багатомасової механічної системи електропривода

У багатьох випадках кінематична схема робочої машини містить пружні елементи: довгі вали, пружні муфти, канатні передачі тощо.

В реальних схемах іноді доводиться враховувати люфти і зазори в зубчастих передачах і з'єднаннях. У цих випадках кінематичну схему можна розглядати як жорстку одномасову систему. Особливо це стосується високоточних електроприводів і електроприводів, що працюють в інтенсивних динамічних режимах.

Механічні системи, в яких присутні явно виражені пружні ланки, зазвичай призводять до двомасової або тримасової механічних систем. Розглянемо двомасову електромеханічну схему електропривода (рис. 3.9).

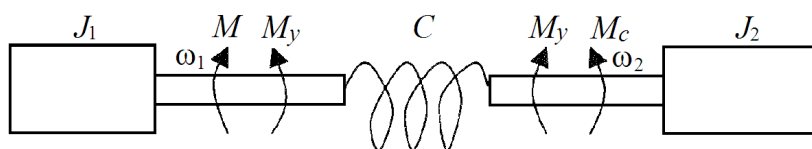


Рисунок 3.9 – Двомасова кінематична схема системи з пружним зв'язком

В нерозгалуженій кінематичній схемі зазвичай виділяють ротор двигуна і жорстко пов'язані з ним елементи кінематичного ланцюга. Наводячи моменти інерції цих ланок до швидкості вала двигуна, отримаємо першу масу  $J_1$ . Ця маса

пов'язана за допомогою пружного елемента, що має жорсткість  $C$ , з другої масою  $J_2$ , яку утворюють моменти інерції робочого органу і жорстко пов'язаних з ним інших елементів кінематичного ланцюга електропривода.

Для складання розрахункової механічної схеми електроприводу всі моменти інерції ланок, а також додані до них моменти опору руху  $M_c$ , пружність елементів і величини зазорів повинні бути приведені до швидкості вала двигуна. В пружному елементі виникають пружні моменти  $M_y$  (зусилля), які виражаються законом Гука:

Для обертового руху:

$$M_y = C_y \cdot \Delta\varphi, \quad (3.34)$$

де  $C_y$  – жорсткість пружного елемента, Н/рад;

$\Delta\varphi$  – кут закручування елемента (наприклад, торсіона), рад.

Для поступального руху пружна сила

$$F_y = C_y \cdot \Delta l, \quad (3.35)$$

де  $\Delta l$  – розтягнення елемента, м (при цьому  $C$  має розмірність Н/м).

Потенційна енергія при деформації елементів для обертового і поступального їх руху визначається як:

$$W_p = \frac{C \cdot \Delta\varphi^2}{2}; \quad W_p = \frac{C \cdot \Delta l^2}{2}. \quad (3.36)$$

Для приведення жорсткості елемента до валу двигуна використовується принцип рівності потенційних енергій:

$$C' = \frac{C}{i^2}, \quad (3.37)$$

де  $C'$  – приведена жорсткість елемента до валу двигуна.

Якщо елемент пов'язаний з поступальним рухом, то його жорсткість наводиться за формулою:

$$C' = \frac{C}{(\Delta\varphi/\Delta l)^2} \quad (3.38)$$

Будемо вважати (див. розрахункову схему рис. 3.9), що всі елементи кінематичного ланцюга електропривода приведені за своїми параметрами до валу двигуна і розділені на дві маси  $J_1$  і  $J_2$ , що пов'язані між собою пружним елементом з жорсткістю  $C_y$ .

До першої маси прикладений момент двигуна  $M$ , до другої – статичний момент опору  $M_c$ .

Якщо загальмувати другий вал, то можливо обертання першого валу в межах, що визначаються діапазоном пружної деформації елемента  $C_y$ . Якщо загальмувати перший вал, то можливо, з урахуванням зазначеного обмеження, обертання другого валу.

Таким чином, на відміну від одномасової жорсткої механічної системи двомасова система володіє двома ступенями рухливості.

При аналізі механічних систем з двома та більшими ступенями рухливості доцільно користуватися математичним апаратом, що визначається другим рівнянням Лагранжа:

$$\frac{d}{dt} \left( \frac{\partial L}{\partial \dot{q}_i} \right) - \frac{\partial L}{\partial q_i} = Q_i \quad (3.39)$$

де  $q_i$  – переміщення (кут повороту по кожній з  $i$ -ої ступені рухливості);

$\dot{q}_i$  – швидкість переміщення (кутова швидкість по кожній координаті переміщення);

$Q_i$  – зовнішні сили, що діють у кожному ступені рухливості системи;

$L$  – функція Лагранжа, що дорівнює різниці кінетичної і потенційної енергій даної механічної системи, тобто  $L = W_k - W_p$ .

Розглянемо опис двомасової механічної системи з пружною ланкою на основі рівняння (3.39):

$$L = \frac{J_1 \omega_1^2}{2} + \frac{J_2 \omega_2^2}{2} - \frac{C(\varphi_1 - \varphi_2)}{2}. \quad (3.40)$$

Оскільки система володіє двома ступенями рухливості, то отримаємо на основі (3.39) два рівняння.

Частинні похідні від функції  $L$  з кутовими швидкостями  $\omega_1$  і  $\omega_2$ , що дорівнюють:

$$\frac{\partial L}{\partial \omega_1} = J_1 \omega_1; \quad \frac{\partial L}{\partial \omega_2} = J_2 \omega_2. \quad (3.41)$$

Відповідно, похідні за часом від цих величин визначаються як:

$$\frac{d}{dt} \left( \frac{\partial L}{\partial \omega_1} \right) = J_1 \frac{d\omega_1}{dt}; \quad \frac{d}{dt} \left( \frac{\partial L}{\partial \omega_2} \right) = J_2 \frac{d\omega_2}{dt}. \quad (3.42)$$

Частинні похідні від функції  $L$  по куту закручування  $\varphi_1$  і  $\varphi_2$  визначаються як:

$$\frac{\partial L}{\partial \varphi_1} = -C(\varphi_1 - \varphi_2); \quad \frac{\partial L}{\partial \varphi_2} = C(\varphi_1 - \varphi_2). \quad (3.43)$$

Підставляючи знайдені похідні в (3.29), отримаємо два диференціальних рівняння, що описують рух двомасової системи.

$$M - C(\varphi_1 - \varphi_2) = J_1 \frac{d\omega_1}{dt} ; \quad C_y(\varphi_1 - \varphi_2) - M_c = J_2 \frac{d\omega_2}{dt} , \quad (3.44)$$

де  $C_y(\varphi_1 - \varphi_2) = M_y$  – момент пружної ланки.

Фізичний зміст рівнянь (3.44) пояснюється наступним чином (див. рис. 3.29). Момент обертання  $M$  на валу двигуна прикладається до лівого кінця пружного елемента, викликаючи його закручування, що визначає появу пружного моменту  $M_y$ . Різниця моментів  $M - M_y = M_{din1}$  прикладається до першої маси  $J_1$ , визначаючи зміну швидкості її руху.

Таким чином, перший вираз з рівнянь (3.44) – це рівняння руху електроприводу для першої маси ланки робочого органу.

На другому кінці пружної ланки, які прагнуть розкритися, створюється момент  $M_y$ , який є рушійним моментом для другої маси – робочого органу машини. Цьому моменту перешкоджає момент опору руху  $M_c$ , що прикладений до робочого органу. Різниця моментів  $M_y - M_c = M_{din2}$  визначає зміну кутової швидкості другої маси ланки.

Таким чином, другий вираз з рівнянь (3.44) є рівняння руху електроприводу для другої маси робочого органу.

Вирішуючи спільно рівняння (3.44) і враховуючи, що

$$\frac{d\omega_1}{dt} = \frac{d^2\varphi_1}{dt^2} ; \quad \frac{d\omega_2}{dt} = \frac{d^2\varphi_2}{dt^2} , \quad (3.45)$$

визначається загальне рівняння коливальної системи електроприводу:

$$\frac{J_1 J_2 d^2 \Delta \varphi}{C(J_1 + J_2) dt^2} + \Delta \varphi = \frac{M J_2 + M_c J_1}{C(J_1 - J_2)} , \quad (3.46)$$

де  $\Delta \varphi = \varphi_1 - \varphi_2$  – кут закручування.

Ліва частина рівняння (3.46) являє собою рівняння ідеальної коливальної ланки  $T^2 \Delta \varphi'' + \Delta \varphi = 0$ , яка має період власних коливань  $T = \sqrt{\frac{J_1 \cdot J_2}{C(J_1 + J_2)}}$  частоту власних коливань :

$$\Omega = \sqrt{\frac{C(J_1 + J_2)}{J_1 \cdot J_2}} . \quad (3.47)$$

Рішення рівняння (3.46) являє собою перехідну функцію двомасової механічної ланки з пружністю. При цьому кут закручування  $\Delta\varphi = A\sin(\Omega t + \Psi) + B$ , де позначення  $A, B, \Psi$  – періодичні складові, які характеризують коливальний контур перехідних процесів механічної системи електроприводу.

Таким чином, в першому наближенні якщо ми не враховуємо внутрішні втрати енергії на тертя, пружну деформацію тощо), то двомасова механічна система, як об'єкт регулювання, що являє собою коливальний ланка. Це означає, що якщо ми докладемо до системи постійний момент (наприклад, при пуску двигуна), то механічна система буде мати незатухаючі коливання швидкості близько деякого її значення, який визначається середнім прискоренням (рис. 3.10, а):

$$\frac{d\omega_{cp}}{dt} = \frac{M - M_c}{J_1 + J_2} \quad (3.48)$$

При обліку в'язкого тертя коливання в двомасової механічної системі будуть носити затухаючий характер (рис. 3.10, б).

Енергетичні коливання розглянутої механічної системи пов'язано з тим, що періодично кінетична енергія обертових мас переходить в потенційну енергію, яка запасається в пружному елементі.

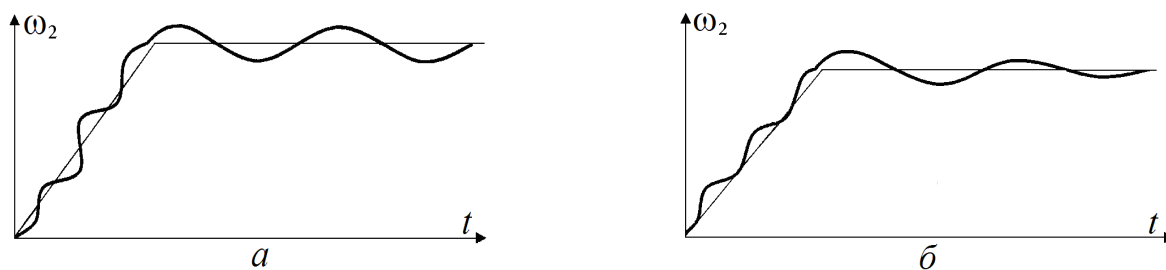


Рисунок 3.10 – Перехідні характеристики двомасової механічної системи з пружним зв'язком при відсутності (а) і наявності (б) внутрішнього демпфірування

На основі рівнянь (3.44), висловивши їх в операторній формі, можна скласти структурну схему двомасової механічної системи з пружною ланкою (рис. 3.11, а). При цьому враховується, що момент механічного пружної ланки дорівнює:

$$M_y = C \int (\omega_1 - \omega_2) \cdot dt \quad (3.49)$$



Для того, щоб отримати передавальну функцію двомасової системи як об'єкта регулювання, проведемо перетворення структурної схеми, як показано на рисунку 3.11, б, в.

Звідси в операторній формі отримуємо зміну енергії в системі електроприводу:

$$W(p) = \frac{\omega_2(p)}{M(p)} = \frac{1}{(J_1 + J_2)p} \cdot \frac{1}{1 + \frac{J_1 J_2}{C(J_1 + J_2)} \cdot p^2} = \frac{1}{J_{\Sigma} p} \cdot \frac{1}{T^2 p^2 + 1} \quad (3.50)$$

Таким чином, двомасовая механічна система при відсутності внутрішніх втрат (внутрішнього демпфування) може бути інтерпретована двома послідовно з'єднаними динамічними ланками: інтегруючої та коливальної (див. рис. 3.10, а).

Якщо жорсткість  $C$  пружної ланки достатньо велика, то механічна система може вважатися жорсткою і приводиться до одномасової механічної ланці. При зростанні  $C$  другий член виразу (3.50) прагне до одиниці.

Важливий практичний висновок з аналізу динамічних властивостей двомасової механічної системи полягає в наступному. Якщо в складі моменту двигуна  $M = A + B \sin \Omega t$  або в складі статичного моменту  $M_c = A_1 + B_1 \sin \Omega t$  присутня періодична складова з частотою, близькою до частоти  $\Omega$  власних коливань механічної системи, то в системі виникають коливання із зростаючою амплітудою (явище резонансу), що може порушити роботу механізму і привести до його поломки.

Тому, при конструюванні електромеханічних систем електроприводу, схильних до коливань, необхідно визначити власну частоту коливань  $\Omega$  механічної системи і проаналізувати, коливання зі сторони привода (момент  $M$ ) або механізму (момент  $M_c$ ), що виникають з частотою, близькою до  $\Omega$ .

У разі такого збігу слід змінити значення частоти власних коливань механічної системи електропривода шляхом зміни співвідношення моментів інерції  $J_1$  і  $J_2$ .

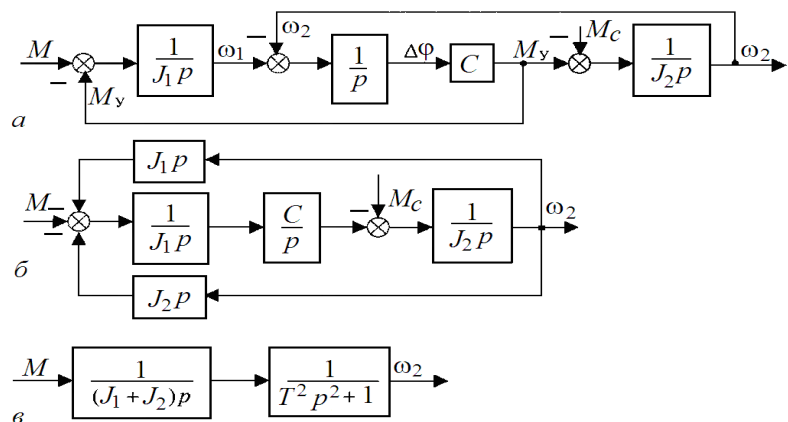


Рисунок 3.11 – Структурна схема двомасової механічної системи з пружним зв'язком без демпфування (а) і її перетворення (б) – (в)

В реальних механічних системах завжди присутнє внутрішнє демпфірування, що визначається в'язким тертям (див. рис. 3.10, б) і втратами при деформації пружного елемента [2]. Момент сил в'язкого тертя пропорційна швидкості. З урахуванням цих сил система рівнянь (3.44) прийме вигляд:

$$M - C(\varphi_1 - \varphi_2) - \beta_1 \dot{\varphi}_1 = J_1 \frac{d\omega_1}{dt}; \quad (3.51)$$

$$C(\varphi_1 - \varphi_2) - M_c - \beta_2 \dot{\varphi}_2 = J_2 \frac{d\omega_2}{dt}, \quad (3.52)$$

де  $\beta_1$  і  $\beta_2$  – коефіцієнти в'язкого тертя на відповідних валах механічної системи електроприводу.

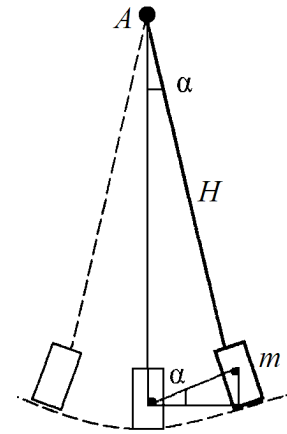


Рисунок 3.12 – Коливання вантажу, що підвішений на канаті

В загальному вигляді [1–2] механічна частина електромеханічної системи являє собою багатомасову систему з пружними ланками і нелінійностями, зумовленими наявністю зазорів і в'язкого тертя. Найчастіше при аналізі механічних систем немає необхідності в повному обліку всіх факторів. У тих же випадках, особливо в прецизійних системах, коли необхідний повний облік нелінійностей системи і внутрішнього демпфування доцільно використовувати математичне моделювання механічної системи із застосуванням обчислювальної техніки.

### 3.6 Динамічні характеристики механічної системи з підвішеним вантажем

Необхідність розгляду механічної системи як двомасової може виникнути не тільки при наявності в кінематичній схемі електропривода пружних елементів, але і в тому випадку, коли механічна система включає в себе вантаж, що підвішений на канаті. Розглянемо таку систему на прикладі механізму повороту баштового крана (рис. 3.12).

Вантаж масою  $m$  (див. рис. 3.12) підвішений через шків  $A$  на канаті довжиною  $H$ . Стріла крана довжиною  $R$  обертається в горизонтальній площині. При розгоні стріли вантаж буде відставати від обертального руху стріли, а при уповільненні – випереджати стрілу. При рівномірному русі стріли вантаж буде здійснювати коливальні рухи. При зупинці стріли вантаж буде розгойдуватися, що несприятливо позначається на керуванні краном. Щоб уникнути цього

явища в системі керування електроприводом повороту крана передбачаються спеціальні заходи.

Для опису руху механічної системи, показаної на рисунку 3.12, скористаємося методом, викладеним у попередньому пункті 3.5.

Функція Лагранжа для даної системи електропривода визначається як:

$$L = W_k - W_p = \frac{J_k \omega_1^2}{2} + \frac{m V_g^2}{2} - mgH\alpha \cdot \sin \alpha, \quad (3.53)$$

де  $J_k$  – момент інерції крана;

$\omega_1$  – кутова швидкість обертання стріли крана;

$\omega_2$  – кутова швидкість коливань каната відносно точки  $A$ ;

$V_g$  – лінійна швидкість вантажу (дотична по відношенню до кола його обертання), тобто  $V_g = \omega_1 R + \omega_2 H$ .

Вважаючи, що  $\sin \alpha \approx \alpha$ , визначимо функцію Лагранжа:

$$L = \frac{J_k \omega_1^2}{2} + \frac{m(\omega_1 R + \omega_2 H)^2}{2} - mgH\alpha^2. \quad (3.54)$$

Тому що вантаж здійснює рух у двох координатах: обертальний щодо вертикальної осі крана і коливальний щодо вертикальної лінії схилу каната, то необхідно скласти два рівняння Лагранжа для кожної з координат.

Знайшовши частинні похідні:  $\frac{\partial L}{\partial \omega_1}$ ;  $\frac{\partial L}{\partial \omega_2}$ ;  $\frac{\partial L}{\partial \alpha}$  і підставивши їх у рівняння (3.39) отримаємо систему з двох рівнянь, що характеризують рух вантажу:

$$\begin{aligned} (J_k + mR^2) \cdot \frac{d\omega_1}{dt} + mRH \cdot \frac{d\omega_2}{dt} &= M - M_c; \\ mRH \cdot \frac{d\omega_1}{dt} + mH^2 \cdot \frac{d\omega_2}{dt} + 2mgH\alpha &= 0, \end{aligned} \quad (3.55)$$

де  $M$  – момент на валу двигуна при повороті стріли крана;

$M_c$  – момент опору руху стріли крана.

Маючи на увазі, що  $\omega_2 = \frac{d\alpha}{dt}$ , і вирішивши систему рівнянь (3.55)

відносно  $\omega_2$ , отримаємо рівняння коливання вантажу системи:

$$T^2 \frac{d^2 \alpha}{dt^2} + \alpha = -\frac{R(M - M_c)}{2g(J_k + mR^2)}. \quad (3.56)$$

Період коливань вантажу, підвішеного на канаті визначається як:

$$T = \sqrt{\frac{H}{2g} \cdot \left(1 - \frac{mR^2}{J_k}\right)}. \quad (3.57)$$

Таким чином, показану методику розрахунку параметрів можна використовувати для двомасової механічної системи повороту механізму баштового крана або подібних пристроїв.

### Контрольні питання

1. Що є основними параметрами руху механізму електроприводу?
2. Перелічити основні закони механіки електроприводу.
3. По якому принципу відбувається приведення моментів інерції та опору до валу двигуна?
4. Які існують види схем для розглядання руху електропривода?
5. Які параметри входять до рівняння руху електроприводу при підйомі вантажу?
6. Чим характеризується механічна ланка електроприводу?
7. Що входить до структурної схеми жорсткої механічної ланки?
8. Які існують характеристики перехідної механічної ланки електроприводу?
9. Перелічити основні параметри пружних двомасових механічних систем.
10. Проаналізувати особливості механічної системи, яка включає в себе вантаж, що підвішений на канаті.

## ЛЕКЦІЯ 4

### ЕЛЕКТРИЧНІ МАШИНИ ПОСТІЙНОГО СТРУМУ ДЛЯ АВТОМАТИЗОВАНИХ СИСТЕМ

**План:**

**4.1 Класифікація електричних машин.**

**4.2 Основні елементи машин постійного струму та їх принцип дії.**

**4.3 Способи регулювання швидкості обертання електродвигунів постійного струму.**

До основного обладнання автоматизованого електроприводу відносяться електричні машини постійного та змінного струму), що сприяють перетворенню енергій і руху (переміщення) робочих механізмів. Розглянемо основні елементи електричних машин постійного струму автоматизованого електроприводу.

#### 4.1 Класифікація електричних машин

Основу будь-якого автоматизованого електроприводу складають електродвигуни, що забезпечують виконання безлічі операцій в електротранспортних засобах (трамваях, тролейбусах, метро, потягах), в промисловості, в електропобутових приладах, на електростанціях і підстанціях.

Конструкції електричних машин класифікуються наступним чином (рис. 4.1).

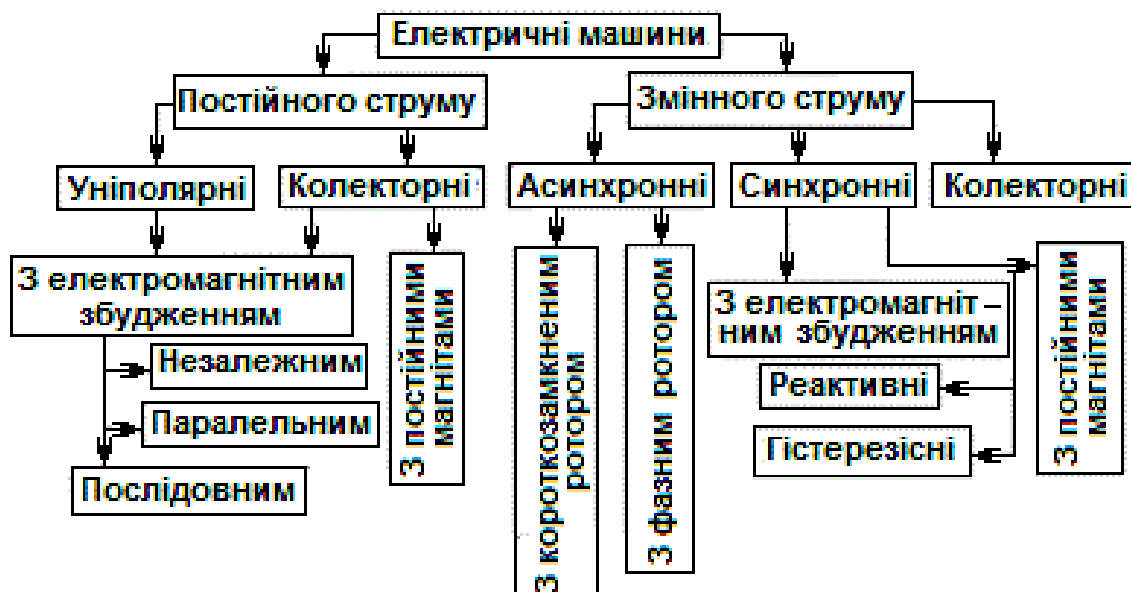


Рисунок 4.1 – Класифікація електричних машин

Машина постійного струму (МПС) – це оборотний електромеханічний перетворювач енергії, який може використовуватися як в генераторному, так і в руховому режимі. Зовнішній електричний ланцюг цієї машини є ланцюгом постійних значень струму і напруги, що і є основою для її назви, рисунку 4.2.

Потужність МПС коливається від рівня одиниць Вт до порядку десяти тисяч кВт. Їх частота обертання знаходиться в діапазоні від одиниць об/хв до десятки тисяч об/хв і більше. Тому МПС умовно поділяються на малі, середні і великі потужності (випускаються за спеціальним замовленням).



Рисунок 4.2 – Загальні відомості про машини постійного струму

## 4.2 Основні елементи машин постійного струму та їх принцип дії

Значне місце в системі електроприводу займають електричні машини постійного струму, які працюють в режимі двигунів з перевантаженням і частими пусками, реверсами, а також регулюванням швидкості в широкому діапазоні. Основні елементи конструкцій МПТ та їх принцип дії показано на рисунку 4.3 і рисунку 4.5.

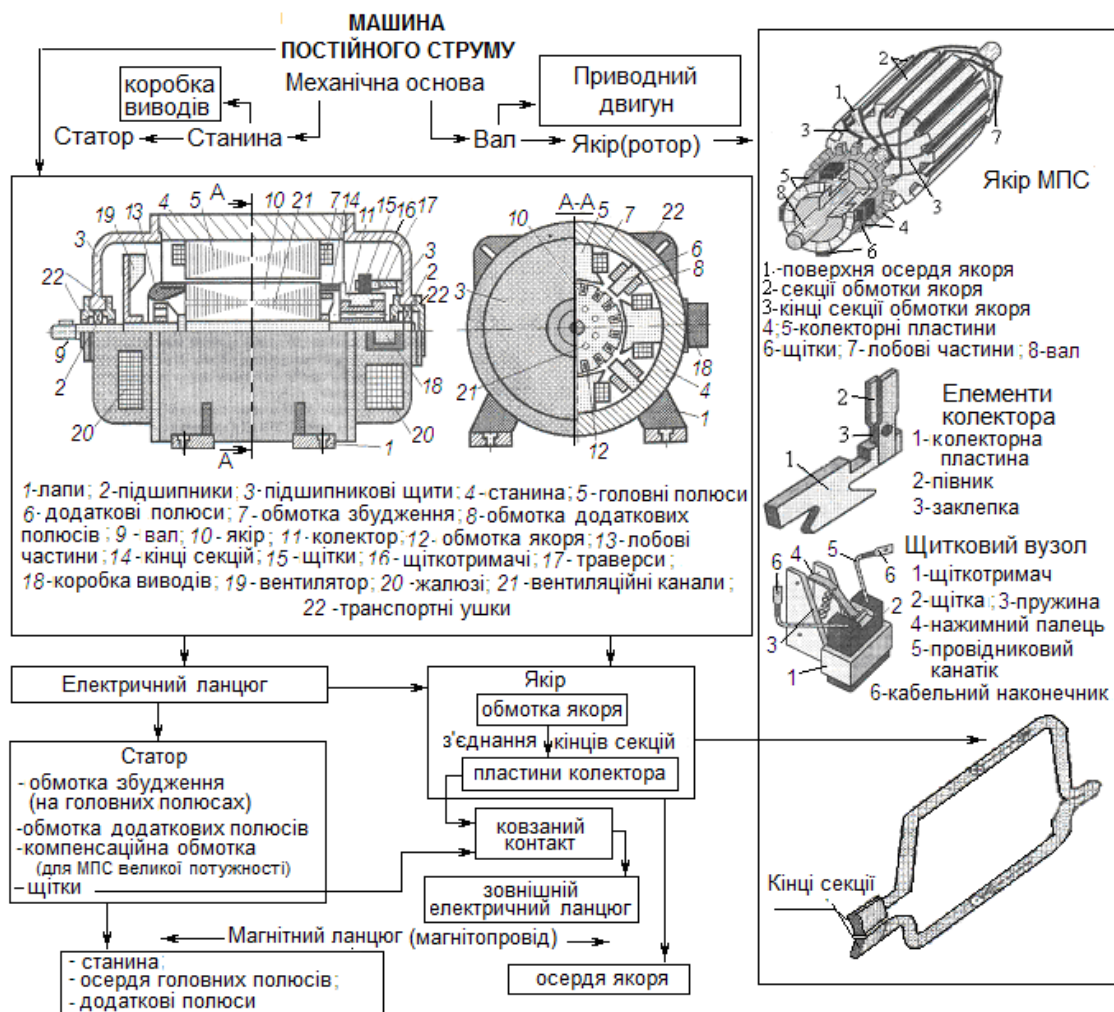


Рисунок 4.3 – Конструкція та основні елементи машин постійного струму

Машини постійного струму оборотні, оскільки можуть працювати в режимі генератора і в режимі двигуна, які мають супутні величини: ЕРС, що індуктується в обмотці якоря, і електромагнітний момент обертання, що виникає в якорі. В будь-яких режимах роботи МПС для створення в її якорі ЕРС і обертаючого моменту необхідно наявність магнітного поля.

Повний електричний ланцюг якоря представлений на рисунку 4.4, а, де показані всі секції обмотки С1 – С12 у вигляді умовних дугоподібних елементів, а також показано колекторні пластини К1 – К12 та щітки з затискачами А1 і А2. Електричне коло якоря від затискача А1 на одній з щіток до затискача А2 на іншій щітці утворює дві паралельні гілки, що проходять по відповідних секціях обмотки якоря.

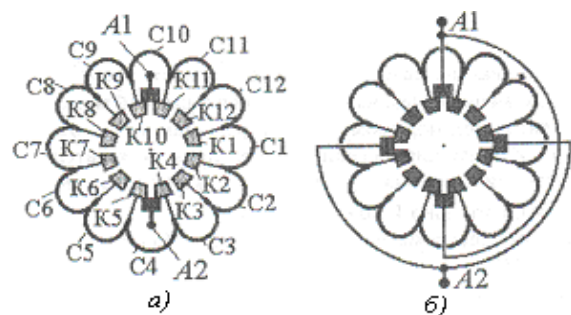


Рисунок 4.4 – Електричне коло обмотки якоря

Якби машина мала чотири полюси (тобто  $p = 2$ , рис. 4.4, б.), то відповідно на колекторі були б розташовані чотири щітки і в обмотці якоря утворилися чотири паралельні гілки.

Співвідношення між ЕРС і обертовим електромагнітним моментом:

$$\frac{E}{M_{эм}} = \frac{n\Phi N_c}{30} / \frac{N_c}{\pi} \Phi I_a = \frac{\pi n}{30 I_a} = \frac{2\pi n}{60 I_a}; \quad E / M_{эм} = \Omega / I_a, \quad (4.1)$$

де  $n$  – частота обертання якоря, об/хв;

$N_c$  – число секцій обмотки якоря;

$\Omega$  – кутова частота обертання якоря, рад/с.

Таким чином, модель і співвідношення (4.1) підтверджують, що для створення ЕРС ( $E$ ) необхідно обертання якоря, а для створення електромагнітного моменту ( $M_{эм}$ ) – струм в якорі. Загальною для них умовою є наявність основного магнітного потоку збудження  $\Phi$ .

Розглянуті основи конструкції і принципу дії МПТ дозволяють перейти до поданням головних режимів їх роботи.

*Режим генератора* полягає в перетворенні механічної енергії, що підводиться до валу двигуна в електричну енергію, що знімається з затискачів якірного ланцюга (рис. 4.6).

На практиці МПС, в основному, використовуються в якості двигунів. Тому розглянемо роботу МПС в режимі двигуна.

*Режим двигуна.* У руховому режимі роботи МПС перетворюють електричну енергію постійного струму в механічну енергію, приводячи в рух різні машини і механізми. Розглянемо цей режим на моделі МПС з числом полюсів  $2p = 2$  (рис. 4.7).



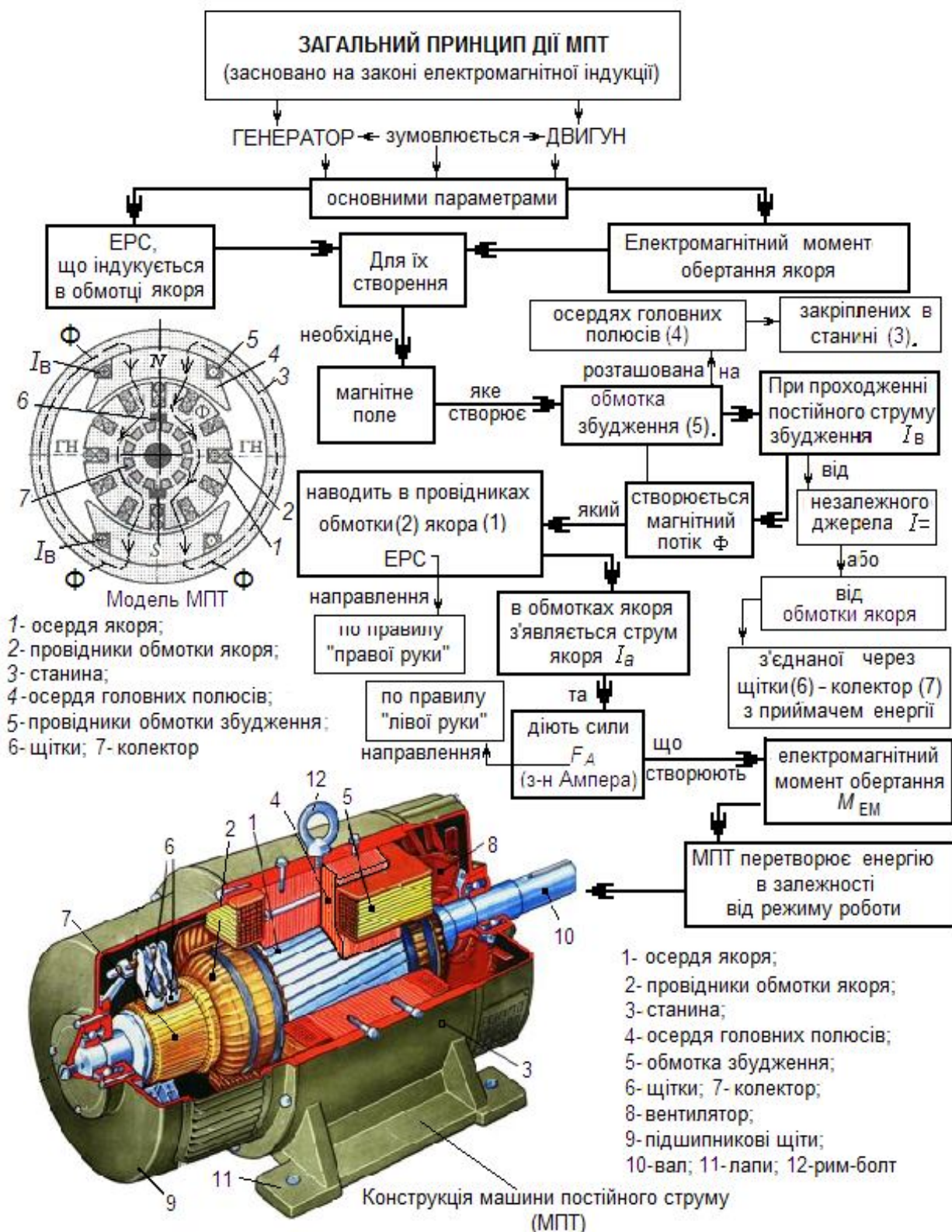


Рисунок 4.5 – Модель принципу дії машин постійного струму

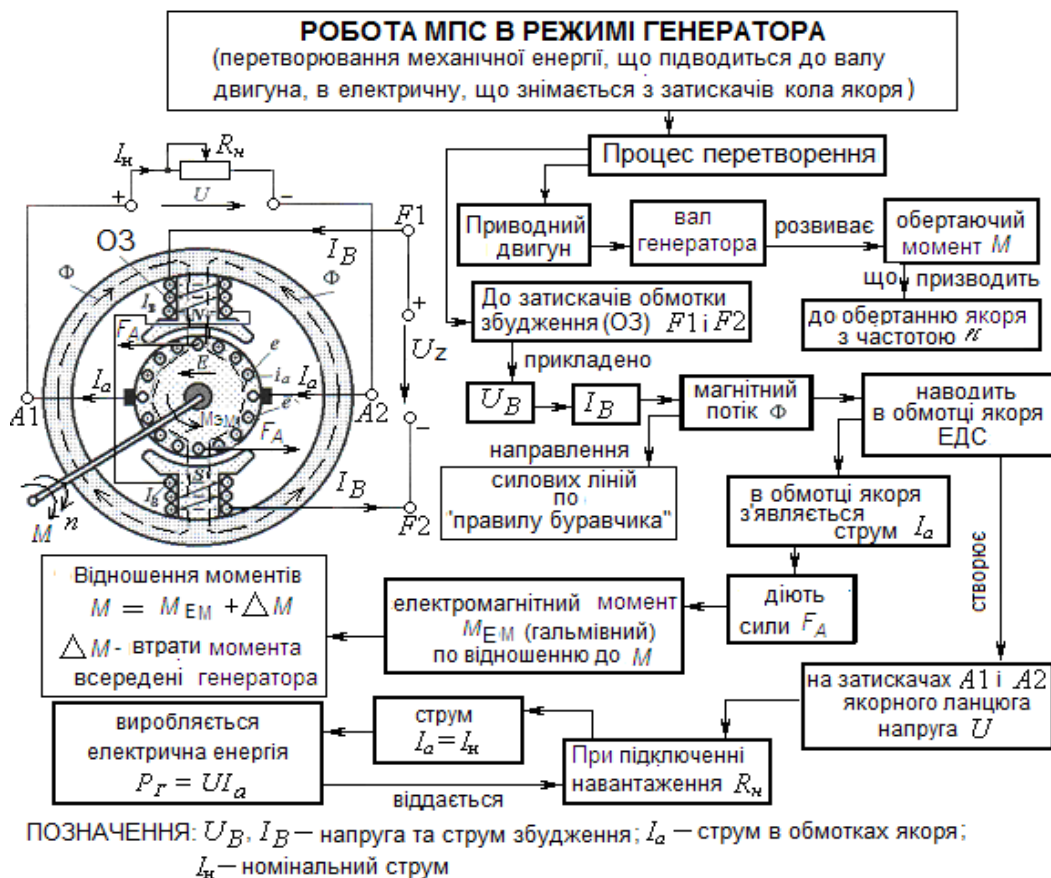


Рисунок 4.6 – Модель роботи МПС в режимі генератора

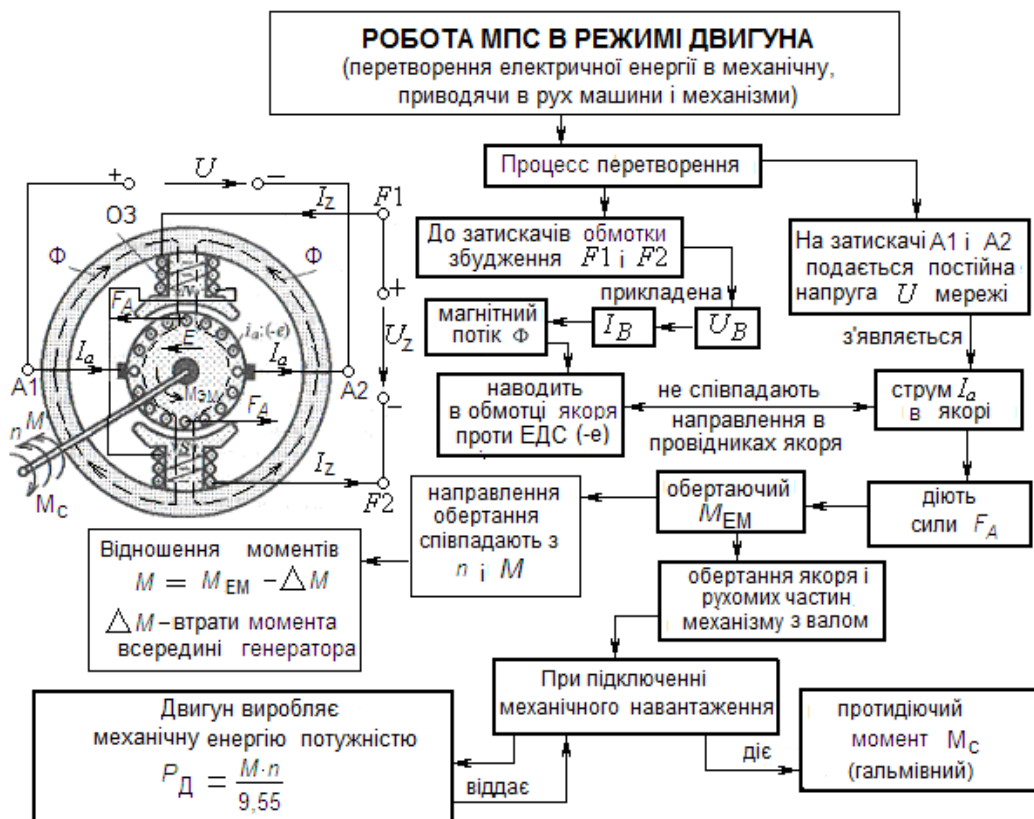


Рисунок 4.7 – Модель роботи МПС в режимі двигуна

Таким чином, очевидно, що в розглянутих режимах роботи МПС процеси, які беруть участь в перетворенні енергії взаємопов'язані і підкоряються основним законам і положенням, наприклад, закону електромагнітної індукції та закону Ампера, створення обертаючих і гальмівних моментів і тощо.

### 4.3 Способи регулювання швидкості обертання електродвигунів постійного струму

Велика частина механізмів в процесі роботи вимагають зміни швидкості в тих чи інших межах. Наприклад, для приводу транспортних механізмів, швидкість повинна бути знижена перед зупинкою або при малих переміщеннях. Така зміна швидкості електроприводу, яке здійснюється шляхом штучного впливу на його електромеханічні параметри, називається *регулюванням*.

Регулювання може здійснюватися механічним способом (шляхом зміни передавального числа) або електричним (шляхом зміни схеми включення електродвигуна або його параметрів). Цим способом, в основному, віддається перевага, оскільки спрощується конструкція машини і підвищується можливість автоматизації процесу регулювання.

Електромагнітні та регульовальні характеристики МПС при роботі в режимі генератора, так і в режимі двигуна залежать від способу включення кола збудження по відношенню до кола обмотки якоря (ОЯ). При електромагнітному порушенні можливі наступні схеми включення обмотки збудження (ОЗ) (рис. 4.8).

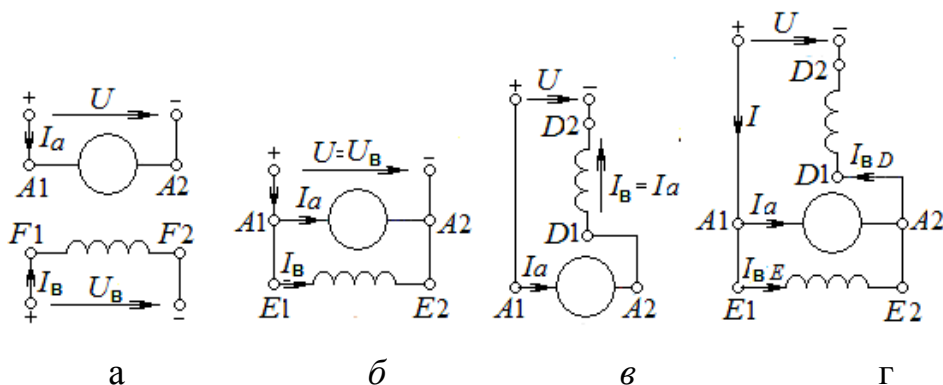


Рисунок 4.8 – Способи включення кола збудження машини постійного струму по відношенню до кола обмотки якоря

У машинах *незалежного збудження* (рис. 4.8, а) ОЗ одержує струм від незалежного джерела, тому не залежить від напруги  $U$  на затискачах якоря, а магнітний потік практично не залежить від струму ОЯ  $I_a$ .

У машин *паралельного збудження* (рис. 4.8, б) напруга  $U$  на затискачах ОЗ і ОЯ одне і теж з витікаючими звідси залежностями.

У машин *послідовного збудження* (рис. 4.8, в) повний струм ОЯ проходить через ОЗ, тому, на відміну від попередніх варіантів, вона виконана з проводів більшого перерізу при меншій кількості її витків. Магнітний потік змінюється в широких межах при зміні струму  $I_a$ .

У машинах *змішаного збудження* (рис. 4.8, г) на кожному полюсному осерді є дві котушки. Одна входить в обмотки паралельного збудження, інша – послідовного збудження – це щось середнє між випадками варіантів б і в.

Вибір способу регулювання швидкості двигуна електроприводу, що з'єднається з робочим механізмом, провадиться виходячи з наступних положень:

1. Межа і діапазон регулювання швидкості обертання характеризується відношенням найбільшої швидкості до найменшої при сталому режимі роботи механізму (наприклад, 1,5:1; 2:1; 10:1 тощо). Для розширення діапазону регулювання швидкості регулюючих пристроїв повинна бути підвищена ступінь жорсткості механічних характеристик за допомогою спеціальних.

2. Плавність регулювання характеризується відношенням двох швидкостей обертання на сусідніх ступенях регулювання ( $k_{pl} = \omega_k / \omega_{k-1} - 1$ ). Зі збільшенням числа ступенів регулятора здійснюється більша плавність регулювання швидкості двигуна.

3. Стійкість регулювання залежить від ступеня жорсткості механічної характеристики, тобто наскільки змінюється швидкість зміни навантаження механізму.

4. Залежність допустимого навантаження приводного електродвигуна з боку механізму від потужності, вибирається з умов нагрівання електродвигуна, комутації та механічної міцності.

5. Економічність приводу вибирається в залежності від втрат енергії в пускових і регулювальних пристроях. Економічність регулювання характеризує ККД системи.

Регулювання швидкості обертання електропривода постійного струму пов'язано зі зміною його механічної характеристики, яка, в свою чергу, пов'язана з виразом

$$\omega = \frac{U}{k\Phi} - \frac{I \cdot R}{k\Phi} \quad (4.2)$$

На практиці використовуються три основних способи регулювання швидкості електродвигунів постійного струму:

- шляхом зміни величини потоку збудження електродвигуна;
- за допомогою зміни опору в ланцюзі обмотки якоря електродвигуна;
- шляхом зміни напруги, що підводиться до електродвигуна.

Способи регулювання швидкості електродвигуна визначає роботу автоматизованої системи електроприводу.

### **Контрольні питання**

1. Як класифікуються електричні машини?
2. Що являють собою машини постійного струму (МПС) ?
3. Перелічити основні елементи машин постійного струму.
4. Що являє собою електричний та магнітний ланцюг машин постійного струму?
5. Охарактеризуйте основні режими роботи машин постійного струму.
6. У чому полягає загальний принцип дії електричних машин постійного струму?
7. У чому полягає принцип роботи МПС в режимі генератора?
8. У чому полягає принцип роботи МПС в режимі двигуна?
9. Які існують способи включення ланцюга збудження МПС по відношенню до кола обмотки якоря?
10. Від чого залежить вибір способу регулювання швидкості двигуна електроприводу?
11. Які існують способи регулювання швидкості електродвигунів постійного струму?



## ЛЕКЦІЯ 5

### РЕГУЛЮВАННЯ ШВИДКОСТІ ОБЕРТАННЯ ЕЛЕКТРОДВИГУНІВ ПОСТІЙНОГО СТРУМУ ПАРАЛЕЛЬНОГО І ПОСЛІДОВНОГО ЗБУДЖЕННЯ

**План:**

**5.1** Регулювання швидкості обертання електродвигуна паралельного збудження шляхом зміни величини потоку збудження.

**5.2** Регулювання швидкості обертання електродвигуна паралельного збудження шляхом зміни опору в колі обмотки якоря.

**5.3** Регулювання швидкості обертання електродвигуна паралельного збудження шляхом зміни напруги, що підводиться.

**5.4** Регулювання швидкості обертання електродвигуна з послідовним збудженням шляхом зміни опору в головному колі.

**5.5** Регулювання швидкості обертання електродвигуна з послідовним збудженням із застосуванням схеми незалежного живлення обмотки збудження.

#### 5.1 Регулювання швидкості обертання електродвигуна паралельного збудження шляхом зміни величини потоку збудження

Для зміни величини потоку збудження в коло обмотки збудження послідовно вводиться додатковий опір  $R_1$  (рис. 5.1), який призводить до зміни потоку збудження. На рисунку 5.2 показані механічні характеристики залежності кутової швидкості  $\omega$  від моменту обертання на валу  $M$  та струму збудження  $I_z$ .

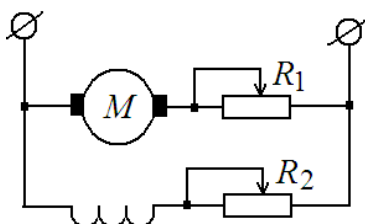
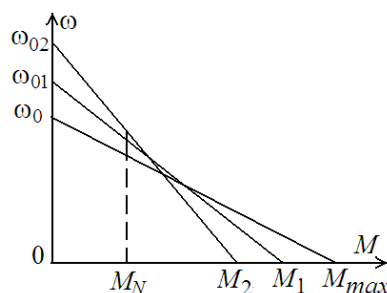
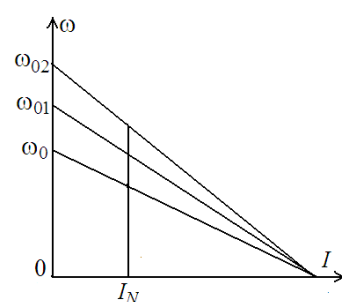


Рисунок 5.1 – Схема вмикання регульовального реостата в ланцюг обмотки збудження електродвигуна



а



б

Рисунок 5.2 – Характеристики двигуна з паралельним збудженням:

а – при введенні зовнішнього опору в ланцюг обмотки збудження; б – при різних значеннях потоку збудження

Природна характеристика визначається максимальним магнітним потоком збудження  $\Phi$  і швидкістю обертання  $\omega_0$  при неробочому ході (НХ). При ослабленні магнітного потоку  $\Phi_1$  швидкість ходу двигуна:

$$\omega_{01} = \omega_0 \cdot \frac{\Phi}{\Phi_1} \quad \text{відповідно з} \quad \omega_0 = \frac{U}{k\Phi}, \quad \omega_{01} = \frac{U}{k\Phi_1}. \quad (5.1)$$

Перепад швидкостей при незмінному значенні номінального обертаючого моменту  $M_N$  і для потоку збудження  $\Phi_1$ :

$$\Delta\omega_1 = \Delta\omega \cdot \left( \frac{\Phi}{\Phi_1} \right)^2 = \Delta\omega \cdot \left( \frac{\omega_{01}}{\omega_0} \right)^2 \quad (5.2)$$

Як видно з рисунку 5.3, *а* величина максимального моменту  $M_{max} = k\Phi I_{max}$  зменшується при збільшенні швидкості  $\omega_0$  холостого ходу (тобто при зменшенні потоку збудження  $\Phi$ ). На рисунку 5.3, *б* всі швидкісні характеристики перетинаються в одній точці, тому що при нерухомому якорі електродвигуна номінальний струм двигуна  $I_N$  і струм якоря  $I_a$  постійні (тобто  $I_N = I_a = U / R = \text{const}$ ) при будь-якому значенні потоку збудження  $\Phi$ .

Даний спосіб регулювання швидкості є економічним, тому що втрати енергії незначні, а також забезпечується плавність регулювання за рахунок зниження жорсткості характеристики.

Недолік способу: погіршення умов комутації, тому що зростає реактивна ЕДС, що може викликати іскріння колектора. Зі збільшенням швидкості струм якоря не перевищує номінального значення. Але при цьому не збільшується і потужність на валу двигуна, оскільки потужність  $P = M \cdot \omega = \text{const}$ .

Граничне допустиме значення швидкості обмежена механічною міцністю якоря і умовами комутації колектора електродвигуна. Дана величина вказується в каталогах.

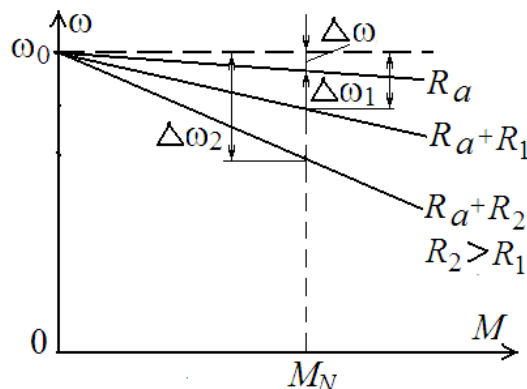


Рисунок 5.3 – Характер зміни швидкості обертання двигуна з паралельним збудженням при введенні опору в коло обмотки якоря

## 5.2 Регулювання швидкості обертання електродвигуна паралельного збудження шляхом зміни опору в ланцюзі обмотки якоря

Даний спосіб регулювання швидкості електродвигуна здійснюється шляхом запровадження зовнішнього опору або шляхом шунтування якоря. Розглянемо особливості способів.

*Введення зовнішнього опору  $R_a$  в коло обмотки якоря* (послідовно з якорем електродвигуна). При цьому знижується напруга на затискачах якоря і швидкість обертання двигуна. Жорсткість характеристик при цьому зменшується і при збільшенні навантаження швидкість обертання електродвигуна різко падає (рис. 5.3).

Межі регулювання швидкості обертання електродвигуна залежать також від струму навантаження. При малих навантаженнях регулювання швидкості ускладнене, тому що для отримання значного її зміни потрібен значний зовнішній опір. Регулювання швидкості відбувається в головному колі електродвигуна, що робить цей спосіб неекономічним через значні втрати потужності в регульованих опорах.

*Шунтування якоря* (рис. 5.4, рис. 5.5). При такому способі регулювання можна отримати невеликі швидкості при будь-якому навантаженні і при роботі двигуна в режимі НХ. Кут нахилу характеристики і швидкість обертання залежать від опорів  $R_1$  і  $R_2$ . Така схема застосовується для точної зупинки механізму в заданому положенні.

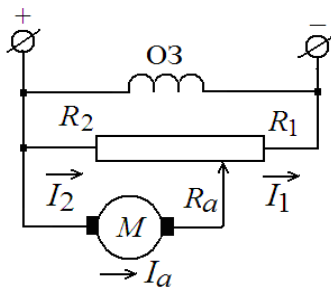


Рисунок 5.4 – Схема шунтування обмотки якоря двигуна з паралельним збудженням ( $I_1$  – струм, що споживається з мережі;  $I_2$  – струм в шунтуючому опорі  $R_2$ )

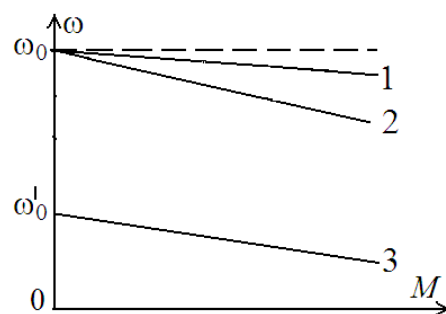


Рисунок 5.5 – Механічна характеристика двигуна з паралельним порушенням при шунтуванні обмотки якоря (1 – природна характеристика; 2 – реостатна характеристика; 3 – характеристика при шунтуванні якоря)



Така схема застосовується для точної зупинки механізму в заданому положенні. Застосування її доцільно при короткочасному режимі роботи двигуна, оскільки при тривалому регульовальному режимі схема не економічна через додаткові втрати потужності в опорах.

### 5.3 Регулювання швидкості обертання електродвигуна паралельного збудження шляхом зміни напруги, що підводиться

У випадках, коли необхідно широке регулювання швидкості, застосовуються схеми, де якор електродвигуна з паралельним збудженням живиться від окремого джерела (генератора, керованих перетворювачів, електромашинних або електромагнітних підсилювачів).

Регулювання швидкості двигуна зміною напруги, що підводиться до якоря доцільно проводити за допомогою системи з незалежним джерелом регулювання напруги. Наприклад, живлення якоря електродвигуна здійснюється від керованого генератора (рис. 5.6).

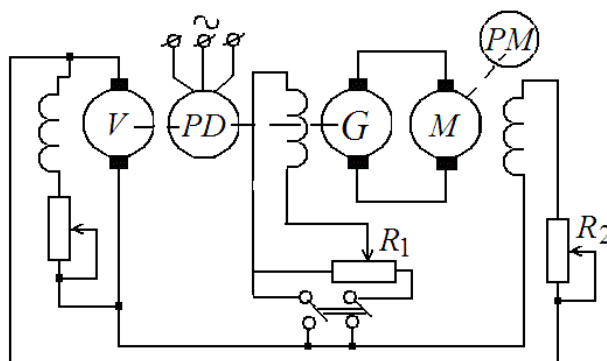


Рисунок 5.6 – Схема регулювання швидкості обертання електродвигуна з керованим генератором (система  $G - M$ )

Система називається генератор-двигун ( $G - M$ ) і застосовується для приводів з тривалим регульовальним режимом.

Основні елементи схеми:  $PM$  – робочий механізм;  $M$  – двигун постійного струму з незалежним збудженням (приводить в дію  $PM$ );  $G$  – генератор постійного струму (живить двигун  $M$ );  $PD$  – привідний двигун (асинхронний або синхронний);  $V$  – збудник;  $R_1, R_2$  – регульовальні опори в ланцюзі збудження генератора  $G$  і двигуна  $M$ .

Дана схема полегшує пуск вхід двигуна  $M$ , забезпечує широке регулювання його швидкості обертання, зміна напрямку обертання, плавне гальмування.

Всі зазначені режими здійснюються шляхом зміни струму в обмотці збудження генератора.

Широке регулювання швидкості обертання електродвигуна при даній схемі здійснюється за допомогою зміни ЕРС генератора, а також шляхом зміни струму збудження самого електродвигуна (рис. 5.7).

Плавність регулювання швидкості обертання може бути досить високою за рахунок багатоступеневості регулювання, яка залежить від апаратів керування, встановлених в ланцюзі збудження генератора і електродвигуна.

Гальмування електродвигуна здійснюється в головному ланцюгу шляхом перемикання регулювальних опорів. Спочатку виводиться опір  $R_2$  в ланцюзі збудження електродвигуна, потім вводиться опір  $R_1$  в ланцюзі збудження генератора. В результаті зменшується магнітний потік в генераторі і зростає ЕДС в двигуні, яка стає більше, ніж у генератора, і двигун переходить в генераторний режим. Генератор при цьому працює як електродвигун. Коли генераторна потужність перевищує втрати в машинах, то приводний електродвигун  $PD$  працює в режимі генератора і віддає енергію в мережу.

#### 5.4 Регулювання швидкості обертання електродвигуна з послідовним збудженням шляхом зміни опору в головному колі

Даний спосіб регулювання для двигунів з послідовним збудженням здійснюється також, як і двигунів з паралельним збудженням, тобто шляхом запровадження зовнішнього опору і шунтування якоря.

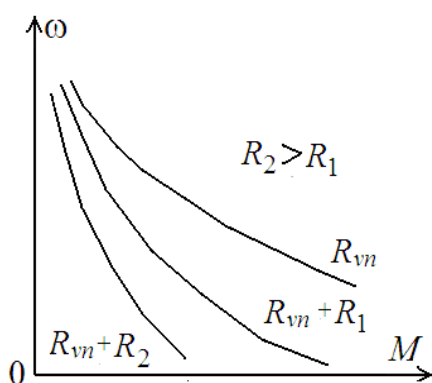


Рисунок 5.8 – Механічна характеристика електродвигуна з послідовним збудженням при введенні в головне коло зовнішнього опору

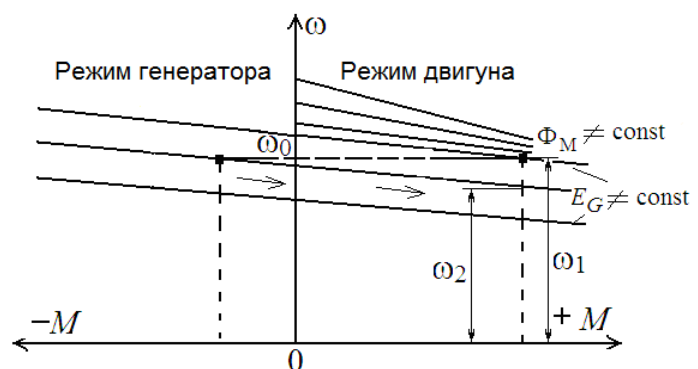


Рисунок 5.7 – Механічні характеристики електродвигуна з незалежним збудженням у системі  $G - M$

Введення зовнішнього опору здійснюється також шляхом послідовно його підключення в коло якоря електродвигуна, що призводить до зниження напруги на затискачах якоря і відповідно до зниження швидкості його обертання (рис. 5.8, де  $R_{vn}$  – внутрішній опір). При збільшенні навантаження межі регулювання швидкості знижуються, оскільки при незмінному моменті потужність, що споживана з мережі постійна (тобто  $P = \text{const}$ ) незалежно від зниження швидкості при регулюванні.

Даний спосіб регулювання швидкості є неекономічним і застосовується тільки при необхідності короточасного зниження швидкості обертання електродвигуна.

*Шунтування в колі якоря.* Цей спосіб регулювання застосовується в двигунах, які використовуються в приводних підйомних механізмах.

Схема включення (рис. 5.9) дозволяє регулювати швидкість обертання зміною величини потоку збудження і напруги на затискачах якоря електродвигуна. Завдяки включенню шунтуючого опору  $R_2$  в коло якоря повний струм дорівнює:  $I_1 = I_2 + I_a$ .

При відсутності навантаження на валу двигуна і струмі якоря (тобто  $M \approx 0$ ,  $I_a \approx 0$ ) по обмотці збудження двигуна проходить струм, А:

$$I_1 = I_2 = \frac{U}{R_1 + R_2} \quad (5.3)$$

Кінцева швидкість обертання:

$$\omega_0 = \frac{I \cdot R_2}{k\Phi} = \frac{Ur_2}{k\Phi \cdot (R_1 + R_2)} \quad (5.4)$$

При зміні опорів  $R_1$  і  $R_2$  змінюється швидкість двигуна при НХ.

Механічні характеристики при цьому виходять більш жорсткі, за рахунок послідовного включення опору (рис. 5.10, де  $R_v$  – зовнішній опір кола).

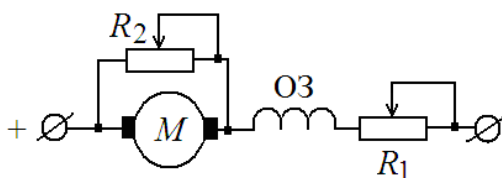


Рисунок 5.9 – Схема шунтування обмотки якоря електродвигуна з послідовним збудженням

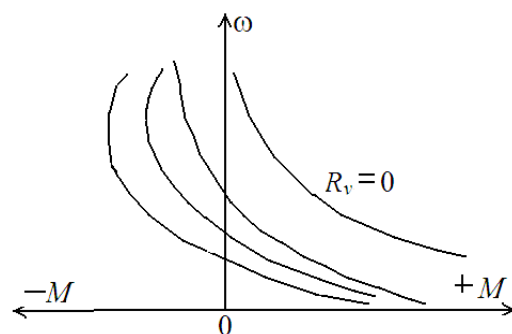


Рисунок 5.10 – Механічні характеристики двигуна з послідовним збудженням при шунтуванні обмотки якоря

При цьому опір змінюється незначно із зміною навантаження на валу двигуна та напруга на затискачах якоря більш стабільна. Це говорить про те, що двигун може стійко працювати і при малих навантаженнях.

Даний спосіб регулювання малоекономічен, оскільки є значні втрати в регулювальних опорах. Тому застосування такої схеми доцільно тільки на короткі проміжки часу.

### 5.5 Регулювання швидкості обертання електродвигуна з послідовним збудженням із застосуванням схеми незалежного живлення обмотки збудження

Схема з незалежним живленням обмотки збудження електродвигуна з послідовним збудженням застосовується для регулювання швидкості обертання електродвигуна в приводах підйомних механізмів.

Якір двигуна включається паралельно з обмоткою збудження (рис. 5.11). Послідовно з кожної з обмоток включені додаткові регульовані опору  $R_1$  і  $R_2$  і зовнішній опір  $R$ . Опір  $R_2$  обмежує величину струму, що проходить по обмотці збудження електродвигуна, оскільки внутрішній опір обмотки незначний.

Змінюючи величину опорів  $R$ ,  $R_1$ ,  $R_2$ , можна регулювати швидкість обертання електродвигуна, яка визначається на підставі виразу швидкісної характеристики:

$$\omega = \frac{U}{k\Phi} - \frac{I_a(R_a + R_1)}{k\Phi} - \frac{I \cdot R}{k\Phi} \quad (5.5)$$

При збільшенні  $R$  і  $R_1$  швидкість електродвигуна зменшується при роботі в руховому режимі і зростає при роботі в генераторному режимі. При збільшенні  $R_2$  швидкість електродвигуна в обох випадках зростає у зв'язку зі зменшенням величини магнітного потоку і струму збудження, оскільки:

$$I_2 = \frac{U_2}{R_2}, \quad \Phi = \frac{E}{k\omega} \quad (5.6)$$

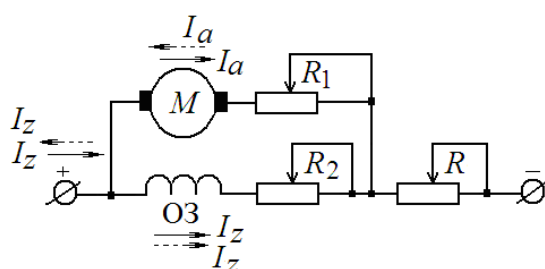


Рисунок 5.11 – Схема з незалежним живленням обмотки збудження електродвигуна з послідовним збудженням

При значних за часом переходах регулювання швидкості схема (див. рис. 5.11) неекономічна, оскільки робота двигуна супроводжується додатковими втратами потужності в опорах  $R$ ,  $R_1$ ,  $R_2$ .

### **Контрольні питання**

1. Які використовуються заходи для регулювання швидкості обертання електродвигуна паралельного збудження?
2. Достоїнства та недоліки способів регулювання швидкості двигуна.
3. Які особливості регулювання електродвигуна паралельного збудження при зміні опору в ланцюзі обмотки якоря?
4. Як відбувається регулювання швидкості обертання електродвигуна паралельного збудження шляхом зміни напруги, що підводиться?
5. Як відбувається регулювання швидкості обертання електродвигуна з послідовним збудженням?
6. Особливості регулювання швидкості обертання електродвигуна з послідовним збудженням із застосуванням схеми незалежного живлення обмотки збудження.

## ЛЕКЦІЯ 6

### ЕЛЕКТРИЧНІ МАШИНИ ЗМІННОГО СТРУМУ

#### *План:*

*6.1 Класифікація і основні параметри асинхронних машин.*

*6.2 Режими роботи асинхронних машин.*

*6.3 Побудова та принцип дії трифазних асинхронних двигунів.*

*6.4 Способи регулювання швидкості обертання ТАД.*

*6.5 Синхронні машини.*

*6.6 Побудова синхронної машини і способи її пуску.*

*6.7 Робота синхронної машини в режимі генератора та двигуна.*

#### 6.1 Класифікація і основні параметри асинхронних машин

В сучасних системах електроприводу крім електричних машин постійного струму застосовуються машини змінного струму (рис. 6.1), які використовуються найчастіше як асинхронні і синхронні двигуни:

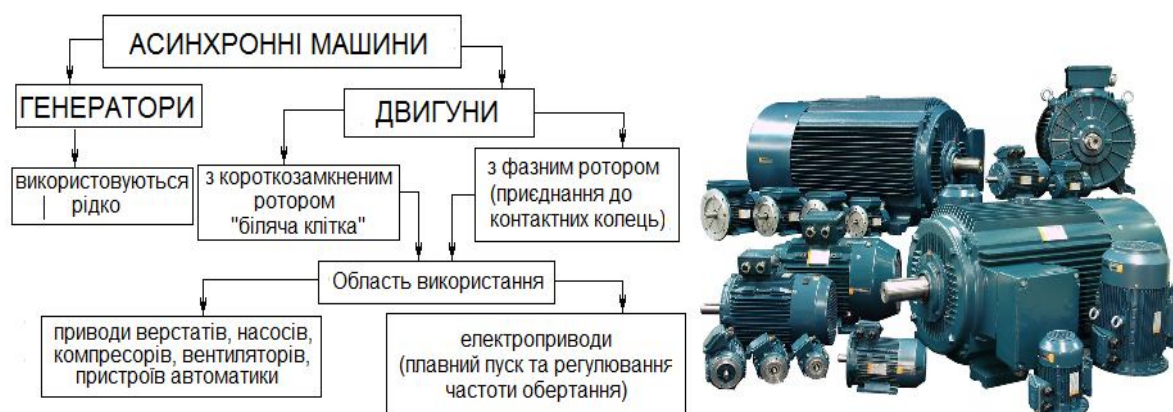


Рисунок 6.1 – Класифікація асинхронних машин

Асинхронна електрична машина створена М. О. Доливо-Добровольським у 1888 р. І до цього часу зберегла просту форму. Головною перевагою таких машин є простота виготовлення і малокоштовність. В машині практично відсутні легко пошкоджуючі частини (колектор) і легко зношуючі електричні і механічні частини. Недоліком є не економічність регулювання експлуатаційних характеристик, споживання реактивної енергії з мережі.

Асинхронні електричні машини застосовуються, головним чином, для перетворення електричної енергії в механічну і навпаки.

Асинхронні машини (АМ) використовуються, в основному, як двигуни; в якості генераторів вони застосовуються вкрай рідко.

**Основні параметри і терміни**, що визначають і характеризують режими роботи асинхронних машин, показані на рисунку 6.2.

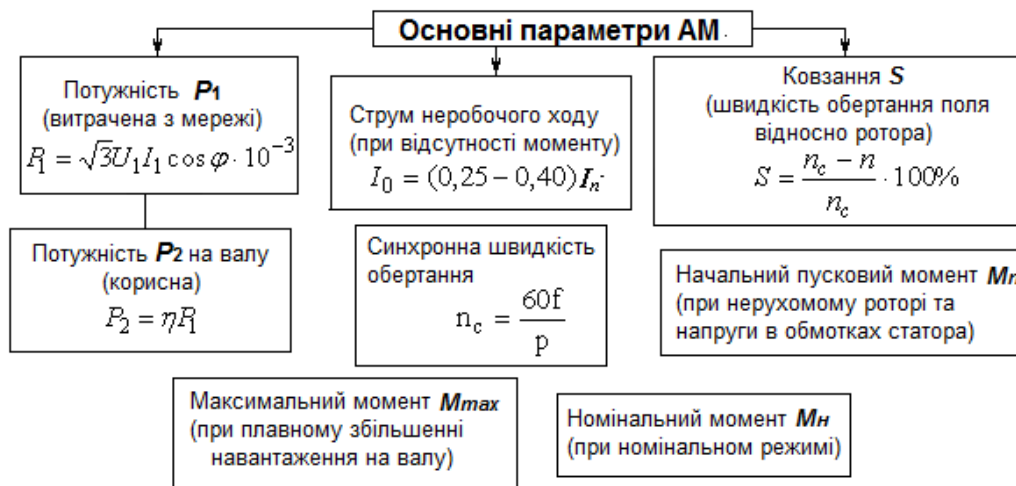


Рисунок 6.2 – Основні параметри асинхронних машин

## 6.2 Режими роботи асинхронних машин

Асинхронні машини працюють в наступних режимах:

- режим двигуна;
- генераторний режим (рекуперація електричної енергії в мережу);
- режим електромагнітного гальма.

Режими роботи асинхронних машин характеризуються їх механічними характеристиками, показаними на рисунку 6.3.

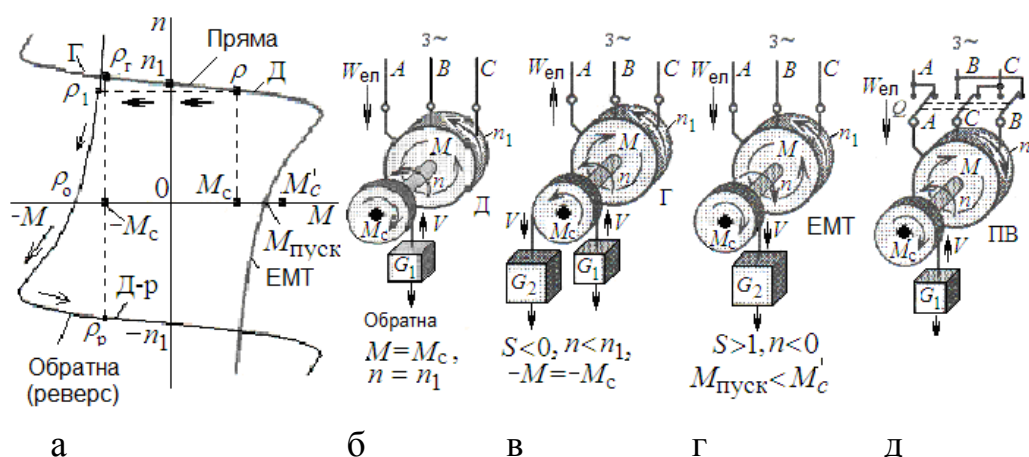


Рисунок 6.3 – Механічні характеристики і режими роботи асинхронних машин:  
*а – механічні характеристики; б – режим двигуна; в – режим рекуперативного генераторного гальмування; г – режим електромагнітного гальма; д – режим противключення*



Ділянка *режиму двигуна* – Д (рис. 6.3, а). Поєднання параметрів обертання та напрямків магнітного поля  $n_1$ , обертаючого моменту  $M$ , обертання вала  $n$  і моменту опору  $M_c$  показано на рисунку 6.3, б.

Момент  $M_c$  створюється на шківі порушуваних вантажем  $G_1$  ( $V$  – напрямок руху) і при  $M = M_c$  виходить робоча точка  $p$  (рис. 6.3, а).

При значенні ковзання  $S < 0$ , отримаємо продовження механічної характеристики при  $n < n_1$  (див. рис. 6.3, а) – це ділянка *рекуперативного генераторного гальмування* Г. Поєднання напрямів  $n_1$ ,  $n$ ,  $M$  і  $M_c$  представлено для цього режиму на рисунку 6.3, в.

Зміна напрямку  $M_c$  відбулося з появою другого вантажу  $G_2$ , переважає над першим –  $G_1$ .

Тому на рисунку 6.3, а робоча точка пройшла положення  $n = n_1$ , де момент  $M$  змінив свій знак і з обертального перетворився в гальмівний, а рушійним став момент  $M_c$ . В новому сталому положенні (точка  $p_{\Gamma}$ ) виконуються умови рівноваги –  $M = -M_c$  і асинхронна машина, що працює в генераторному режимі, перешкоджає гальмуючим моментом подальшому розгону і вільному падінню вантажу. При цьому вона віддає електричну енергію  $W_{\text{ЕЛ}}$  в мережу.

При значенні ковзання  $S > 1$ , на рисунку 6.3, а отримаємо продовження ЕМТ механічної характеристики при  $n < 0$  (зміна напрямку обертання), що відповідає *режиму електромагнітного гальма*, для якого мають місце напрямки величин, що показані на рисунку 6.3, г.

В даному випадку при включенні двигуна його пусковий момент  $M_{\text{пуск}} < M'_c$ , де  $M'_c$  – обертаючий момент, що діє з боку звільнившогося вантажу  $G_2$ . У такій ситуації переважаючий момент  $M'_c$  є рушійним, а асинхронна машина своїм моментом  $M$  здійснює електромагнітне гальмування. Електрична енергія споживається з мережі.

Для трифазних асинхронних двигунів одним з варіантів електричного гальмування, є гальмування противключенням, рисунок 6.3, д.

При зміні висновків будь-яких двох фаз змінюється напрямок обертання магнітного поля  $n_1$ . При цьому момент обертання  $M$  буде направлений в ту сторону, в яку обертається магнітне поле.

Складний електромеханічний процес переходу з точки  $p$  на прямій в точку  $p_p$  на механічної характеристики відповідає *реверсу* двигуна. Для виконання реверсу досить перевести перемикач  $Q$ , що показаний на рисунку 6.3, д з одного положення в інше. Реверс у підсумку призводить до зміни напрямку обертання ротора асинхронної машини.



### 6.3 Побудова та принцип дії трифазних асинхронних двигунів

Трифазні асинхронні двигуни (ТАД) поділяються по конструкції на двигуни з короткозамкненим ротором (у вигляді білячої клітки) і фазним ротором (рис. 6.4 і рис. 6.5). Робота ТАД заснована на принципі обертового магнітного поля.

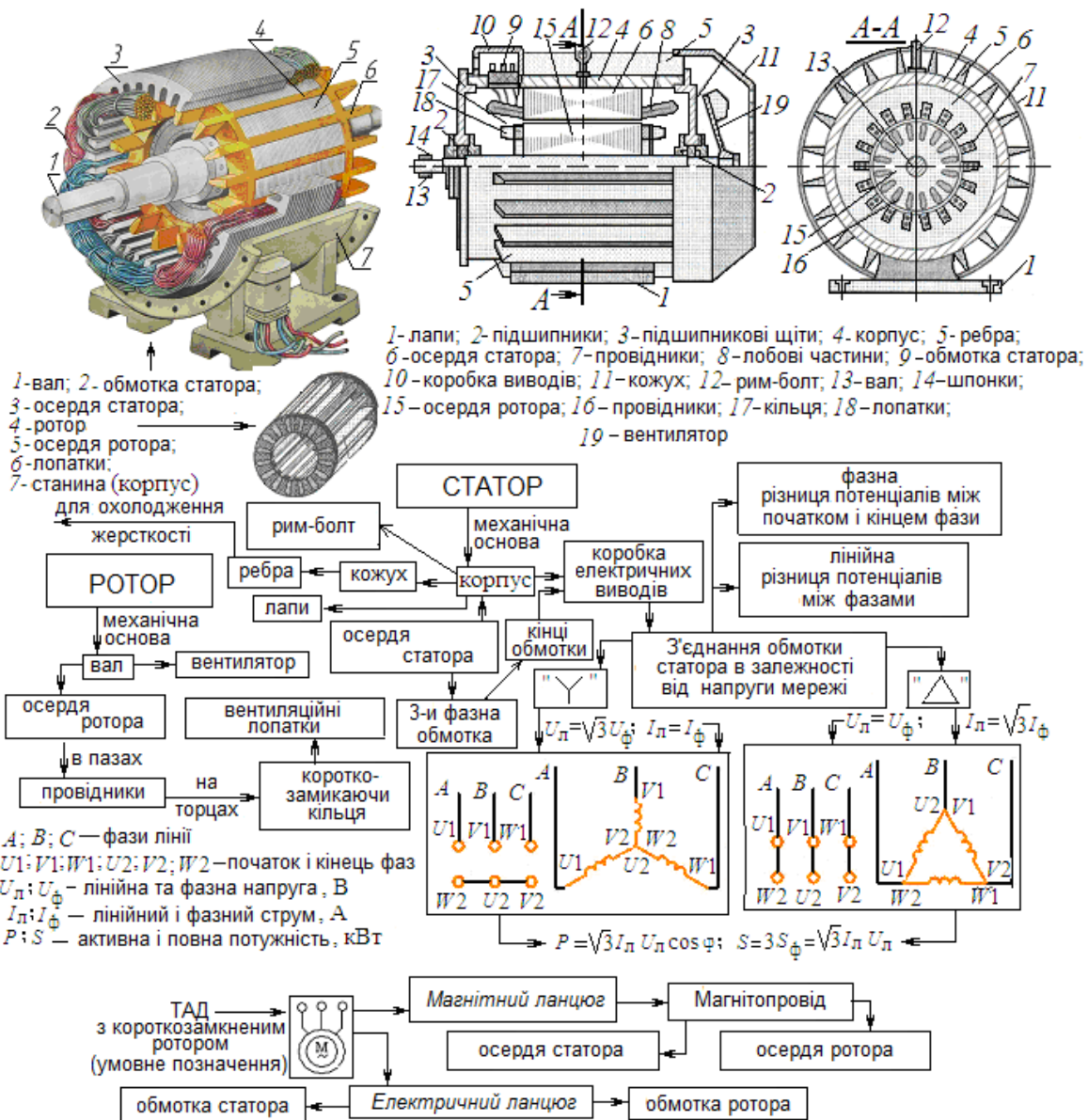


Рисунок 6.4 – Конструкція трифазного асинхронного двигуна з короткозамкненим ротором

Обмотка ротора ТАД називається короткозамкненою, оскільки виконана з мідних стрижнів, залитих алюмінієм і з розташованими на кінцях стрижнів замикаючими кільцями.

Обмотка у фазного ротора має вигляд катушки і схожа на статорну обмотку двигуна.

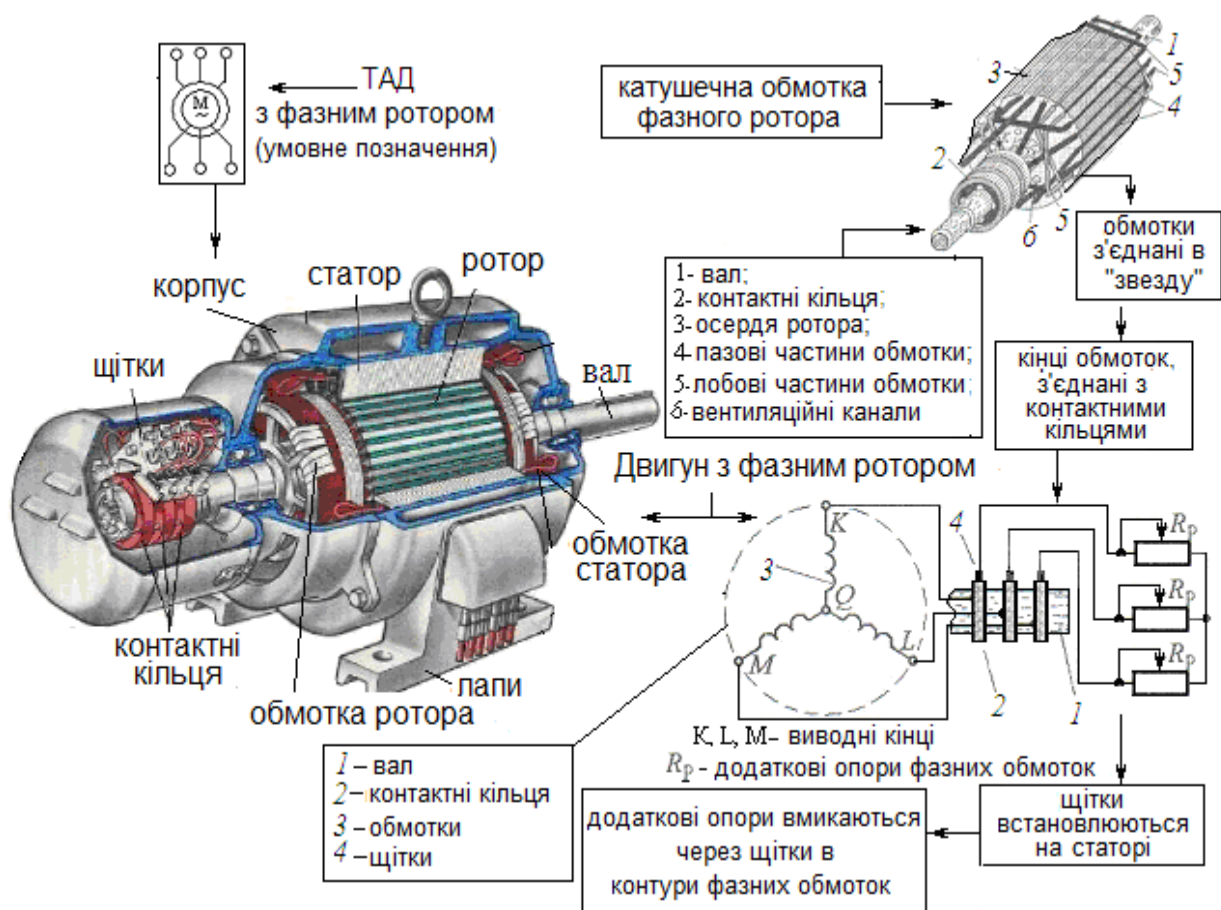


Рисунок 6.5 – Електромагнітне коло та конструкція асинхронного двигуна з фазним ротором

Розглянемо на конкретному прикладі дво полюсної моделі принцип дії ТАД з короткозамкненим ротором (рис. 6.6), де  $\Phi$  – магнітний потік (показано пунктирними силовими лініями);  $n_1$  – напрямок обертання магнітного поля;  $i_1$  – струм обмотки статора;  $i_2$  – струми в обмотці ротора;  $V_s$  – відносна швидкість переміщення провідників обмотки ротора по відношенню до силовим лініям обертового поля;  $B_1$  – поле обмотки статора;  $l_p$  – довжина ротора і його провідників;  $\alpha \approx 90^\circ$ ;  $e_2$  – ЕДС в провідниках обмотки ротора;  $F_A = i_2 B_1 l_p \sin \alpha$  – сили Ампера;  $M_{em}$  – електромагнітний момент, що діє на ротор;  $n_2$  – частота обертання ротора;  $M$  – момент обертання ротора;  $M_c$  – гальмівний момент опору, прикладений до валу ротора з боку механічного навантаження;  $f_1$  – частота напруги і струму статора.

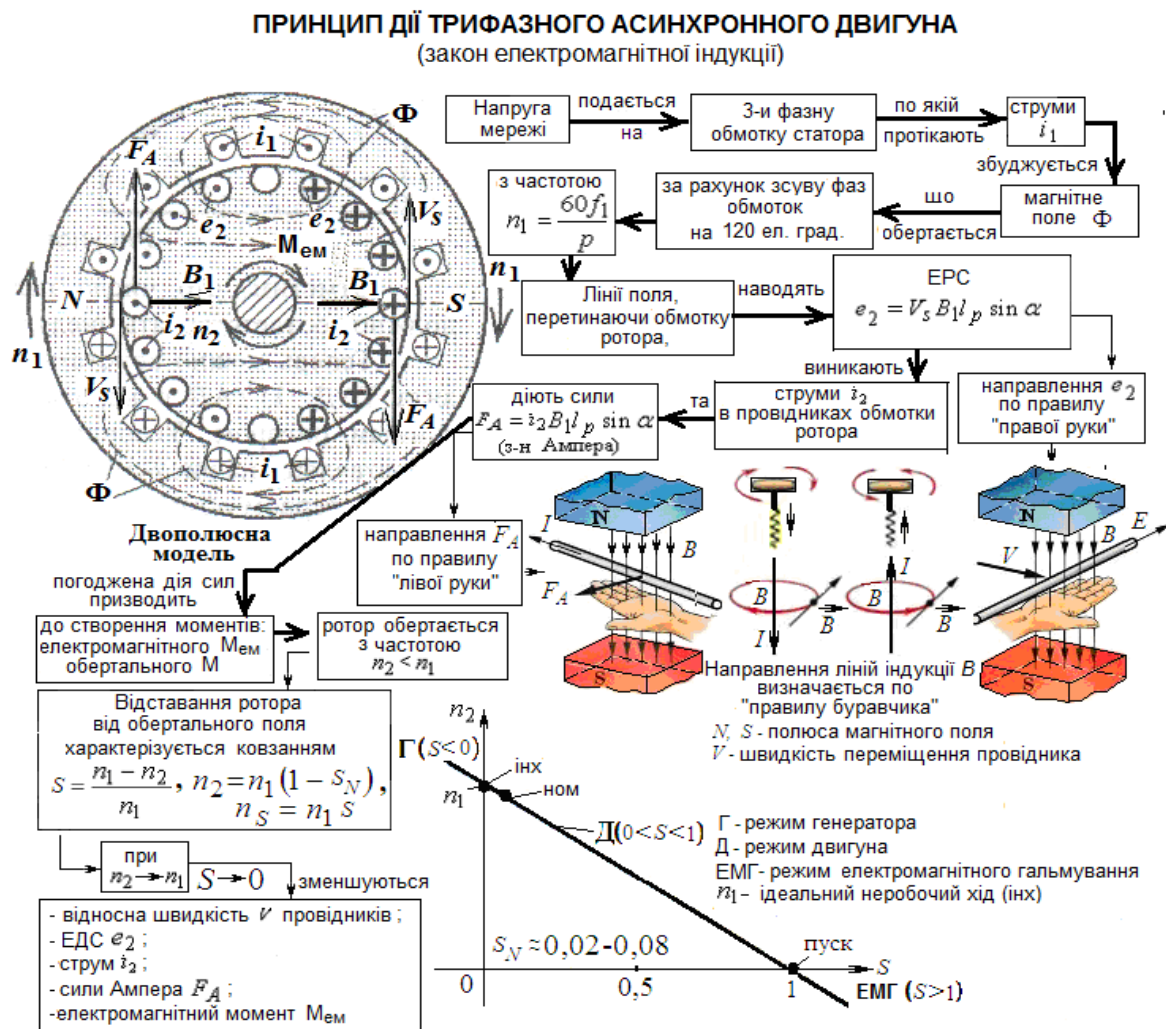


Рисунок 6.6 – Принцип дії ТАД

Точка, що відповідає  $n_1$ , є точкою «інх» – ідеального неробочого ходу, оскільки при  $M_C = 0$  відповідає ідеальним умовам  $\Delta M = 0$ . Точка «пуск» при  $S = 1$  – пускова. Номінальному режиму «ном» в ТАД відповідає ковзання  $S_{ном} \approx 0,02-0,08$ . Якщо при певних умовах  $S < 0$ , то ТАД переходить в рекуперативний генераторний режим (ділянка «Г») при  $S > 1$  – в режим електромагнітного гальма (ділянка «ЕМГ»), рисунку 6.6. Таким чином, в руховому режимі асинхронна машина характеризується діапазоном  $0 < S \leq 1$ .

#### 6.4 Способи регулювання швидкості обертання ТАД

Існує кілька способів регулювання швидкості обертання ТАД. Розглянемо деякі з них.

**Введення опору в ланцюг обмотки ротора.** Цей спосіб регулювання швидкості ТАД (рис. 6.7) застосовується при короткочасному регулювальному режимі контактними кільцями електродвигуна.

Включення в ланцюг ТАД різних за величиною опорів сприяє регулюванню швидкості двигуна в одну сторону (зниження), але в досить широких межах в залежності від величини і числа ступенів опору. При цьому момент  $M$  залишається постійним, а змінюється лише ковзання.

Регулювання швидкості обертання ТАД даним способом є більш економічним, оскільки при його роботі знижуються втрати за рахунок зменшення механічної потужності на валу ТАД і потужності, що підводиться з мережі, при зниженні швидкості обертання двигуна. Регулювання швидкості ТАД є ступінчастим.

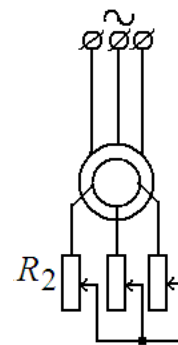


Рисунок 6.7 – Схема включення опору в ланцюг ротора ТАД з контактними кільцями

**Перемикання числа полюсів обмотки статора.** Промисловістю випускаються багатошвидкісні ТАД з короткозамкненим ротором, які можуть мати при перемиканні числа полюсів дві, три і чотири швидкості обертання. Зміна числа пар полюсів електродвигуна досягається перемиканням полюсів обмотки статора, що складається з окремих частин. При перемиканні окремих обмоток кожної фази з послідовного з'єднання на паралельне число полюсів зменшується і швидкість електродвигуна зростає.

Існує два способи перемикання полюсів (рис. 6.8):

- перемикання обмоток з одинарною зірки на подвійну (рис. 6.8, а);
- перемикання з трикутника на подвійну зірку (рис. 6.8, б).

1. До перемикання обмоток статора (одинарна зірка) потужність електродвигуна:

$$P_1 = 3I_N \frac{U}{3} \cos \varphi = \sqrt{3} I_N U \cos \varphi \quad (6.1)$$

після перемикання (подвійна зірка):

$$P'_1 = \frac{3U2I_N}{\sqrt{3}} \cos \varphi = 2\sqrt{3} I_N U \cos \varphi \quad (6.2)$$

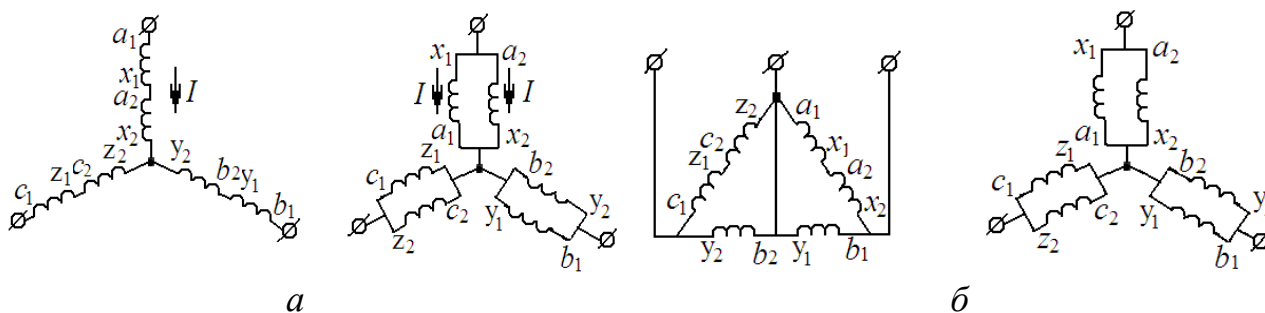


Рисунок 6.8 – Схеми перемикання двошвидкісного асинхронного двигуна для регулювання швидкості обертання:

*а – при постійному моменті; б – при постійній потужності*

При збільшенні швидкості після перемикавання напруга на кожній половині фази збільшується вдвічі і потужність також збільшується вдвічі. Одночасно число витків обмоток при паралельному з'єднанні зменшується вдвічі. В результаті, обертаючий момент, що розвивається двигуном, залишається постійним:

$$M = \frac{P_1}{\omega_1} ; \quad M' = \frac{2P_1}{2\omega_1} ; \quad M = M' = \text{const} ; \quad \frac{P_1}{P'_1} = \frac{\sqrt{3}UI_N \cos \varphi}{2\sqrt{3}UI_N \cos \varphi} = \frac{1}{2} . \quad (6.3)$$

2. До перемикавання обмоток (трикутник) потужність

$$P_1 = 3I_N U \cos \varphi \quad (6.4)$$

Після перемикавання струм у мережі та потужність електродвигуна:

$$I = 2I_N , \quad P'_1 = 3 \frac{U}{\sqrt{3}} 2I_N \cos \varphi ; \quad \frac{P_1}{P'_1} = \frac{3UI_N \cos \varphi \sqrt{3}}{3U 2I_N \cos \varphi} = \frac{\sqrt{3}}{2} \approx 0,85 , \quad (6.5)$$

отже  $\frac{M}{M'} \approx \frac{\omega'}{\omega} .$

Таким чином, за умовами нагріву потужності  $P$  і  $P'$  приблизно однакові, а обертаючі моменти змінюються назад пропорційно зміні швидкостей (рис. 6.9).

З механічних характеристик багатошвидкісних ТАД (рис. 6.9, а) видно, що при переході до  $\omega_2 < \omega_1$  електродвигун спочатку працює в режимі генераторного гальмування з віддачею енергії в мережу.

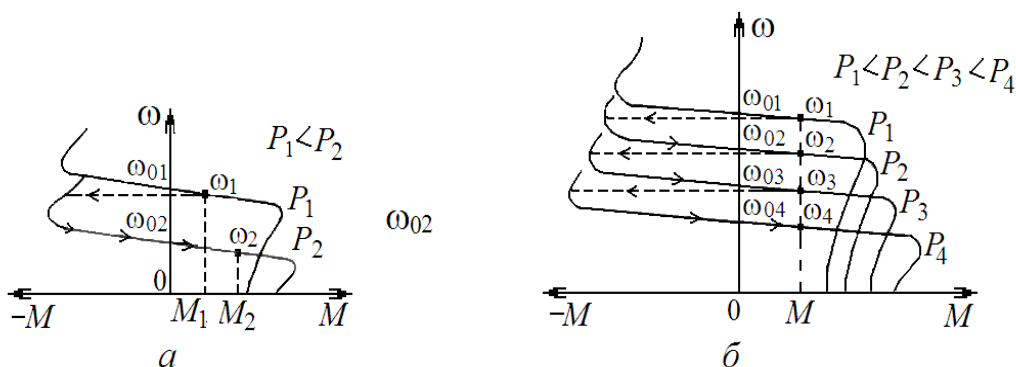


Рисунок 6.9 – Механічні характеристики багатошвидкісних асинхронних двигунів:

*а – двошвидкісний двигун при постійній потужності;*

*б – чотиришвидкісний двигун при постійному моменті*



При перемиканні обмоток отримуються можливі швидкості обертання.

У чотиришвидкісному ТАД у пазах статора розміщується дві обмотки, що відповідають різному числу полюсів (рис. 6.9, б).

Певну швидкість створює перша, або друга з цих обмоток, що переключена на більше або менше число полюсів.

В результаті регулювання є ступінчастим і використовується в підйомно-транспортних механізмах, металорізальних верстатах і інших, де плавність регулювання не є обов'язковою умовою, а механізм при цьому спрощується.

**Зміна частоти живлячого струму.** Для одержання плавного і стійкого регулювання швидкості ТАД в широких межах використовується спосіб регулювання шляхом зміни частоти напруги струму, оскільки кутова частота  $\omega_0 = 2\pi f / p$  (де  $f$  – частота мережі,  $p$  – число пар полюсів).

Зміна частоти здійснюється за допомогою незалежного джерела енергії. Даний спосіб регулювання швидкості може бути застосований для одного або декількох ТАД (рис. 6.10), що працюють в одному і тому ж режимі (наприклад, транспортні роликові пристрої прокатних станів).

Схема включення і регулювання швидкості ТАД (див. рис. 6.10) складається з обертового перетворювача частоти (ПЧ), який є джерелом електричної енергії для регульованого ТАД; електродвигуна  $M$  постійного струму, генератора постійного струму  $G$ , приводного асинхронного двигуна  $PD$ , регулювальних опорів  $R_1$  і  $R_2$  в ланцюзі збудження  $G$  і  $M$ . В якості ПЧ розглядається асинхронний двигун з контактними кільцями.

На ротор перетворювача ПЧ подається живлення від змінного струму частоти  $f_1$ . З валу двигуна  $M$  також надходить частина потужності.

Показана схема (див. рис. 6.10) забезпечує наступні режими роботи ТАД: пуск в хід, регулювання швидкості обертання за допомогою зміни частоти перетворювача ПЧ, гальмування. Напруга, що підводиться до двигуна, змінюється пропорційно частоті.

При пуску ТАД частота живлячого струму поступово підвищується; при гальмуванні відбувається зменшення частоти перетворювача.

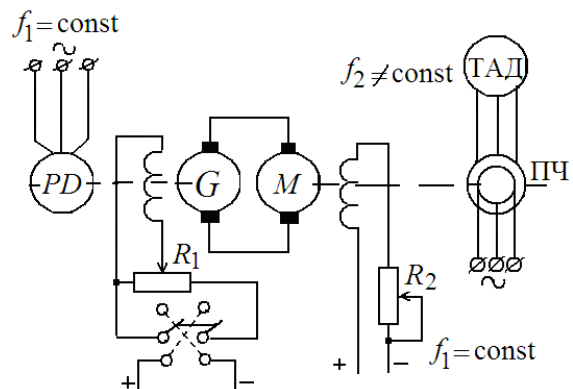


Рисунок 6.10 – Схема включення і регулювання швидкості обертання ТАД зміною частоти живлячого струму

Струм, що живить ТАД, має змінну частоту за рахунок зміни швидкості перетворювача. Цю швидкість можна регулювати:

- зміною напруги, що підводиться до електродвигуна  $M$ , шляхом виведення регулювального опору  $R_1$ ;
- зміною потоку збудження електродвигуна  $M$  шляхом введення регулювального опору  $R_2$  в ланцюг збудження електродвигуна.

Будь який швидкості перетворення відповідає певна частота  $f_2$ :

$$f_2 = f_1 s = f_1 \frac{\omega_0 - \omega}{\omega_0}. \quad (6.6)$$

Якщо  $f_1 > f_2$ , то перетворювач частоти обертається по напрямку обертання магнітного потоку, обумовленого силою, що намагнічує (н. с.) обмотку ротора:

$$\omega_1 = \frac{2\pi f_1}{p}; \quad \omega_2 = \frac{2\pi f_2}{p}. \quad (6.7)$$

Швидкість обертання вала перетворювача частоти:

$$\omega = \omega_1 - \omega_2 = \frac{2\pi}{p}(f_1 - f_2), \quad (6.8)$$

де  $\omega_1$  – швидкість обертання магнітного потоку, обумовленого н. с. обмотки статора, відносно статора;

$\omega_2$  – швидкість обертання магнітного потоку, обумовленого н. с. обмотки ротора, щодо ротора.

При зазначеній вище умови магнітні поля статора й ротора нерухливі відносно один одного.

Якщо  $f_1 < f_2$ , то вал перетворення частоти, що обертається в напрямку, протилежному обертання магнітного поля, обумовленого н. с. обмотки ротора.

$$\omega = \omega_1 + \omega_2 = \frac{2\pi}{p}(f_1 + f_2). \quad (6.9)$$

Механічні характеристики (рис. 6.11), використовуються при регулюванні швидкості електродвигуна зі зміною частоти. Можливі межі регулювання даними способом 10:1 і вище, що сприяє плавному режиму. Даний спосіб регулювання є найбільш перспективним, незважаючи на високі витрати

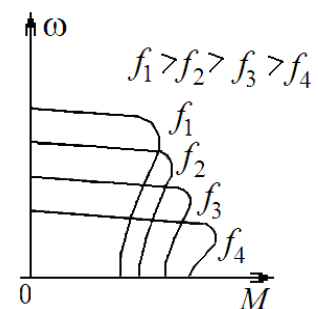


Рисунок 6.11 – Механічні характеристики ТАД при регулюванні швидкості обертання зміною частоти живлячого струму

на обладнання і громіздку схему. Для зменшення витрат в даний час розроблені схеми для перетворювачів частоти на напівпровідникових елементах.

## 6.5 Синхронні машини

Синхронна машина (СМ) – машина змінного струму, принцип дії якої заснований на взаємодії обертаючих з однаковою частотою (синхронною) магнітних полів ротора і статора (рис. 6.12).

Застосовують СМ, головним чином, для перетворення механічної енергії первинних двигунів в електричну, тобто в якості генераторів електричної енергії змінного струму.

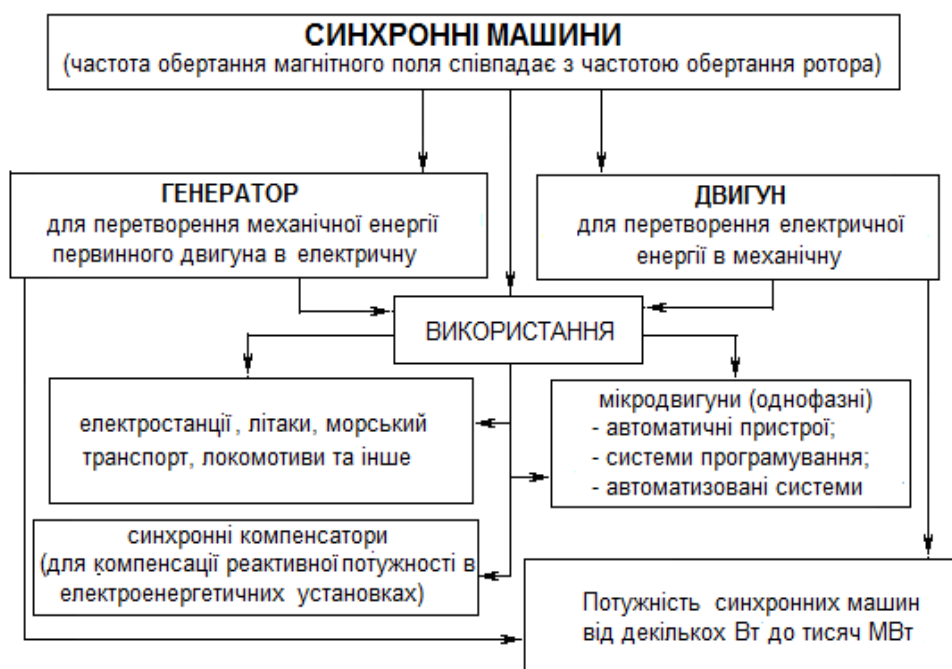


Рисунок 6.12 – Призначення і область застосування синхронних машин

## 6.6 Побудова синхронної машини і способи її пуску

Як і інші електричні машини, трифазна синхронна машина оборотна, тобто може працювати в різних режимах. Її конструкція досить універсальна і, насамперед, залежить від рівня потужності і частоти обертання ротора. Конструкція СМ представлена на рисунку 6.8, її поздовжнім і поперечним розрізами.

Всі синхронні машини в принципі мають однакову конструкцію. Вони складаються з нерухомої частини, яку називають статором, рухома частина СМ називається ротор.



**Статор** являє собою корпус, всередині якої закріплено осердя, яке має циліндричну форму і набирається з тонких пластин з електротехнічної сталі для зменшення втрат на вихрові струми і гістерезис. В осерді з внутрішньої сторони є пази, в які покладена трифазна обмотка статора. Осердя разом з обмоткою називається *якорем* (рис. 6.12).

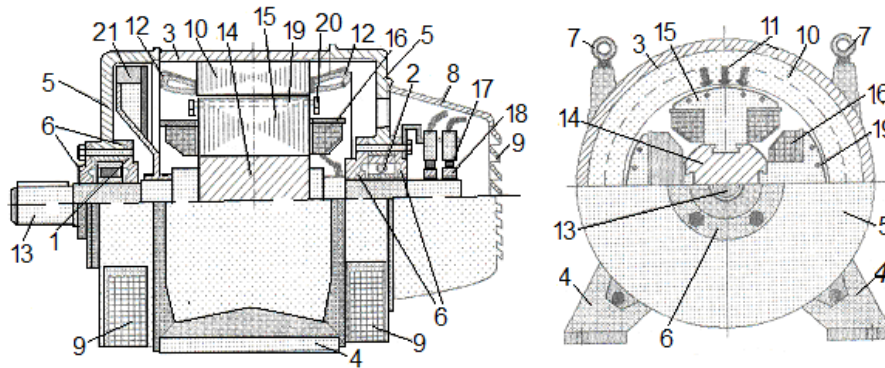


Рисунок 6.12 – Побудова синхронної машини

1, 2 – підшипники; 3 – корпус; 4 – лапи; 5 – підшипникові шипи; 7 – рим-болт;  
8 – захисний ковпак; 9 – жалюзі; 10 – осердя статора; 11 – обмотка статора;  
12 – лобові частини обмотки статора; 13 – вал; 14 – ядро; 15 – полюс;  
16 – багатівіткові котушки; 17 – щітки; 18 – контактні кільця;  
19 – стрижні ротора; 20 – короткозамикаюча обмотка; 21 – вентилятор

Фазні обмотки (рис. 6.14) з'єднуються один з одним, наприклад, за схемою «зірка» і їх зовнішні висновки  $U, V, W$  включаються в трифазну мережу. Можливо наявність і нейтрального проводу  $N$ . Обмотки просторово розташовані по дузі кола статора зі зрушенням на 120 електричних градусів.

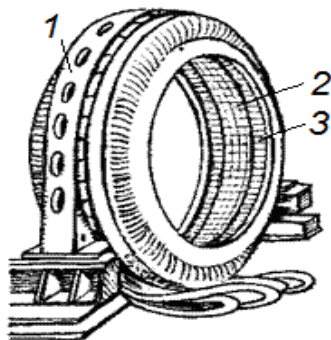


Рисунок 6.13 – Нерухомий якорь синхронної машини:

1 – корпус; 2 – осердя; 3 – обмотка

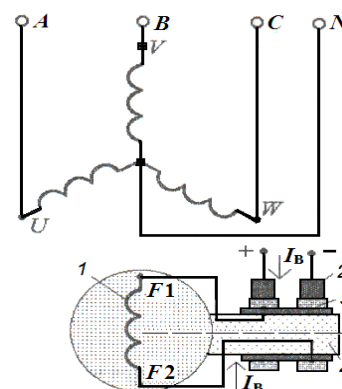


Рисунок 6.14 – Електромагнітна частина статора і ротора:

1 – обмотка збудження; 2 – щітки;  
3 – контактні кільця; 4 – вал

Статор механічно пов'язаний з ротором через підшипники, а в активній частині їх розділяє повітряний зазор.

**Ротор** знаходиться всередині статора і являє собою осердя з суцільною сталі, який знаходиться на валу. На осерді ротора розташована обмотка збудження, що живлється постійним струмом. Тому немає необхідності робити осердя ротора з шихтованої сталі, оскільки магнітний потік ротора постійний.

Всі синхронні машини можна розділити на два види. Перший з них це синхронні машини, у яких ротор виконаний з неявно вираженими полюсами і обмотка ротора рівномірно укладена у пази осердя. Неявнополюсні ротори мають, головним чином, синхронні генератори, що призначені для безпосереднього з'єднання з паровими турбінами. Такі машини називають турбогенераторами.

У синхронних машинах, які використовуються в електротранспортних засобах застосовуються явнополюсні ротори. На роторі *явнополюсної машини* (рис. 6.15) чітко виділяються магнітні полюси, на які укладається обмотка збудження у вигляді багатовиткових котушок.

Багатовиткові котушки ротора виготовляються з мідного ізолюваного дроту. Ці котушки з'єднані один з одним послідовно і утворюють обмотку збудження. Щітки 2 (див. рис. 6.14), що закріплені на статорі і контактні кільця 3, які встановлені на валу, утворюють ковзні електричні контакти. Через них обмотка збудження  $F1-F2$  живиться постійним струмом збудження  $I_B$ . Обмотка збудження ротора створює в СМ основний магнітний потік.

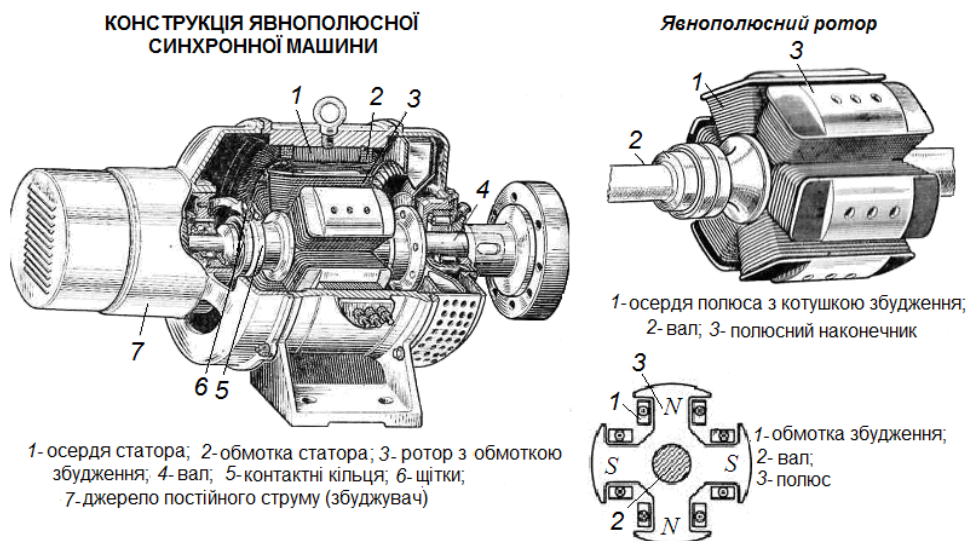


Рисунок 6.15 – Конструкція синхронної машини з явнополюсним ротором

*Збудження синхронної машини.* Залежно від способу живлення обмотки збудження розрізняються на системи незалежного збудження і самозбудження.

При *незалежному збудженні* в якості джерела для живлення обмотки збудження ротора служить генератор постійного струму (збудник – рис. 6.14), встановлений на валу ротора синхронної машини або ж окремий допоміжний генератор, що приводиться в рух синхронним або асинхронним двигуном. Незалежне збудження використовується в машинах великої потужності.

При *самовозбудженні* обмотка збудження ротора живиться від обмотки якоря через керований або некерований випрямляч (напівпровідниковий або іонний). Потужність, необхідна для збудження струму в обмотці ротора від випрямляча, невелика і складає 0,3–3% від потужності синхронної машини. При цьому, регулювання струму збудження  $I_v$  здійснюється автоматично спеціальними регуляторами збудження. Такий вид порушення використовується в машинах малої потужності, де також застосовується регулювання вручну реостатом, включеним в коло обмотки збудження ротора.

## 6.7 Робота синхронної машини в режимі генератора та двигуна

В основі принципу роботи синхронної машини лежить взаємодія двох типів магнітних полів. В синхронній машині обмотки, в якій індукується ЕРС і протікає струм навантаження, називають обмоткою якоря, а частина машини, на якій розташована обмотка збудження – індуктором. Розглянемо докладніше принцип дії синхронної машини в режимі генератора (рис. 6.16).

Робота синхронного генератора заснована на явищі електромагнітної індукції. При неробочому ході обмотка якоря (статора) розімкнута, і магнітне поле машини утворюється тільки обмоткою збудження ротора.

У процесі роботи навантаженого синхронного генератора в ньому одночасно діють МДС збудження і МДС якоря, яка посилює або послаблює поле збудження або ж спотворює його форму.

Вплив поля якоря (статора) на магнітне поле машини називається **реакцією якоря**. Вона впливає на робочі властивості синхронної машини, оскільки зміна магнітного поля в машині супроводжується зміною ЕРС, наведеної в обмотці статора, а отже, зміною та ряду інших величин, пов'язаних з цією ЕРС. Вплив реакції якоря на роботу синхронної машини також залежить від характеру навантаження і режиму її роботи.

Синхронні генератори, як правило, працюють в основному на змішане навантаження (активно-індуктивне або активно-ємнісне).

# РОБОТА СИНХРОННОЇ МАШИНИ В РЕЖИМІ ГЕНЕРАТОРА

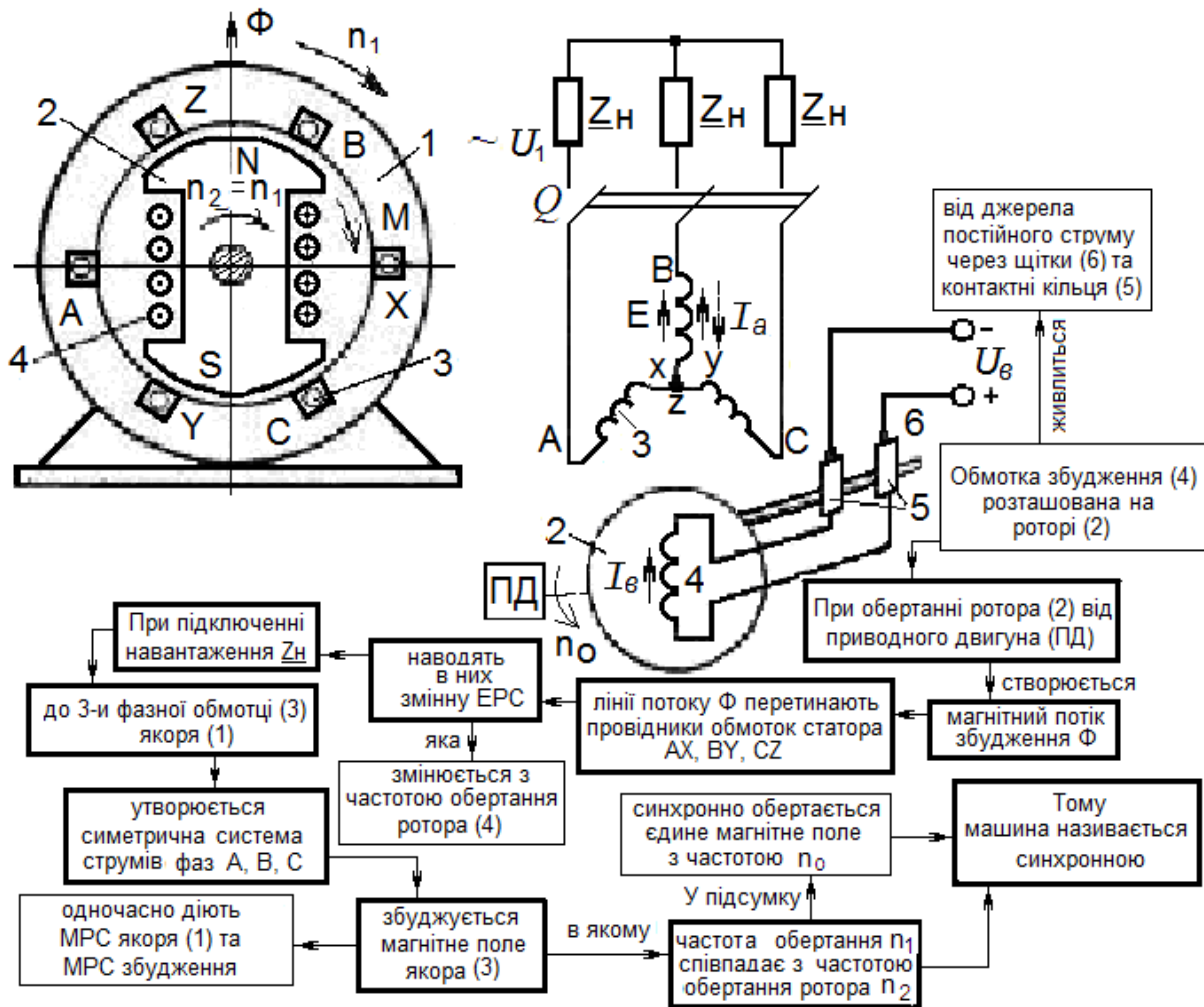


Рисунок 6.16 – Робота синхронної машини в режимі генератора

Синхронні машини застосовуються також в якості електричного двигуна, особливо в установках великої потужності (понад 50 кВт). Принцип дії синхронного двигуна показано на рисунку 6.17.

Таким чином, електричні машини змінного струму широко використовуються в різноманітних приводних системах електротехнічних пристроїв і загальнопромислових механізмах.



Рисунок 6.17 – Робота синхронної машини в режимі двигуна

### Контрольні питання

1. Перелічити основні параметри асинхронних двигунів.
2. Які існують основні режими роботи асинхронних двигунів?
3. Перелічити основні елементи асинхронних машин.
4. Як класифікуються асинхронні двигуни по конструктивному виконанні?
5. Чим відрізняється асинхронний двигун з короткозамкненим ротором від асинхронного двигуна з фазним ротором (контактними кільцями)?
6. На якому законі основана робота асинхронних двигунів?
7. У чому полягає принцип дії трифазного асинхронного двигуна?
8. Перелічити способи регулювання швидкості обертання ТАД.
9. У чому полягає спосіб регулювання ТАД шляхом зміни частоти живлячого струму?
10. Що являє собою синхронна машина?
11. Перелічити основні елементи синхронних машин.
12. Які існують системи збудження синхронної машини?
13. У чому полягає робота синхронного генератора?
14. Пояснити роботу синхронного двигуна.

## ЛЕКЦІЯ 7

### ЕЛЕКТРОТЕХНІЧНІ ПРИСТРОЇ КЕРУВАННЯ І ЗАХИСТУ

#### *План:*

*7.1 Класифікація електричних апаратів.*

*7.2 Апарати неавтоматичного керування.*

*7.3 Пускорегулюючі і струмообмежуючі апарати неавтоматичного керування.*

*7.4 Апарати керування та захисту.*

*7.5 Командні апарати і датчики.*

*7.6 Трансформатори. Основні параметри та принцип дії.*

*7.7 Конструкції трансформаторів та їх призначення.*

*7.8 Безконтактні апарати та пристрої кін автоматички.*

#### **7.1 Класифікація електричних апаратів**

Електричні апарати здійснюють функції керування рухом, захистом при ненормальних і аварійних режимах роботи автоматизованої системи.

З електричних апаратів, що застосовуються в схемах керування електроприводами, номенклатура яких досить широка, найбільш поширеними є апарати керування і захисту, до яких відносяться:

- апарати неавтоматичного керування (вимикачі, перемикачі, контролери);
- апарати автоматизованого керування недистанційної і дистанційної дії (контактори, реле, командні апарати – шляхові вимикачі, кнопки керування і інші);
- датчики, які контролюють технологічні параметри та режими роботи схеми;
- апарати захисту електричних кіл (реле, автоматичні вимикачі, запобіжники);
- комплектні пристрої (магнітні пускачі, магнітні станції, панелі керування);
- безконтактні електричні апарати для ланцюгів автоматики.

Загальними вимогами до всіх апаратів є: надійність роботи, протистояння механічних навантажень і електромагнітним зусиллям; простота їх влаштування та обслуговування; економічність (найменшу вагу, витрата дорогих матеріалів). Коротко розглянемо особливості конструкцій і роботи деяких електричних апаратів.



## 7.2 Апарати неавтоматичного керування

**Рубильник** – найпростіший електричний комутаційний апарат з ручним приводом і металевими ножовими контактами, що входять в нерухомі пружні контакти (гнізда), що використовується в електротехнічних колах для включення/відключення навантаження з великою силою струму.

Поширена конструкція рубильника, який розташований в силовому ящику і використовується в якості пускових апаратів для електродвигунів, показана на рисунку 7.1, а.



Рисунок 7.1 – Конструкції рубильників

Відкриті рубильники, перемикачі з центральною рукояткою застосовують для замикання і розмикання ланцюгів без навантаження (рис. 7.1, б), з боковою рукояткою – під навантаженням (рис. 7.1, в). Рубильники з центральним або бічним важільним приводом застосовують у силових розподільних пунктах і центральних розподільних щитах для включення і відключення електричних ланцюгів під навантаженням.

Рубильники встановлюються у вертикальному положенні з відключенням в напрямку зверху вниз, що полегшує гасіння електричної дуги.

Рубильники випускаються на номінальні струми 25–1000 А.

**Пакетний вимикач** – це електротехнічний пристрій призначений для відключення і включення двох-і трипровідних електричних кіл, для їх неавтоматичного замикання і розмикання при постійному і змінному струмі від  $10 \div 400$  А і напрузі 220 і 380 В. Такі пакетні вимикачі можуть виконувати функції і перемикачів.

В даний час промисловістю випускається велика різноманітність пакетних вимикачів (рис. 7.2) різних видів, марок, різних за виконанням конструкцій, пристрою.

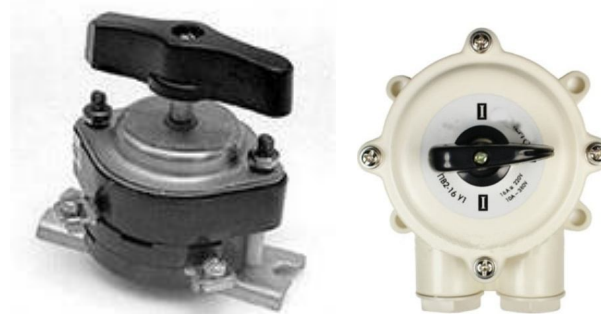


Рисунок 7.2 – Конструкції пакетних вимикачів

Пакетний вимикач складається з декількох комутаційних пакетів із загальною вертикальною віссю, на якій закріплена рукоятка. Нерухомі та рухомі ковзні контакти поміщені в пакети і забезпечені фіброві шайбами для гасіння дуги. Пружини в пакетних вимикачах налаштовані таким чином, що комутація відбувається з однією і тією ж швидкістю, незалежно від швидкості повороту рукоятки (ручки).

Пакетний вимикач застосовуються для установки в ланцюгах малопотужних електродвигунів, освітлення та сигналізації в умовах рідких включень (15-20 вкл/год).

### 7.3 Пускорегулюючі і струмообмежуючі апарати неавтоматичного Керування

**Опір** (резистор) – це електричний апарат (рис. 7.3) або його частина, за допомогою якого здійснюється обмеження величини струму в електричному ланцюзі

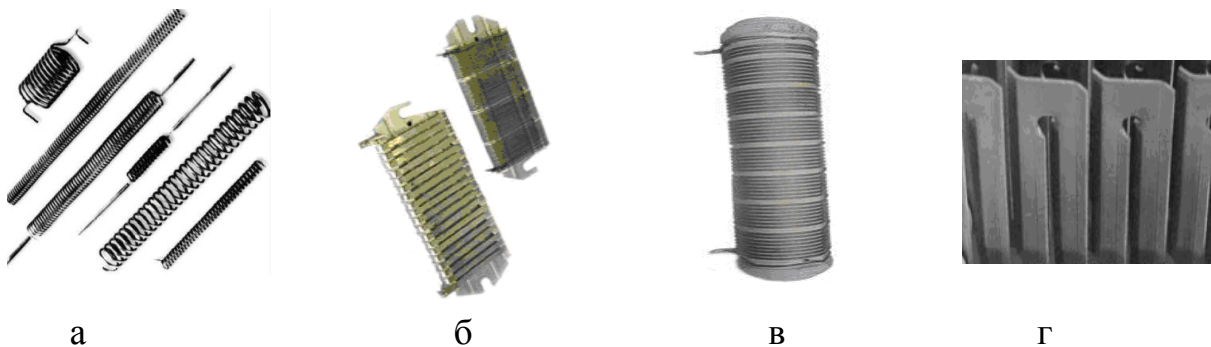


Рисунок 7.3 – Конструкції опорів (резисторів)

Призначення опорів дуже різноманітно. Найчастіше вони застосовуються для обмеження струмів і регулювання швидкості обертання в головних колах електродвигунів; для зниження напруги на затискачах робочих кіл різних апаратів і приладів в схемах керування і інших.

Опори складаються з окремих елементів, конструкція яких визначається їх призначенням та умовами роботи.

При *тривалому режимі* роботи стаціонарних установок застосовуються безкаркасні спіралі з круглого дроту або стрічки (рис. 7.3, а). Такі спіралі закріплюються на каркасі або рамі в натягнутому стані щоб уникнути замикання окремих витків.

Для тривалого режиму також використовуються рамкові опори (рис. 7.3, б), в яких спіраль зі стрічки або дроту щільно натягується на сталеву



пластину, яка стикається з фарфоровими напівциліндрами, мають жолобки. Такі опори використовуються для електродвигунів малої потужності.

При *короткочасному режимі* роботи електроустановок застосовуються опори на теплоемком каркасі з керамічного матеріалу – фарфору (рис. 7.3, в).

*Пускові опори* на значні струми, призначені для потужних електродвигунів та виконуються з литих чавунних пластин зигзагоподібної форми, що має наскрізні отвори (рис. 7.3, г). Такі опори можуть використовуватися і при повторно-короткочасному режимі роботи електроустановок.

*Пускорегулювальні резистори* (блоки резисторів) включаються в ланцюг ротора електродвигуна. Вони призначені для плавного пуску, регулювання швидкості і гальмування електродвигунів постійного і змінного струму, що працюють в електроприводах вантажопідіймальних кранів. В електроприводах, де застосовуються двигуни з короткозамкнутим ротором, пускорегулювальні резистори можуть включатися в коло статора, для обмеження пускового струму та забезпечення плавності ходу механізму.

Опори (резистори) застосовуються не тільки у вигляді самостійних апаратів, але і вбудованими в корпус реостатів.

**Реостат** – апарат, що складається з регульованого активного опору і перемикаючого пристрою (рис. 7.4). За призначенням реостати поділяються на пускові, баластні, регулювальні, навантажувальні, які включаються в ланцюг збудження електричних машин і називаються регуляторами збудження.

Реостат зазвичай включаються в момент пуску електродвигуна і потім по мірі його прискорення поступово виводиться.



Рисунок 7.4 – Конструкції реостатів

Пускорегулюючі реостати призначені для тривалого режиму роботи установки. Регулювання швидкості обертання електродвигуна досягається введенням більшого або меншого опору в ланцюг якоря або ротора електродвигуна.

**Контролер** – електричний апарат, що виконує функції перемикаючого пристрою і має ряд комутаційних положень, в результаті яких виробляються різні зміни схеми з'єднання керованого ланцюга.

Перемикання елементів схеми виробляється поворотом рукоятки, пов'язаної з валом апарату. За родом струму контролери класифікуються: по струму – постійного і змінного струму. За призначенням – силові, контакти яких включаються в головний ланцюг електродвигунів, командно-програмовані, що використовуються у привідних системах автоматизації і обчислювальної техніки.

В даний час в приводних механізмах використовуються силові контролери кулачкового типу (рис. 7.5), які широко поширені порівняно з барабанными.

Розрізняють кулачкові контролери з реостатним керуванням (рис. 7.5, а) і силові контролери з ручним приводом (рис. 7.5, б).

Кулачкові контролери забезпечені фіксуючим механізмом для зупинки вала в положенні, відповідному повному замиканні або повному розмиканню контактів. Поворот кулачкового вала здійснюється за допомогою штурвала або рукоятки. Контролер закривається знімним кожухом.

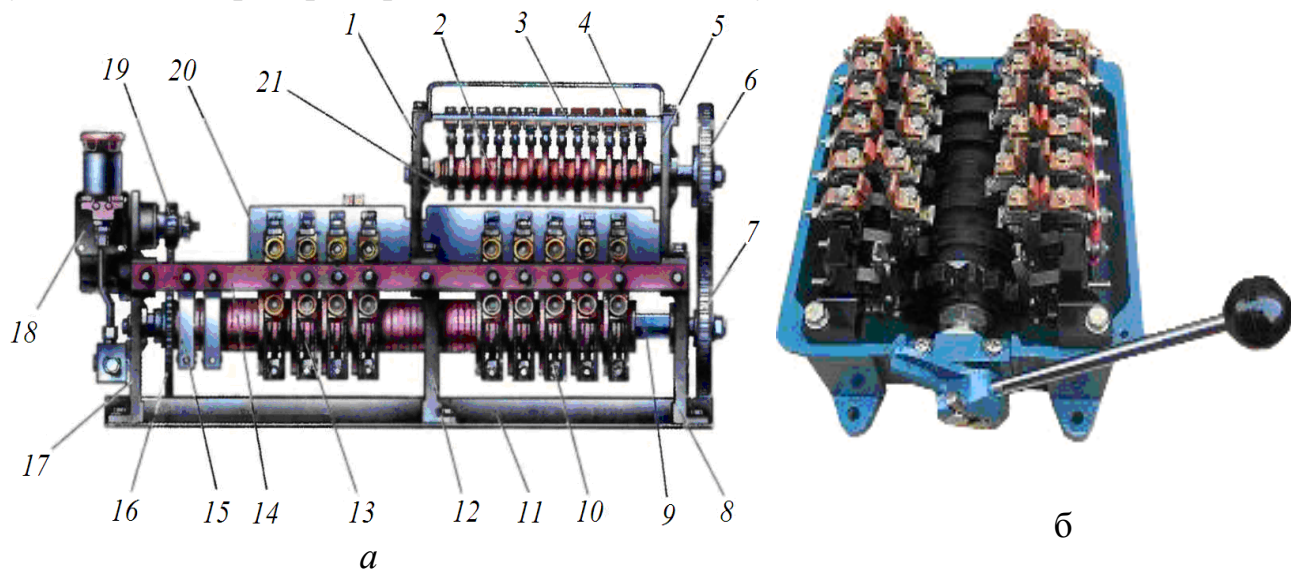


Рисунок 7.5 – Реостатний контролер (а) і силовий контролер з ручним приводом (б) :

1, 5 – рами пристрої блокування низьковольтних кіл; 2 – блокувальний кулачковий вал; 3 – рейка; 4 – блокувальний контакт; 6, 7 – шестерні приводу блокувального кулачкового вала; 8, 12, 17 – рами контролера; 9 – головний кулачковий вал; 10 – силовий кулачковий контакт; 11 – косинець; 13 – кулачкова шайба головного вала; 14 – ізоляційна рейка; 15 – фіксатори головного вала; 16, 19 – шестерні приводу головного кулачкового вала; 18 – електропневматичний привід; 20 – перегородка; 21 – кулачкова шайба блокувального вала

Номинальна потужність цих контролерів (навантаження двигуна, для якого призначений контролер) дана за умови не більше 600 включень в годину і ПВ, що дорівнює 40 %.

Силові кулачкові контролери відносяться до категорії апаратів безпосереднього ручного керування. Вони призначаються для керування крановими електродвигунами постійного і змінного струму механізмів режимних груп, а саме здійснюють пуск, реверсування та регулювання швидкості обертання електродвигунів шляхом зміни схеми і величини включених у електричне коло опорів.

Силові контролери є комплектними пристроями, які служать для забезпечення включення ланцюгів обмоток електродвигунів за заздалегідь заданою програмою, закладеної в конструкції кулачкового контролера. Простота конструкції, надійність в роботі і малі габаритні розміри створили силовим контролерам широку популярність.

Завдяки цьому контролери є найбільш надійними і зручними в експлуатації комплектними пристроями керування крановими електроприводами, оскільки в цих пристроях повністю виключені порушення заданої програми, а включення і відключення, залежні від наміру оператора і забезпечують 100 %-ву готовність приводу до роботи.

#### **7.4 Апарати керування та захисту**

Електричні апарати автоматичного керування приводяться в дію без участі обслуговуючого персоналу за допомогою пристроїв, керованих електрично при зміні параметрів або кінематичних зв'язків електроприводу і механізму.

Такі електричні апарати призначені для:

- пуску в хід електродвигунів, регулювання їх швидкості і напрямку обертання, гальмування, реверсу і відключення;
- захисту електродвигунів, механізмів електричних мереж від підвищених навантажень, коротких замикань, мимовільних включень-відключень і пошкоджень;
- блокування окремих елементів механізмів, що забезпечують задану послідовність дій або запобігають неправильну дію електричних апаратів.

Застосування автоматизованого процесу керування має велику перевагу, що дозволяє забезпечувати керування на відстані і з різних пунктів. Розглянемо деякі електричні апарати керування і захисту електричних автоматизованих систем.

**Контактор** – електромагнітний електричний апарат, призначений для частих комутацій електричних кіл. Контактор є апаратом дистанційної дії з кнопковим або автоматичним керуванням. Він також забезпечує захист електродвигунів від мимовільних повторних включень при появі напруги в мережі після його зняття або зниження. Замикання або розмикання контактів контактора здійснюється найчастіше за допомогою електромагнітного приводу.

Електромагнітні контактори отримали широке поширення, вони є основними комутуючими апаратами схем автоматизованого електроприводу.

Контактори (рис. 7.6) розрізняються за родом струму: постійного, змінного (частотою 50 і 60 Гц), а також змінного струму підвищеної частоти (до 10 кГц). Вони можуть виконуватися з керуванням на постійному, або на змінному струмі частотою 50 і 60 Гц незалежно від роду струму головного ланцюга.

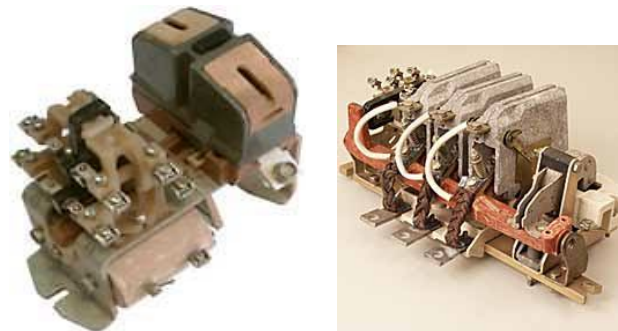


Рисунок 7.6 – Конструкції контакторів постійного і змінного струму

Контактори вибираються за основними технічними параметрами:

- 1) по призначенню й області застосування;
- 2) з категорії застосування;
- 3) за величиною механічної і комутаційної зносостійкості;
- 4) за кількістю і виконання головних і допоміжних контактів;
- 5) за родом струму і величин номінальної напруги і струму головного ланцюга;
- 6) по номінальному напрузі і споживаній потужності включають котушок;
- 7) за режимом роботи;
- 8) по кліматичному виконанню і категорії розміщення.

Контактор складається з наступних основних вузлів: головних контактів, дугогасної системи, електромагнітної системи, допоміжних контактів.

*Головні контакти* здійснюють замикання і розмикання силового ланцюга. Вони повинні бути розраховані на тривале проведення номінального струму і на виробництво великого числа включень і відключень при великій їх частоті. Нормальним вважають стан контактів, коли втягує котушка контактора не обтекається струмом і звільнені всі наявні механічні засувки. Головні контакти можуть виконуватися важільного і мостикового типу. Важільні контакти передбачають поворотну рухливу систему, мостикові – прямоходову.

*Дугогасильні камери контакторів постійного струму* побудовані на принципі гасіння електричної дуги поперечним магнітним полем у камерах з поздовжніми щілинами. Магнітне поле, переважно більшості конструкцій, збуджується завдяки включеній послідовно з контактами дугогасительной котушкою.

Контактори змінного струму виконуються з дугогасильними камерами з деіонними ґратами. При виникненні дуга потрапляє на решітку, розбивається на ряд дрібних дуг і в момент переходу струму через нуль гасне.

*Дугогасна система* забезпечує гасіння електричної дуги, яка виникає при розмиканні головних контактів. Способи гасіння дуги і конструкції дугогасильних систем визначаються родом струму головного кола і режимом роботи контактора.

*Електромагнітна система контактора* забезпечує дистанційне керування контактором, тобто включення і відключення. Конструкція системи визначається родом струму і кола керування контактора та його кінематичної схеми. Електромагнітна система складається з осердя якоря, котушки і кріпильних деталей.

Електромагнітна система контактора може розраховуватися на включення якоря і утримання його в замкнутому положенні або тільки на включення якоря. Утримання ж його в замкнутому положенні в цьому випадку здійснюється засувкою.

Відключення контактора відбувається після знеструмлення котушки під дією відключаючої пружини (начастіше), або власної ваги рухомої системи.

*Допоміжні контакти* виробляють перемикання в ланцюгах керування контактора, а також в ланцюгах блокування і сигналізації. Вони розраховані на тривале проведення струму не більш 20 А, і відключення струму не більш 5 А. Контакти виконуються як замикаючі, так і ті, що розмикають, в переважній більшості випадків мостикового типу.

Контактори змінного струму призначені для комутації кіл змінного струму і будуються, як правило, триполюсними з замикаючими головними контактами. Електромагнітні системи виконуються шихтованими, тобто набраними з окремих ізольованих один від одного пластин товщиною до 1 мм. Котушки низькоомні з малим числом витків. Основну частину опору котушки становить її індуктивний опір, який залежить від величини зазору. Тому струм у котушці контактора змінного струму при розімкнутій системі в 5–10 разів перевищує струм при замкнутій магнітній системі. Електромагнітна система контакторів



змінного струму має короткозамкнений виток на осерді для усунення гудіння і вібрації.

*Контактори постійного струму* призначені для комутації кіл постійного струму і, як правило, приводяться в дію електромагнітом постійного струму.

Контактори постійного струму випускаються в основному на напругу 22 440 В., струми до 630 А., однополюсні і двополюсні.

Призначені для комутації головних кіл і кіл керування електроприводом постійного струму напругою до 220 В.

**Магнітні пускачі** – це електричні апарати (рис. 7.7), що призначені для автоматичної комутації електричних двигунів, а також їх реверсування. Як правило, вони використовуються для керування асинхронними електродвигунами з напругою живлення до 600 В.

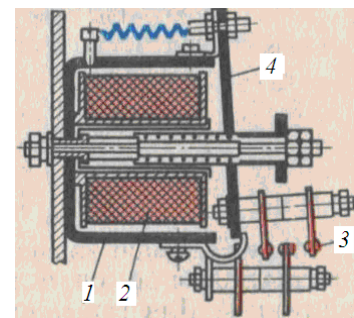


Рисунок 7.7 – Конструкція магнітного пускача

Основними елементами магнітного пускача є осердя, на якому поміщена втягуюча котушка, якір, пластмасовий корпус, механічні індикатори включення, а також основні і допоміжні блок – контакти. Крім того, у них досить часто вбудовується теплове реле для захисту електричних машин від перевантаження по струму в тривалому режимі.

При подачі напруги на котушку пускача 2, струм, що протікає в ній, притягує якір 4 до осердя 1, наслідком чого стане замикання силових контактів 3, а також замикання (або розмикання в залежності від виконання) блоку допоміжних контактів, які в свою чергу, сигналізують в систему керування про включення або відключення пристрою. При знятті напруги з котушки магнітного пускача під дією поворотної пружини контакти розімкнуться, тобто повернуться у своє початкове положення.

**Реле** – це елемент автоматичного пристрою, який при впливі на його вхід зовнішніх фізичних явищ стрибкоподібно приймає значення вихідної величини.

За принципом дії реле поділяються на: електромагнітні, індукційні, магнітоелектричні, електродинамічні, електронні.

За принципом реагування на значення величини, що вимірюється, існують реле: а) максимальні; б) мінімальні; в) спрямованої дії; г) диференціальні (різниця величин); г) балансні (додаються або віднімаються сили від декількох вимірювальних механізмів).

За часом спрацьовування ( $t_w$  – інтервал між моментом появи достатнього входного імпульсу на вимірювальному механізмі і моментом спрацьовування) реле підрозділяють на: а) швидкодіючі (до 0,05 с); б) нормальні (до 0,15 с); в) уповільнені (до 1 с); г) з затримкою часу (більше 1 с). При спеціально забезпечуваною (з можливістю регулювання) затримку спрацьовування реле називають *реле часу*.

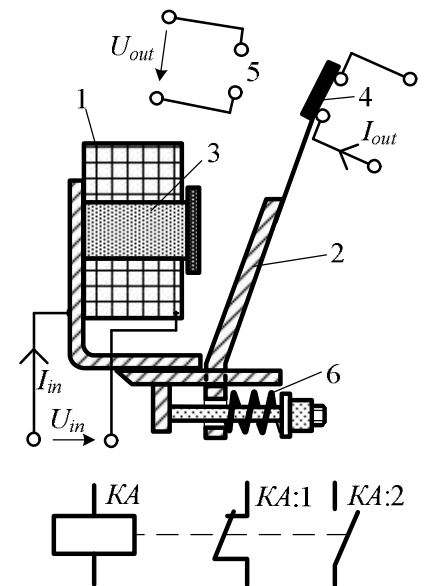


Рисунок 7.8 – Побудова та умовне позначення реле струму з поворотним якорем

Найпоширенішим типом є електромеханічні реле з поворотним якорем, які складаються з контактної системи і електромагніту. Контактна система має нерухомі і рухомі контакти. Приклад конструкції такого роду і умовні позначення показані на рисунку 7.8. Вхідними сигналами є напруга  $U_{in}$  і струм керування  $I_{in}$ , вихідними – напруга  $U_{out}$  і струм  $I_{out}$  комутованих контактів.

Принцип дії реле досить простий (див. рис. 7.8): струмова котушка КА (1) створює магнітне поле і рухливий якорь (2) притягується до осердя (3).

При цьому нормально замкнуті контакти КА:1 (4) розмикаються, розімкнуті КА:2 (5) – замикаються. Протидіюче зусилля і повернення якоря в початковий стан забезпечується пружиною (6). Регулюючи її стиснення гвинтом, змінюють значення струму і напруги спрацьовування і відпускання реле.

Приклад зовнішнього вигляду електромеханічного контактного реле струму дано на рисунку 7.9.

Електронні реле виконують різні функції, залежно від контрольованих параметрів. Наприклад, на рис. 7.10 показано універсальне електронне реле з номінальними параметрами 100В 50 Гц максимальної / мінімальної напруги та

призначене для контролю допустимої величини і наявності напруги, а також комутації електричних кіл пристроїв захисту і автоматики електроустановок вище 1000 В.

Електронне реле (рис. 7.11) захисту асинхронних двигунів спрацьовує шляхом відключення або блокування пуску двигунів при виникненні аварійних ситуацій.

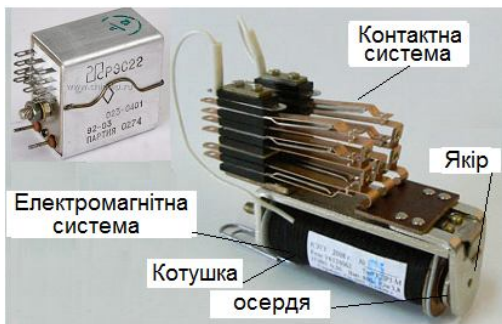


Рисунок 7.9 – Конструкція і основні елементи електромеханічного контактного реле



Рисунок 7.10 –  
Універсальне  
електронне реле  
максимальної /  
мінімальної напруги



Рисунок 7.11 – Реле  
для захисту  
електродвигунів

Таке реле охоплює діапазон струмів 160–630 А і призначене для захисту від перевантаження короткозамкнених асинхронних електродвигунів потужністю до 238 кВт. Час спрацьовування регулюється в межах 2–30 с у відповідності з фактичним режимом роботи.

Крім того, таке реле має світлодіодну індикацію наявності керуючої напруги; відключення через перегрів; обриву фази, високої температури обмотки двигуна. Основні функції реле: дистанційна зупинка; індикація положення і функція повернення у варіанті з дверного блокування панелі; регульована характеристика відключення; кнопка скидання; пробного відключення; шкала прямого пуску від мережі; контакти з гальванічною розв'язкою.

Кожен комплект захисту, побудований на сукупності різних реле, і його схема поділяються на дві частини: реагуючу і логічну.

*Реагуюча* (або вимірювальна) частина є головною. Вона складається з основних реле, які безперервно отримують інформацію про стан елемента, що захищається і реагують на ушкодження або ненормальні режими роботи обладнання або системи, подаючи відповідні команди на логічну частину захисту. В якості реагуючих застосовують: струмові реле, що реагують на зміну



величини струму; реле напруги – на зміну величини напруги, реле опору – на зміну опору. У поєднанні з цими реле застосовуються реле потужності, що реагують на зміну величини потужності при КЗ, що проходить через місце установки захисту.

*Логічна частина* (або оперативна) є допоміжною. Вона приймає команди реагуючої частини, виробляє заздалегідь передбачені операції і подає керуючий імпульс на відключення відповідних контакторів або вимикачів. У логічну частину входять електромеханічні реле і електронні прилади, що визначають відповідні зміни величин.

До числа допоміжних реле відносяться: реле часу, що використовуються для уповільнення дії захисту; реле вказівні, що необхідні для сигналізації і фіксації дії захисту; реле проміжні, які передають дію основних реле на відключення вимикачів і використовуються для здійснення взаємного зв'язку між елементами захисту.

Реле, що діють при зростанні величини, на яку вони реагують, називаються максимальними, а реле, що працюють при зниженні цієї величини, називаються мінімальними. Крім того, застосовується ряд спеціальних реле, наприклад, реле частоти, що діють при неприпустимому зниженні або підвищенні частоти; теплові реле, що реагують на підвищення температури, при перевантаженнях і деякі інші.

Кожне реле містить приймаючий і виконавчий елементи. Сприймаючий елемент в електромеханічних конструкціях має обмотку, яка живиться струмом або напругою елемента, що захищається в залежності від типу реле. Виконавчий елемент електромеханічного реле являє собою рухливу систему, яка, переміщуючись під впливом сил, створюваних елементом, що сприймає, діє на контакти реле, змушуючи їх замикатися або розмикатися.

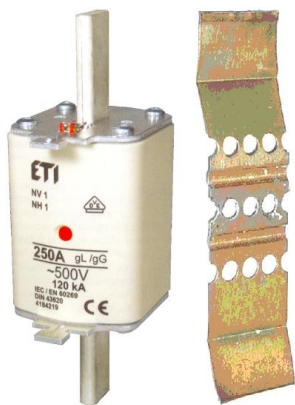
Запобіжники належать до засобів захисту споживачів і електричних кіл від струмів короткого замикання і перевантаження. У сімействі запобіжників досить широко використовуються плавкі запобіжники. Найпростішим варіантом плавкого запобіжника (рис. 7.12, рис. 7.13), розрахованого на відносно малі струми, є плавка вставка, що закріплена в пружинних тримачах, до яких підводяться контакти електричного кола.

Конструкція цього апарату забезпечують надійне кріплення та безпечні умови експлуатації плавкого запобіжника у фарфоровій або аналогічній обоймі.

Плавкі вставки запобіжників в залежності від виконуваних функцій можуть бути з дроту або стрічки і робляться з свинцю, цинку, сплаву свинцю і олова, міді, срібла та інших провідникових матеріалів.

При перевищенні струму плавкої вставки від допустимого значення, вона нагрівається до температури плавлення металу, з якого виконана, і розплавляється. В результаті електричний зв'язок розривається.

Час спрацювання запобіжника повинен бути менше часу нагріву ізоляції дроту, по якому тече струм КЗ, до максимально допустимої температури. Час спрацювання залежить від сили струму, а також від температури навколишнього середовища. Наприклад, плавкий запобіжник на номінальний струм 250 А (див. рис. 7.12), може розірвати струм до 120 кА при напрузі до 500 В із застосуванням плавкої вставки (див. рис. 7.13).



а

б

Рисунок 7.12 – Сильноточивий плавкий запобіжник (а) і плавка вставка (б)



Рисунок 7.13 – Зовнішній вигляд апарата захисту з плавкою вставкою

Плавкі запобіжники, порівняно з автоматичними вимикача, є апаратами одноразової дії, оскільки після перегорання плавкої вставки потрібна її заміна, що не завжди здійснено.

**Автоматичні повітряні вимикачі** (рис. 7.14), призначені для нечастих комутацій електричних ланцюгів і захисту їх від струмів КЗ і перевантажень. Розрив електричного кола в аварійних режимах здійснюється за допомогою контактної системи при отриманні сигналу від розчіплювачів (теплових, напівпровідникових, електромагнітних, суміщених).

У момент розриву електричних контактів виникає електрична дуга, яка може призвести до обгорання елементи конструкції вимикача, що знаходяться поруч і його струмоведучі частини. Для гасіння електричної дуги використовуються у вимикачах дугогасильні камери. Автоматичні вимикачі є апаратами захисту багаторазового дії, оскільки реагують на певні струми КЗ і перевантажень, завдяки сигналам розчіплювачів, і мають селективність (вибірковість дії).

В даний час широко використовуються швидкодіючі диференціальні електричні апарати, що виконують суміщені функції і реагують на диференційний струм в провідниках, що підводять електроенергію до електроустановці, що захищається

Наприклад, на рисунку 7.15 показаний диференціальний автомат, який здійснює захист людини від електричного струму у випадку його витoku, або при випадковому зіткненні зі струмоведучими частинами обладнання.



Рисунок 7.14 – Автоматичні вимикачі в однополюсному і триполюсному виконанні



Рисунок 7.15 – Диференціальний автомат

Завдяки цим властивостям диференціальний автомат знаходить широке застосування, як в комунальному господарстві, так і в промисловості.

## 7.5 Командні апарати і датчики

Командоапарати знаходять широке застосування при дистанційному керуванні електричними машинами і апаратами в схемах автоматизації електроприводу. Залежно від будови і дії контактів, що включають і перемикають, командоапарати можна розділити на два типу: командоапарати кнопкового управління; командоапарати обертаються.

**Командоапарати кнопкового керування** являють собою апарати неавтоматичної дії, що включаються до малопотужних допоміжних ланцюгів для дистанційного керування апаратами при напрузі 220 В.

В кнопках керування (рис. 7.16) рухомі контакти переміщуються і спрацьовують при натисканні на штовхач кнопки. Комплект кнопок, змонтованих на загальній панелі (або в блоці), являє собою кнопкову станцію (рис. 7.17).

Всі кнопки керування, що використовуються в схемах автоматики, розрізняють за кількістю і типом контактів (від 1 до 4), формі штовхача (циліндричний, прямокутний і грибоподібний), написам і кольору штовхачів, а

також за способом захисту від дії навколишнього середовища (відкриті, закриті, герметичні, вибухобезпечні).

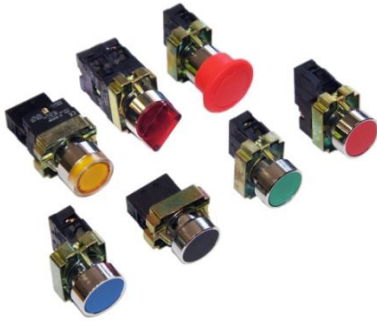


Рисунок 7.16 – Кнопки керування



Рисунок 7.17 - Кнопочні станції

**Командоапарати**, що обертаються, до яких відносяться командоконтролери (рис. 7.18). Такі апарати включаються в допоміжну ланцюг управління. По конструкції вони схожі на кулачкові контролери. Вони можуть використовуватися замість кнопкових станцій в колах керування реверсивними електродвигунами, які працюють в повторно-короткочасному режимі.



Рисунок 7.18 – Командоконтролери

**Універсальні перемикачі.** В колах керування електроприводом і апаратами широко застосовуються універсальні перемикачі типу УП. Пристрій секції такого перемикача показано на рис. 7.19. Кожна секція має два контактних з'єднання (розриву). Номінальний струм перемикача 20 А. Число контрольованих кіл (секцій) може змінюватися від 2 до 16.

Завдяки високій відключаючій здатності, великому числу кіл і комутаційних положень перемикачі УП широко використовують для



Рисунок 7.19 – Універсальні перемикачі

пуску і реверсування електродвигунів потужністю до 5 кВт при напрузі до 500 В. Ці перемикачі зручно застосовувати для зміни напрямку і частоти обертання асинхронних двигунів шляхом перемикання обмоток їх котушок.

При використанні автоматів, що мають електромагнітний привід, а також вимикачів необхідно провести цілий ряд комутаційних операцій, при яких спочатку схема готується до пуску (включаються звукова сигналізація, тощо), а потім відбувається включення апарату. В таких випадках користуються перемикачами керування, контактна система яких аналогічна контактної системи пакетного вимикача.

На відміну від перемикача типу УП вал перемикача керування має як фіксовані положення, так і нефіксовані, з яких він автоматично повертається після того, як на вал перестає діяти оператор. Перемикач має два фіксованих положення рукоятки керування (горизонтальне і вертикальне) і два нефіксованих ( $45^\circ$  від вертикального за годинниковою стрілкою і  $45^\circ$  від горизонтальної проти годинникової стрілки).

**Датчики.** До пристроїв, званими датчиками, що призначені для контролю положення механізму в системах автоматичного керування електроприводами, відносяться шляхові або кінцеві вимикачі.

Шляхові (рис. 7.20) і кінцеві вимикачі (рис. 7.21) являють собою комутаційні елементи, що кінематично пов'язані з робочою машиною і спрацьовують в залежності від переміщення рухомої частини робочої машини. Шляхові вимикачі спрацьовують в певних проміжних точках на шляху переміщення. Кінцеві вимикачі спрацьовують у крайніх точках: на початку і кінці шляху. Особливо широко шляхові і кінцеві вимикачі використовуються в схемах автоматизованого електроприводу різних виробничих механізмів. З їх допомогою відбуваються автоматичне керування приводом на окремих ділянках шляху і автоматичне вимкнення в крайніх положеннях механізму.

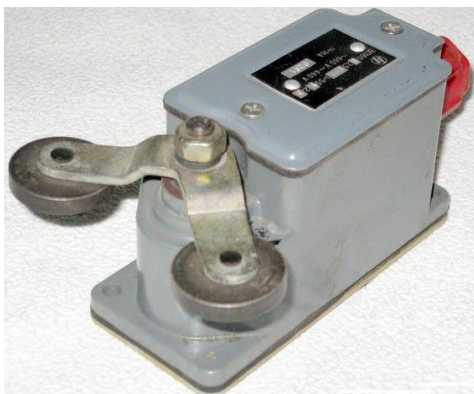


Рисунок 7.20 – Шляховий вимикач



Рисунок 7.21 – Кінцеві вимикачі

Залежно від пристрою, що здійснює замикання або розмикання контактів, шляхові і кінцеві вимикачі можна підрозділити на кнопкові (натискні), важільні, шпindelельні та обертові. Перемикання контактів у цих вимикачах здійснюється наступним чином. У кнопкових – натисканням робочого органу механізму на шток, з яким пов'язані контакти вимикача. У важільних – впливом робочого органу механізму на важіль, з яким пов'язані контакти. У шпindelельних – переміщенням гайки гвинта, зв'язаного через передачі з валом механізму. В обертових – перемикаючими кулачковими шайбами, пов'язаними з валом механізму.

В штокових вимикачах швидкість перемикання контактів визначається швидкістю переміщення виробничого механізму. При малій швидкості взаємне переміщення рухомих і нерухомих контактів відбувається повільно, що призводить до тривалого горіння дуги, яка виникає між контактами, що розмікаються і їх швидкого руйнування через оплавлення і посиленого окиснення. Для нормальної роботи такого вимикача швидкість переміщення механізму повинна бути не менше 0,5 м/хв. А для забезпечення миттєвого перемикання контактів використовуються спеціальні пружинні механізми, які звільняються за допомогою спускових механізмів (собачок). Пружини також використовуються для забезпечення необхідної сили контактного натискання.

## **7.6 Трансформатори. Основні параметри та принцип дії**

Вимірювальні трансформатори струму і напруги зменшують показники сили початкового струму, який, найчастіше, може бути настільки високим, що електричні прилади та лічильники просто виходять з ладу.

Трансформатор – це статичний електромагнітний пристрій, призначений для перетворення змінних напруги та струму за величиною без зміни їх частоти.

Історія розвитку трансформаторів почалася з 1890 року, коли Доліво-Добровольський запропонував конструкцію 3-х фазного трансформатора з симетричним розташуванням стрижнів.

За призначенням і конструкцією трансформатори різноманітні, але у своїй основі вони мають однакові фізичні процеси і принцип дії.

Тому можна вивчати їх на прикладі найпростішого варіанту – *однофазного трансформатора*, конструкція якого показана на рисунку 7.22.



Котушки (або обмотки) – це конструктивні елементи з різним числом витків. Обмотка з великим числом витків  $w_{\text{ВН}}$  – обмотка вищої напруги (ВН), з меншим числом витків  $w_{\text{НН}}$  – обмотка нижчої напруги (НН).

Щільність струму в обмотках приймається зазвичай однаковою і на рівні 2–5 А/мм<sup>2</sup>. Тому при більшому струмі більше і поперечний переріз провідника. У підсумку, в обмотці з меншим числом витків провід товщі.

Осердя трансформатора набирають з листів електротехнічної сталі завтовшки 0,3-0,35 мм. Для зменшення втрат на вихрові струми листи стали ізолюються один від одного лаковою ізоляцією товщиною 0,06–0,04 мм.

Принцип дії трансформатора ґрунтується на явищі електромагнітної індукції і являє собою логічну структуру взаємного породження величин, рисунку 7.23.

При підключенні первинної обмотки до джерела змінного струму під дією напруги  $u_1$  на первинній обмотці виникає змінний струм  $i_1$ . МДС цієї обмотки збуджує в осерді змінний магнітний потік, який індукуює у вторинній обмотці ЕРС, яку можна розглядати як вторинне джерело електроенергії.

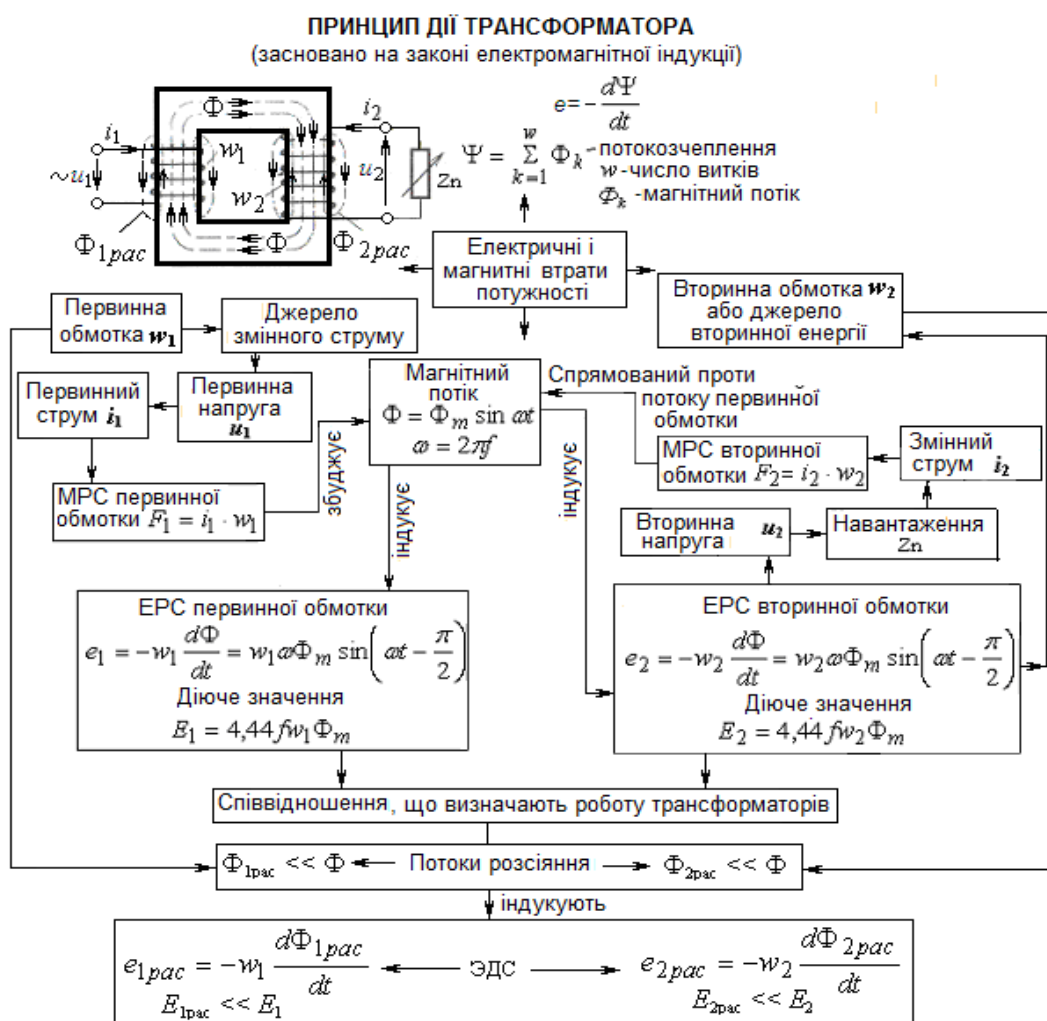


Рисунок 7.22 – Основні параметри трансформатора

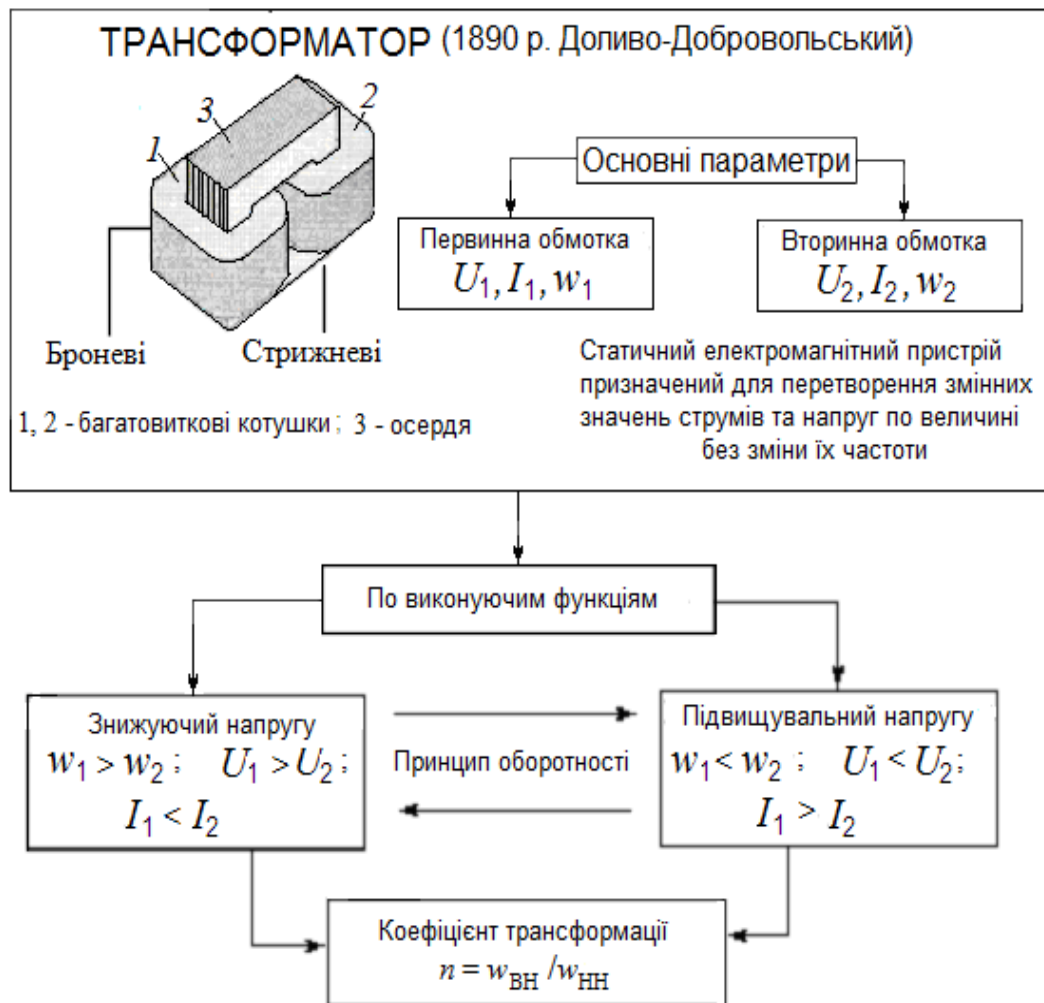


Рисунок 7.23 – Принцип дії трансформатора

Під дією ЕРС  $e_2$  на затискачах вторинної обмотки виникає напруга  $u_2$ , яка подається і на навантаження. У підсумку виникає змінний струм  $i_2$  і навантаження отримує електроенергію. ЕРС  $E_2$  залежить від числа витків  $w_2$ , тому, в принципі, її, а отже і вторинну напругу  $U_2$ , можна отримати практично будь-якої величини (більше або менше). У цьому і полягає принцип дії трансформатора – підвищувати або знижувати напругу за величиною.

## 7.7 Конструкції трансформаторів та їх призначення

**Трифазні трансформатори.** Використання електроенергії в трифазних асинхронних і синхронних двигунах, в установках з трифазними випрямлячами та в інших випадках здійснюється у вигляді трифазної системи змінного струму, тому і трансформатори для такої системи необхідні відповідні. Трансформування енергії трифазного струму можна здійснювати трьома однофазними трансформаторами або спеціальним трифазним



трансформатором, який виходить дешевше і менших габаритів. Схема трифазного трансформатора дана на рисунку 7.24.

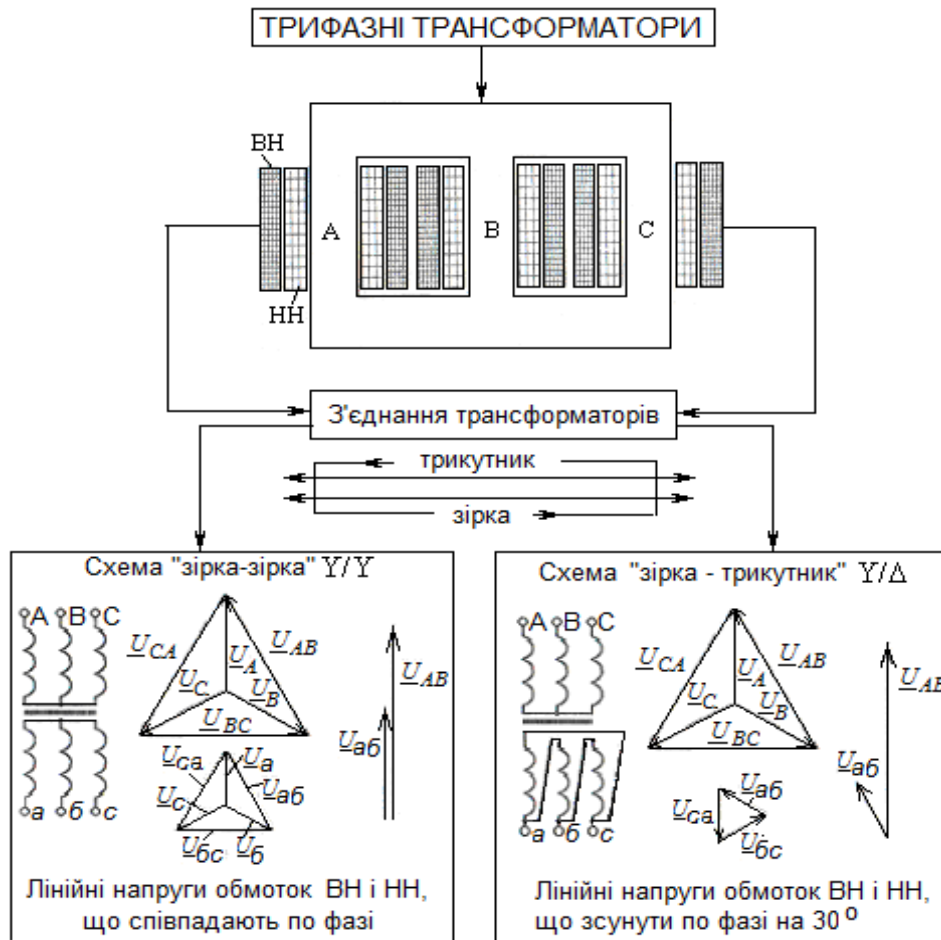


Рисунок 7.24 – Особливості трифазних трансформаторів

Як первинні, так і вторинні обмотки можуть з'єднуватися в «трикутник» і «зірку». В «зірці» може бути виведена і нейтральна точка і тоді вийде, наприклад, варіант Y/Y. В залежності від схеми з'єднання лінійні напруги на вихідних затискачах вторинної обмотки можуть збігатися по фазі з однойменною лінійною напругою первинної обмотки або бути зрушені по фазі на  $30^\circ$ . Можливі й інші варіанти.

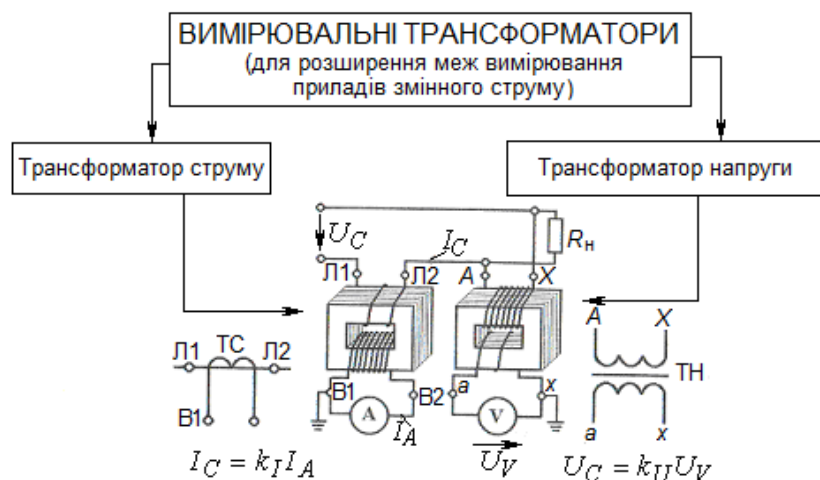


Рисунок 7.25– Схеми включення вимірювальних трансформаторів

**Вимірвальні трансформатори** (рис. 7.25) застосовуються для розширення меж вимірювання вимірвальних приладів змінного струму, що особливо необхідно при вимірюванні дуже великих напруг і струмів. Вимірвальні трансформатори дозволяють також повністю ізолювати прилади від ланцюга високої напруги, в якій проводиться вимірювання.

Трансформатор струму (ТС) використовують для включення послідовних ланцюгів вимірвальних приладів і автоматики, сигналізації та керування в електричних мережах частотою 50Гц або 60Гц. Такі трансформатори працюють в режимі, близькому до КЗ. При цьому не можна розмикати їх вторинну обмотку, тому як в цьому випадку на її затискачах знаходиться висока напруга (рис. 7.26).

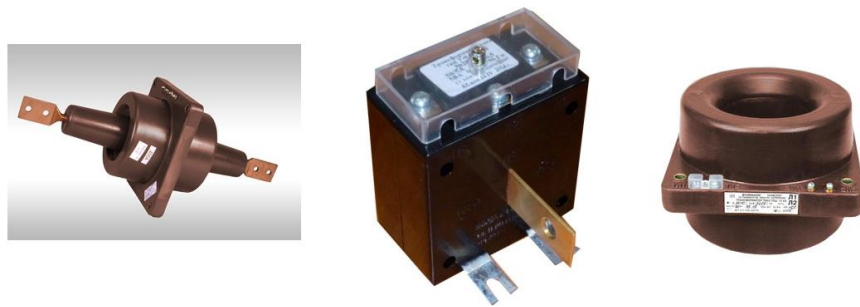


Рисунок 7.26 – Конструкції трансформаторів струму

Трансформатор напруги (ТН) використовують для включення вольтметрів і паралельних ланцюгів напруги інших приладів.

Трансформатори напруги трифазні, масляні і сухі є масштабними перетворювачами і призначені для вироблення сигналу вимірвальної інформації для електричних вимірвальних приладів, ланцюгів захисту та сигналізації у мережах змінного струму з ізольованою нейтраллю, а також для контролю ізоляції мережі (рис. 7.27).



Рисунок 7.27 – Конструкції трансформаторів напруги

Трансформатори застосовуються для зниження високої напруги 6 або 10 кВ до 100 В, а також для обліку, в тому числі комерційного і захисних пристроїв електричної енергії в установках змінного струму.

## 7.8 Безконтактні апарати та пристрої кіл автоматики

Безконтактні апарати складаються з безконтактних елементів і мають так само вимірювальні органи (ВО), що реагують і логічні частини (ЛЧ), на виході яких встановлюються вихідне реле (Р), що посиляє команду, наприклад на відключення вимикача (рис. 7.28).



Рисунок 7.28 – Безконтактні пристрої автоматики

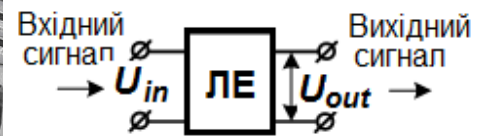


Рисунок 7.29 – Логічний

Безконтактні апарати володіють високою надійністю і вимагають незначного догляду, ніж багатоконтактні, наприклад, схеми з електромеханічним реле. У безконтактних схемах застосовуються поодинокі контактні реле в якості вихідних реле захисту. Останнім часом для цієї мети використовують більш надійні і малогабаритні, герметичні, магнітокеровані реле (геркони).

Логічна частина безконтактних реле сприймає сигнали основних органів, реагують на стан мережі, і за певною передбаченої схемою програмі, в залежності від характеру і поєднання сигналів, що надходять, провадити операції, забезпечуючи дію або не дію напівпровідникового захисту.

Логічна частина має кілька складових елементів, що виконують найпростіші операції.

Наприклад, на вхід логічного елемента ЛЕ (рис. 7.29) подаються сигнали, які при певному поєднанні вхідного сигналу викликають появу вихідного сигналу (поява або зміна напруги). Якщо логічний елемент не працює, то напруга на його виході  $U_{out}$  дорівнює нулю або менше заданого значення  $U_{in}$ . Зазвичай кожен сигнал позначається певною буквою і йому приписуються два умовних цифрових значення: 0 (відсутність сигналу) і 1 (поява сигналу). Таке позначення використовується для умовного запису логічних функцій, що характеризують залежність вихідного сигналу від вхідного. Аналіз складних

логічних схем заснованих на використанні математичних дисциплін, зокрема алгебри логіки.

В релейних схемах на напівпровідникових елементах використовуються, в основному, три найпростіших логічних операції, умовно названі АБО, І, НІ. Кожна з цих операцій може виконуватися з допомогою контактних і безконтактних елементів.

Схема, що здійснює операцію АБО (рис. 7.30, а).

Сигнали на вході позначені як  $A$ ,  $B$  і  $C$ , вихідний сигнал –  $X$ . Сигнал  $X$  на виході схеми АБО виникає при появі хоч би одного вхідного сигналу: або  $A$ , або  $B$ , або  $C$ .

Схема (рис. 7.30, б), що визначає операцію АБО, може виконуватися у вигляді контактів електромеханічних

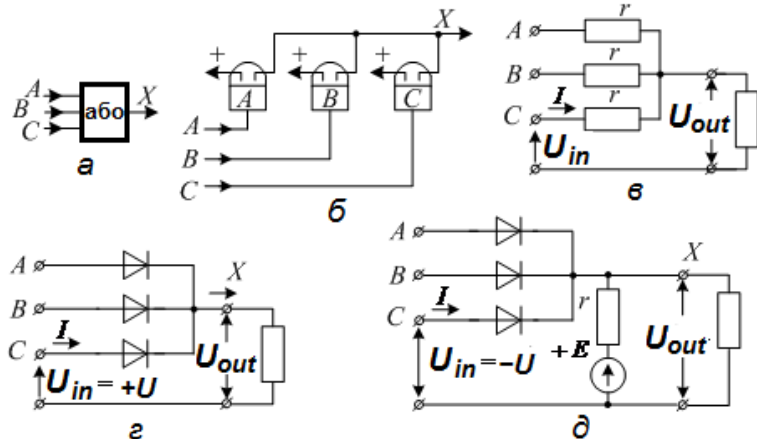


Рисунок 7.30 – Логічні схеми операції «АБО»

реле, при якій контакти електромеханічних реле  $A$ ,  $B$  і  $C$  з'єднуються паралельно. При спрацьовуванні будь-якого реле з'являється вихідний сигнал, що надходить на наступний елемент схеми. У цьому випадку реле  $A$ ,  $B$ ,  $C$  є пусковими. Безконтактна схема, що визначає операцію АБО застосовується в аналогічних випадках і може виконуватися з допомогою резисторів, діодів (рис. 7.30, в, г, д) або транзисторів.

Схема на резисторах (рис. 7.30, в) свідчить про наявність або відсутність сигналів на затисках  $A$ ,  $B$ ,  $C$ . Так, при відсутності напруги  $U_{in}$  на затискачах, напруга на виході  $U_{out} = 0$ . Це означає, що вихідного сигналу немає. При подачі напруги  $U_{in}$  хоча б на один вхідний затискач з'являється напруга, що означає появу вихідного сигналу.

Схема з діодами (рис. 7.30, г) працює аналогічно.

Схема, показана на рисунку 7.30, д, застосовується у тому разі, коли в точці  $X$  є позитивна напруга  $+E$  (у разі подання елементом сигналу на транзистор підсилювача). При подачі негативної напруги  $U_{in}$  на один із затискачів  $A$ ,  $B$  або  $C$  відповідний діод відкривається і на затискачу  $X$  з'являється негативна напруга  $U_{out} = U_{in} - I \cdot r$ .

В алгебрі логіки операція АБО називається логічною сумою і позначається знаком «+» або  $V$ .

Схема, що здійснює операцію І (рис. 7.31, а).

Сигнал  $X$  на виході цієї схеми виникає тільки при одночасній появі сигналів на всіх входах  $A$  і  $B$  схеми.

Подібна операція має місце, наприклад, у схемі максимального струмового спрямованого захисту, яка посиляє імпульс на реле часу, а також у схемі дистанційного захисту, якщо спрацьовує струмове реле і реле потужності.

Ця схема, також може виконуватися у вигляді контактів електромеханічних реле (рис. 7.31, б), при якій контакти електромеханічних реле  $A$  і  $B$  з'єднуються послідовно. Безконтактна схема також застосовується в аналогічних випадках і може виконуватися на резисторах, діодах (рис. 7.31, в, г, д) або транзисторах.

У схемі на діодах (рис. 7.31, в) при появі сигналу  $A$  у вигляді позитивної напруги  $U_{CA}$  діод  $D1$  відкривається і по резисторам  $R1$  і  $R2$  проходить струм.

Потенціал точки  $X$  дорівнює падінню напруги на  $R2$ , його величина мала і недостатня для приведення в дію елемента, підключеного до виходу схеми  $X$ . При появі одного (позитивного) сигналу  $B$  діод  $D1$  закритий і не пропускає сигнал  $B$  в точку  $X$ . Якщо ж сигнали  $A$  й  $B$  з'являються одночасно, то сигнал  $B$  відкриє діод  $D1$ . Високий позитивний потенціал від сигналу  $A$  потрапить у точку  $X$  і надійде на елемент, підключений до виходу схеми.

Аналогічно працює варіант схеми «І», зображеної на рисунку 7.31, г.

У варіанті схеми (рис. 7.31, д) напруга  $U_{out}$  на виході схеми (в точці  $X$ ) з'являється лише за умови, що на всі вхідні затискачі схеми  $A$  і  $B$  подані напруги позитивного знаку  $E_A$  і  $E_B > E_{AB}$ . У цьому випадку діоди  $D_A$  і  $D_B$  замкнені. При появі тільки одного сигналу, наприклад  $E_A$ , діод  $D_B$ , що не має сигналу, під дією  $E_{AB}$  відкритий і шунтує вихідні затискачі  $X - 0$ , тому напруга  $U_{out} = 0$  і вихідний сигнал відсутній.

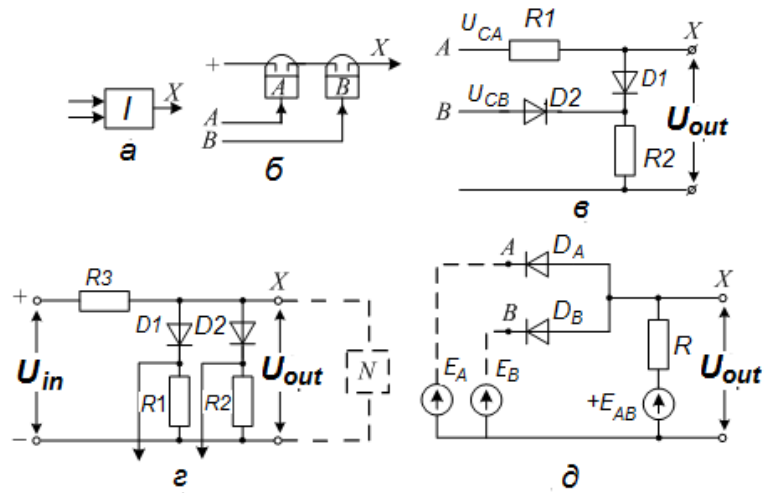


Рисунок 7.31 – Варіанти логічної схеми операції «І»



В алгебрі логіки операція «І» розглядається як логічне множення, позначається знаком  $\times$  або  $\wedge$ .

Схема, що виконує операцію «НІ» (рис. 7.32, а).

При відсутності вхідного сигналу  $A$  на виході схеми є сигнал  $X$ , при появі вхідного сигналу  $A$  сигнал на виході схеми зникає. Прикладом операції «НІ» може служити схема блокування напруги (рис. 7.32, б). Через замкнуті контакти реле  $H$  на захист подається плюс. У разі обриву ланцюга напруги (з'являється сигнал  $A$ ) реле  $H$  спрацьовує, його контакти розмикаються і знімають плюс з захисту.

Аналогічна операція в цих схемах має багато варіантів виконання. Наприклад, схема, що працює за допомогою транзистора  $VT$  показана на рисунку 7.32, в.

Нормально на базу  $VT$  подано позитивний зсув. Транзистор закритий. На виході  $X$  схеми підтримується негативна напруга, що надходить через резистор  $R2$ . При подачі на вхід  $A$  схеми негативного сигналу транзистор відкривається і шунтує вихід схеми. Напруга в точці  $X$  падає до нуля.

В алгебрі логіки операція НІ називається логічним запереченням або інверсією. Елемент НІ перетворює сигнал, що поступає на вхід, на зворотний по величині і знаку. Наприклад, якщо на вході, тобто на базі транзистора, сигнал відсутній і позитивним зміщенням ( $+E_C$ ) транзистор замкнений, то напруга на виході транзистора емітер – колектор відмінно від нуля, а затиск  $X$  має від'ємний знак. Якщо ж на вхід подано негативний потенціал, то транзистор відкритий, напруга емітер – колектор дорівнює нулю і затискач  $X$  має позитивний потенціал. Це властивість елементу НІ, виконаного на транзисторі, називають інвертуванням сигналу, а сам елемент НІ – *інвертором*.

Крім основних логічних елементів є додаткові елементи, які також використовуються в логічних схемах. До таких елементів відносяться: підсилювачі сигналів, які застосовуються на виході схем порівняння вимірювальних органів для забезпечення надійної роботи логічної схеми; елементи пам'яті, елементи на спрацьовування і повернення, різновиди релейних елементів і тригери.

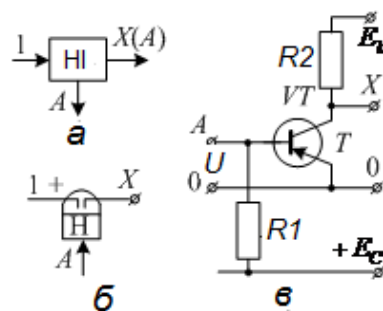


Рисунок 7.32 – Логічна схема операції «НІ»

## **Контрольні питання**

1. По якому принципу класифікуються електричні апарати?
2. Перелічити електричні апарати неавтоматичного керування.
3. З яких елементів складається конструкція опорів?
4. Які існують види опорів?
5. Чим відрізняється реостат від контролера?
6. Перелічити основні елементи контролера.
7. Які існують апарати керування електроприводом?
8. По яким параметрам вибираються електромагнітні контактори?
9. Перелічити основні елементи контакторів.
10. Що являють собою магнітні пускачі.
11. За яким принципом поділяються реле?
12. Які частини входять в комплект релейного захисту?
13. Які існують апарати захисту?
14. Перелічити командні апарати
15. Для чого використовуються трансформатори?
16. У чому полягає принцип дії трансформаторів?
17. Які існують види трансформаторів?
18. Що собою являють безконтактні електричні апарати?
19. Що є основним елементом безконтактних апаратів?
20. На чому основана робота логічних елементів?
21. Перелічити основні елементи логічних схем.



## ЛЕКЦІЯ 8

### ТИПОВІ ЗАГАЛЬНОПРОМИСЛОВІ МЕХАНІЗМИ

#### *План:*

#### *8.1 Загальнопромислові механізми циклічної дії.*

#### *8.2 Загальнопромислові механізми безперервної дії.*

#### *8.3 Схеми електроприводів загальнопромислових механізмів.*

#### **8.1 Загальнопромислові механізми циклічної дії**

Загальним для механізмів циклічної дії є режим роботи, при якому технологічний процес складається з ряду повторюваних однотипних циклів, кожен з яких являє собою завершену операцію завантаження робочого органу, переміщення його з вихідної точки в пункт призначення і розвантаження.

Основні механізми таких установок, як правило, мають реверсивний електропривод, розрахований для роботи в інтенсивному повторно-короткочасному режимі. У кожному робочому циклі мають місце не усталені режими роботи електропривода (пуск, реверс, гальмування), що роблять істотний вплив на продуктивність механізму, на динамічні навантаження приводу і механізму, на ККД установки і на ряд інших факторів. Всі ці умови пред'являють загальні вимоги до електроприводу для всієї розглянутої групи механізмів.

Незважаючи на велике різноманіття конкретних установок циклічної дії, їх робочі рухи обслуговуються обмеженим числом однотипних механізмів.

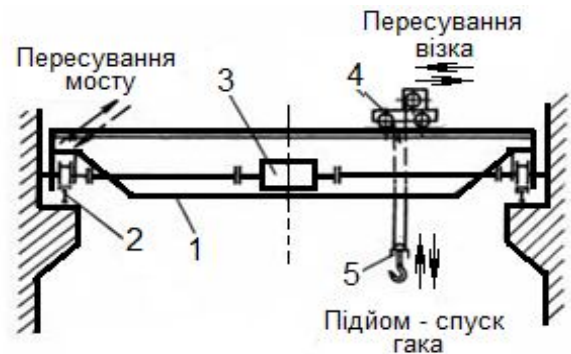
**Підйомні крани** – об'єднують велику групу підйомно-транспортних установок циклічної дії, загальне уявлення про них можуть дати характерні приклади конструктивних схем, наведених на рисунку 8.1, а, б і рисунку 8.2, а, б.

На промислових підприємствах найбільш поширеним універсальним підйомно-транспортним пристроєм є мостовий кран (див. рис. 8.1, а). Сталева конструкція моста крана 1 спирається на ходові візки і за допомогою механізму пересування 3 може переміщатися по шляхах 2, що укріплені над площею, що обслуговується, на стаціонарних опорах. Уздовж моста крана прокладені рейки, по яких переміщається візок 4 з встановленою на ній механізмом пересування і підйомною лебідкою, що здійснює підйом і спуск вантажів.

Таким чином, основними механізмами мостового крана є механізм пересування моста, механізм пересування візка і підйомна лебідка, які забезпечуються індивідуальним електроприводом.

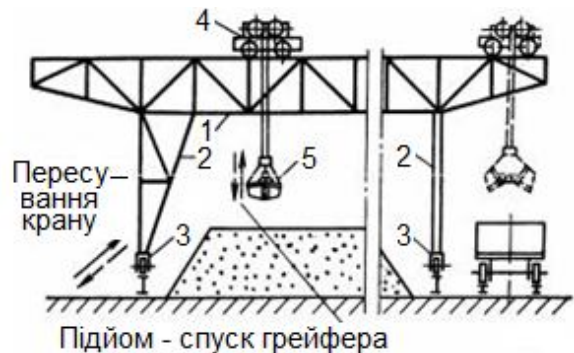
В залежності від виду вантажозахоплювального пристрою 5 розрізняють: гакові, магнітні, грейферні (з різним пристосуванням «щелепи» для захоплення вантажу), кліщові і інші крани.

На візку грейферного крана зазвичай встановлюють дві лебідки, одна з яких служить для закривання грейфера. Підйом закритого грейфера здійснюється обома лебідками.



1 – міст; 2 – шляхи; 3 – механізм пересування; 4 – візок; 5 – гак

а



1 – несуча ферма; 2 – опори; 3 – візки; 4 – механізм пересування; 5 – грейфер

б

Рисунок 8.1 – Зовнішній вигляд і конструктивні схеми мостових (а) і козлових (б) підйомних кранів

На мосту крана на одному рейковому шляху можуть встановлюватися дві або три візки. Так, магнітно-грейферний кран має магнітний візок з лебідкою підйому магніту і грейферний візок з лебідками підймання та замикання грейфера. Такий кран має три механізми пересування і три підйомні лебідки. Таким чином, зазначені модифікації кранів мають однотипні механізми, але в різній кількості.

**Козлові крани**, які призначені для роботи під відкритим небом, у відношенні робочих рухів цілком аналогічні мостовим. Варіант конструктивної

схеми такого крана наведено на рисунку 9.1, б. В даному випадку, несуча ферма крана 1 спирається на рухомі опори 2, переміщаються за допомогою декількох пар ходових візків 3, частина з яких є рушійними. Відповідно козловий кран має ті ж основні механізми, що і мостовий: механізм пересування моста (іноді з індивідуальним приводом кожної провідної візки), механізм пересування візка 4 і розміщені на ній лебідки для підймання та замикання грейфера 5.

Таку ж конструктивну схему і ті ж основні механізми мають перевантажувальні мости (наприклад, рудні, вугільні перевантажувачі), що призначені для обслуговування великих відкритих складських територій.

Це великі підйомно-транспортні споруди, проліт яких у ряді випадків перевищує 100 м. Кількома сотнями метрів вимірюється проліт так званих кабель-кранів, у яких замість жорсткої ферми 1 використовується несучий сталевий канат.

Найбільш поширеними на будівельних ділянках є **поворотні баштові крани** (рис. 8.2).

Будівельний баштовий кран (рис. 8.2, а) має вежу 1, портал якої спирається на ходові візки 2. У верхній частині вежі є поворотний круг 6, на якому обертається поворотна головка 4 вежі зі стрілою 3 і консоллю противаги 5. Зміна вильоту гака 8 досягається переміщенням візка 7 вздовж стріли (в інших конструкціях для цієї мети використовується підйом – опускання стріли). Всі робочі рухи крану обслуговуються наступними механізмами: підйомною лебідкою, механізмом пересування крана, механізмом пересування візка і механізмом повороту.

Необхідно зауважити, що на баштових кранах конструктивно поворот стріли здійснюється за допомогою звичайної тягової лебідки з нескінченним канатом.

**Портальний кран** (рис. 8.2, б) є найбільш характерним представником групи поворотних кранів. Підставою крана є портал 1, який за допомогою механізму пересування з індивідуальним електроприводом ходових візків 4 може переміщатися по підкранових коліях.

Поворотна платформа 2 спирається на портал через роликоне коло або поворотні балансирні візки, що катаються по кільцевій рейці при обертанні і повороті платформи завдяки механізму. Кут нахилу стріли 3 може змінюватися за допомогою лебідки зміни.

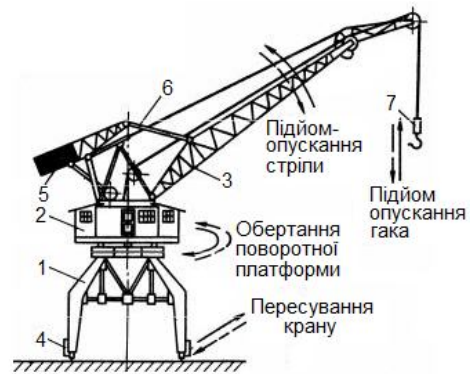
Необхідна врівноваженість крана при різних вильотах стріли, що забезпечується рухомою противагою 5, пов'язаною зі стрілою важелем 6.

Підйом і опускання гака 7 здійснюється підйомної лебідкою, встановленої в машинному залі платформи 2.



1 – вежа; 2 – візки крану; 3 – стріла; 4 – головка вежі; 5 – консоль противаги;  
6 – поворотний круг; 7 – візок; 8 – гак

а



б

Рисунок 8.2 – Зовнішній вигляд і конструктивні схеми баштових і порталних (б) підйомних кранів:

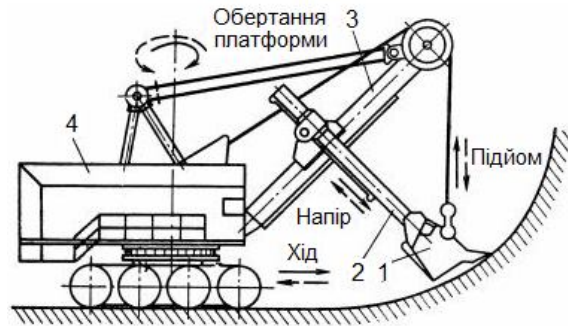
1 – портал; 2 – поворотна платформа; 3 – стріла; 4 – ходові візки;  
5 – противага; 6 – стріла важеля; 7 – гак

Багато спільного відносно робочих рухів і конструкції з порталними кранами мають **одноковшовні екскаватори** (рис. 8.3 та рис. 8.4).

Невеликі екскаватори можуть при необхідності працювати в якості підйомних кранів, тому виконуються універсальними, зі змінним робочим обладнанням.

Більш великі екскаватори (драглайни, див. рис. 8.4) є спеціалізованими землерийними машинами, призначеними для черпання ґрунту або попередньо зруйнованої вибухом скельної породи, і переміщення наповненого ковша до місця вивантаження.





1 – ківш; 2 – рукоять; 3 – стріла; 4 – платформа

Рисунок 8.3 – Загальний вигляд і структурна схема екскаватора-лопати

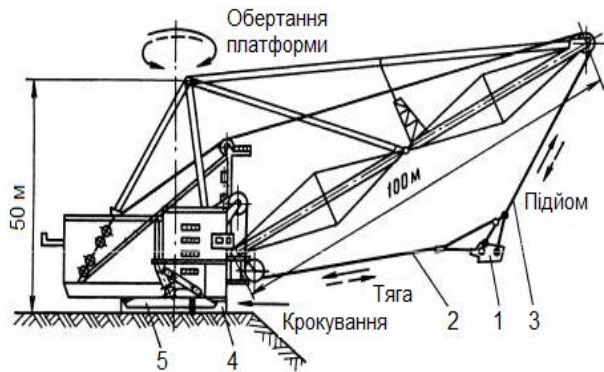


Рисунок 8.4 – Загальний вигляд і схема спеціалізованої землерийної машини:

1 – ківш; 2 – тяговий канат; 3 – підйомний канат; 4 – плита;

5 – механізм повороту

По конструкції робочого органу розрізняють декілька типів екскаваторів: пряма лопата, зворотна лопата, лопата-струг, скребок і інші. По конструкції механізму пересування можна виділити гусеничні і крокуючі екскаватори, а також екскаватори на залізничному та рейковому ході.

Екскаватори з ємністю ковша більше  $3 \text{ м}^3$  зазвичай мають устаткування прямої лопати або драглайна.

Драглайни (одноковшовні екскаватори з ковшем, що прикріплений до стріли за допомогою канатного зв'язку) застосовуються для робіт, що вимагають переміщення породи на великі відстані при порівняно м'яких ґрунтах; на твердих ґрунтах, але з меншим радіусом дії працюють лопати.

Екскаватор-лопата (див. рис. 8.3) має ківш 1, жорстко пов'язаний з рукояттю 2, яка шарнірно закріплена на стрілі 3 і має можливість поступального переміщення. Наповнення ковша здійснюється за допомогою двох робочих рухів: підйому ковша і поступального руху рукоятки, що створює напір для впровадження зубів ковша в ґрунт. Третім робочим рухом є поворот платформи 4 екскаватора, що необхідно для переміщення ковша, і є на всіх машинах незалежно від типу робочого устаткування. На стрілі укріплений

допоміжний двигун, який служить для відкривання днища ковша при розвантаженні. Вал двигуна тросом пов'язаний з засувом, що утримує днище ковша в закритому положенні. Основними механізмами екскаватора-лопати є: механізм підйому (підйомна лебідка), механізм напору і механізм повороту. Необхідні переміщення екскаватора виробляють за допомогою гусеничного механізму переміщення (ходу).

Жорстке обладнання екскаватора –лопати створює сприятливі умови для навантаження ґрунту в транспорт. Кар'єрні екскаватори призначені для розробки скельних ґрунтів, у зв'язку з чим мають вкорочене обладнання (стрілу, рукоять) підвищеної міцності.

Екскаватор-драглайн (див. рис. 8.4) має ківш 1, вільно підвішений на канатах. Наповнення ковша (черпання) проводиться шляхом підтягування його до машини за допомогою тягового каната 2. При цьому ківш впроваджується в ґрунт під дією власної ваги й утримується від надмірного заглиблення за допомогою підйомних канатів 3. В процесі роботи здійснюється підйом ковша до голови стріли і утримується завантажений ківш від перекидання. Третім робочим рухом в циклі екскавації є поворот на вивантаження і в забій.

Наприкінці повороту на вивантаження тягові канати послаблюються, що викликає перекидання і розвантаження ковша.

Таким чином, основними механізмами екскаватора-драглайна є однакові по конструкції підйомна і тягова лебідки і механізм повороту 5.

Драглайни використовуються для робіт при відносно слабких ґрунтах. За умови виконання таких робіт екскаватор часто повинен стояти на насипному ґрунті і переміщатися по цій м'якій основі. Для зменшення тиску на ґрунт при роботі драглайн спирається на круглу плиту великого діаметру (база 4), а для пересування використовується механізм кроку з опорними лижами 5 великої площі.

**Маніпулятори** – технічні пристрої, призначені для відтворення деяких рухових функцій рук людини. За способом керування поділяються маніпулятори на дві принципово різні групи:

а) маніпулятор, що копіює (телеоператор) – керується задаючим пристроєм, що представляє собою механізм, який подібний механізму «руки» маніпулятора. Рух руки оператора, за допомогою слідкуючих приводів відтворюється виконавчим органом маніпулятора.

Такі маніпулятори необхідні головним чином для виробництва робіт в умовах, небезпечних для життєдіяльності людини, наприклад, у зонах високих температур, радіації, хімічно активних середовищ;

б) координатний (командний) маніпулятор – керується оператором шляхом впливу на командоапарати, що забезпечують включення і відключення приводів переміщень за відповідними координатами і завданням їх швидкостей або дозованих переміщень. Відсутність задаючого механізму, що копіює, спрощує конструкцію маніпулятора і полегшує автоматичне програмне і адаптивне керування його роботою, дозволяючи покласти формування задаючих сигналів по кожній координаті на ЕОМ. У разі повної автоматизації робочого циклу координатний маніпулятор може бути названий промисловим роботом.

**Промислові роботи** – автоматичні маніпулятори з програмним керуванням, основне призначення яких та режими роботи повністю відповідають загальнопромисловим установкам циклічної дії.

Конструктивні схеми маніпуляторів та промислових роботів досить різноманітні, залежать від вибору системи координат, в якій повинно здійснюватися переміщення «схвату», і суттєво ускладнюються з розширенням універсальності призначення.

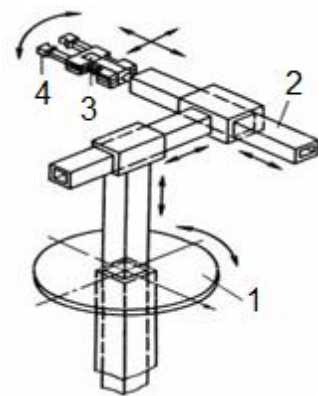
В якості прикладу, коли виконуються роботом операції забезпечуються чотири ступенями свободи (рис. 8.5), наведена схема маніпулятора, що працює в рухомій системі прямокутних координат, пов'язаної з поворотним столом 1.



а



б



в

Рисунок 8.5 – Маніпулятори: а – копіючий; б – координатний;  
в – схема маніпулятора-робота з чотирма ступенями свободи:  
1 – механізм повороту; 2 – рука; 3 – кисть; 4 – схват

Рука 2 має три ступені свободи, відповідні позначених на рисунку напрямками можливих переміщень, четверта ступінь свободи забезпечується поворотом столу 1. Кисть 3 жорстко пов'язана з рукою і має додатковий рух



затиску і звільнення переміщуваної деталі схватом 4. Відповідно робота маніпулятора забезпечується механізмами і приводами підйому горизонтального переміщення кисті і повороту столу. Додатковий привід забезпечує роботу схвата.

Доречно зіставити розглянуті приклади роботів з кранами екскаваторів. Очевидна спільність цих пристроїв, відносяться до класу промислових координатних маніпуляторів, і їх робочий рух обслуговуються однотипними за призначенням і режимам роботи механізмами. В той же час зрозуміла і специфіка промислових роботів, що виявляється в більшій складності і своєрідності конструкцій, а також і великих можливостей реалізації складних просторових переміщень схвата.

## 8.2 Загальнопромислові механізми безперервної дії

Усі машини та механізми безперервної дії, виключаючи компресори, об'єднані спільністю призначення, оскільки їх основною функцією є транспортування людей, штучних і сипучих вантажів, а також рідин і газів.

Безперервність дії є фактором, що забезпечує більш високу продуктивність машин, простоту і високу надійність застосовуваних систем електроприводу та автоматизації їх робочих процесів.

Тому у всіх випадках використання механізмів безперервної дії дає значний економічний ефект.

**Конвеєри** є найбільш поширеними механізмами безперервного транспорту сипучих і штучних матеріалів. В залежності від типу тягового елемента конвеєри поділяються на три групи: стрічкові, ланцюгові і канатні.

У переважній більшості *стрічкових* конвеєрів (рис. 8.6, а) стрічка 6 одночасно виконує функції несучого і тягового органів. У конструкцію такого конвеєра входять наступні основні елементи: приводний барабан 1; натяжний барабан 7; відвідний барабан 4; рухомі опорні елементи – ролики 5. Приводний барабан спільно з редуктором 2 і двигуном 3 утворює приводну станцію. Натяжний барабан разом з пристроєм 8, створює зусилля на його висі, утворює натяжний пристрій, або натяжну станцію. Порівняно з іншими типами конвеєрів, призначених для транспортування сипучих вантажів, стрічковий конвеєр характеризується найбільшими швидкістю і продуктивністю.

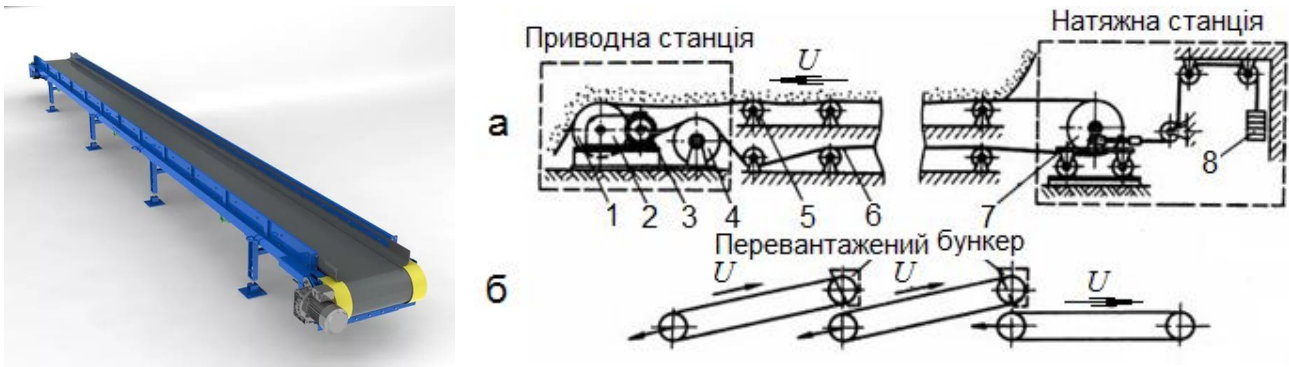


Рисунок 8.6 – Зовнішній вигляд і кінематична схема односекційного (а) і багатосекційного (б) стрічкових конвеєрів

В багатосекційному виконанні з проміжними перевантажувальними станціями (рис. 8.6, б) конвеєрна траса може бути виконана на будь-яку довжину. Володіючи високими швидкостями, продуктивністю і значним радіусом дії, стрічковий конвеєр в змозі конкурувати автомобільним і залізничним транспортом.

**Ланцюгові конвеєри** знаходять широке застосування в промисловості, обслуговуючи різні технологічні процеси виробництва: складальні, фарбувальні, сушильні лінії і інші.

На рисунку 8.7, а схематично показано поширений в промисловості підвісний конвеєр та основні елементи. Вигин траси забезпечується або зірочками 1–5 відповідним профілем опорного елемента 7, по якому котиться опорний ролик 8 з вантажозахоплюючим пристроєм 9 з вантажем, що транспортується та переміщується за допомогою тягового органу – ланцюгу 6.

Різновидом ланцюгового конвеєра є скребковий конвеєр (рис. 8.7, б). Перегородки на несучому елементі (скребки) забезпечують можливість надійного зчеплення з несучим органом різних зернових і кускових насипних вантажів, що транспортуються. Широке поширення цей конвеєр отримав у вуглевидобувній промисловості, на збагачувальних фабриках, підприємствах хімічної промисловості та ін.

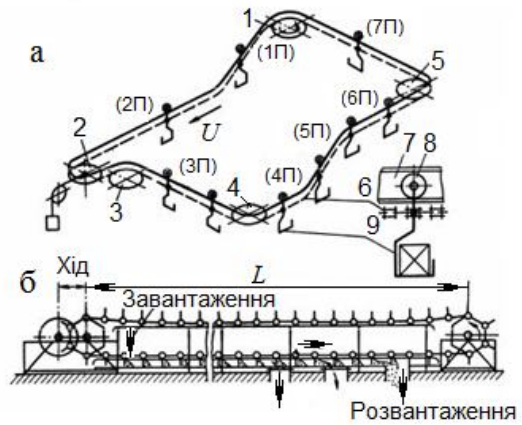


Рисунок 8.7 – Ланцюговий конвеєр підвісний (а) та скребковий (б)  
 1 – 5 – зірочки; 6 – ланцюг; 7 – опорний елемент; 8 – опорний ролик;  
 9 – вантажозахоплювачий пристрій; П – підвіски

Пасажирським варіантом ланцюгового конвеєра є **ескалатор**, що переміщується по похилій трасі (рис. 8.8). Жорсткий опорний елемент забезпечує необхідний ступінчастий профіль пластинчастого несучого елемента.

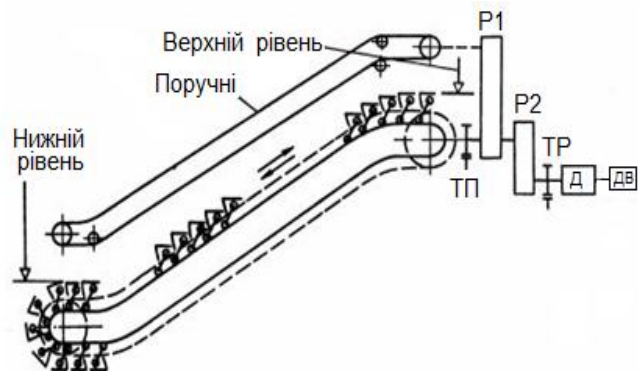
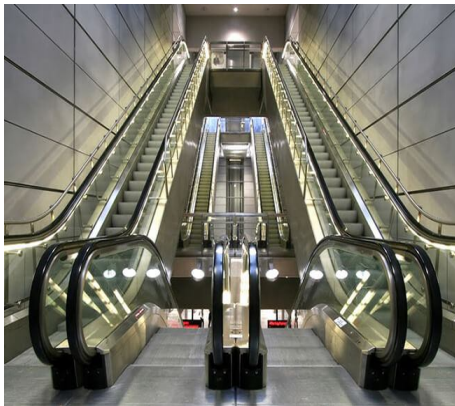


Рисунок 8.8 – Ескалатор: P1 і P2 – редуктори; Д – приводний двигун;  
 ТП і ТР – привод

Рух сходів і поручнів синхронізовано завдяки загальному приводу від двигуна Д через редуктори P1 і P2. Ескалатор застосовується в метро, великих магазинах, установах. Швидкість руху ескалаторів становить 0,4–1,0 м/с, а продуктивність зазвичай не перевищує 8100 пасажирів на годину. Слід зауважити, що спроба підвищити продуктивність ескалатора за рахунок збільшення швидкості його руху понад 1 м/с не дає ефекту, оскільки при цьому зменшується заповнення сходи пасажирями, також утруднюється вхід на сходи і вихід з них.

В адміністративних будівлях, відносно невисоких (п'ять – десять поверхів), але з великим міжповерховим потоком пасажирів як вгору, так вниз, знаходять застосування вертикальні багатокабінні підйомники безперервної дії. Число кабін такого підйомника дорівнює збільшеному на два подвійного числа поверхів. Такий транспортуючий пристрій являє собою ланцюговий конвеєр. Для безпеки входу і виходу пасажирів при безперервному русі підйомника його швидкість обмежується значенням 0,3 м/с.

**Канатний конвеєр** являє собою різновид підвісного конвеєра (дороги), в якому тяговими і несучими елементами є канати (рис. 8.9).

Рух дороги здійснюється за допомогою приводного шківів 1, а необхідний натяг каната забезпечується натяжним пристроєм 2.

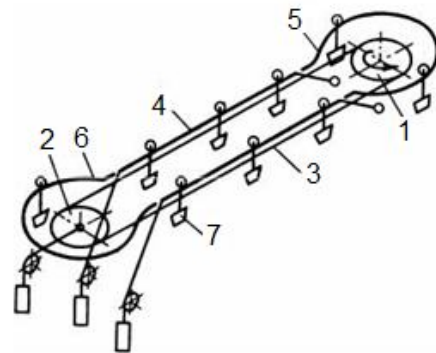


Рисунок 8.9 – Зовнішній вигляд і схема кільцевої канатної дороги:

1 – *приводний шків*; 2 – *натяжний пристрій*; 3 – *тяговий канат*; 4 – *несучий канат*; 5 і 6 – *опорні рейки* 7 – *вагонетки*

При підході вагонеток 7 до місця завантаження або розвантаження вони сходять з несучого каната 4 і переходять на опорні рейки 5 або 6, де відбувається автоматичне відчеплення від тягового каната 3. Після завантаження або вивантаження вагонетки самоходом переходять з опорної рейки на несучий канат і автоматично зчіплюються з тяговим канатом. Швидкість кільцевих канатних доріг зазвичай не перевищує 3,3 м/с, а довжина в багатосекційному варіанті може досягати декількох десятків кілометрів.

Канатні дороги ефективно застосовуються при будівництві гідралічних металевих споруд і ряду інших промислових об'єктів, на великих гірських розробках, а також як засіб пасажирського транспорту для доставки людей у гори чи до місць відпочинку і спорту.

Механізми **відцентрового** (рис. 8.10) і **поршневого типу** (рис. 8.11):

– насоси – група механізмів, що призначені для транспортування рідких і хімічних середовищ (система водопостачання, каналізації та ін.);



– вентилятори – група механізмів, що здійснює транспортування газів (шахтні; промислові, газодувки; димососи та ін.);



Рисунок 8.10 – Насос відцентрового типу



Рисунок 8.11 – Зовнішній вигляд і схема поршневого компресора

– компресори – механізми, призначені для отримання і транспортування стисненого повітря з метою використання його енергії, для створення сильного дуття, для приводу пневматичних гальм, робочих машин (молотів, пресів), інструмента (відбійних молотків) і ін.

За принципом дії насоси, вентилятори та компресори поділяються на дві основні категорії:

- механізми відцентрового типу (див. рис. 8.10), що володіють високою подачею, простій конструкції і надійні в експлуатації;

- механізми поршневого типу (див. рис. 8.11) більш складні по конструкції і умов експлуатації, але володіють високим ККД і здатні забезпечити стиснення газів до дуже високих тисків (до  $10^5$  кПа).

Тому такі механізми використовуються головним чином в якості компресорів невеликої та середньої продуктивності та в деяких випадках в якості невеликих насосів.

**Ліфт** – механізм вертикального транспорту, призначений для транспортування пасажирів та вантажів у житлових і виробничих приміщеннях і будівлях.

За призначенням ліфти поділяються на: вантажні з провідником і без провідника, вантажо-пасажирські, пасажирські і спеціального призначення.

По робочій швидкості: швидкохідні ( $\leq 1$  м/с), тихохідні ( $\leq 0,5$  м/с), швидкісні ( $\leq 2,5$  м/с), високошвидкісні ( $> 2,5$  м/с).

*Основне обладнання ліфта:* кабіна, підйомна лебідка, канати, противага, направляючі, обмежувач швидкості, упори, двигун, електромеханічне гальмівний пристрій, апаратура управління.

Все обладнання ліфта розташовано у шахті та у приміщеннях вище або нижче неї. Є кілька основних варіантів розміщення обладнання, які визначаються особливостями будівлі і вимогами, що пред'являються до ліфтів.

Розрізняють ліфти з нижнім і верхнім розташуванням електроприводу.

При верхньому розташуванні ЕП ліфтова установка має більш високий ККД, менший знос канатів, менше навантаження на будівельну конструкцію будівлі, менше первісна вартість.

При нижньому розташуванні ЕП ліфтова установка має спрощене обслуговування і ремонт обладнання, а також краще виконання звукоізоляції.

Кінематичні схеми розташування основних елементів ліфта показано на рисунку 8.12.

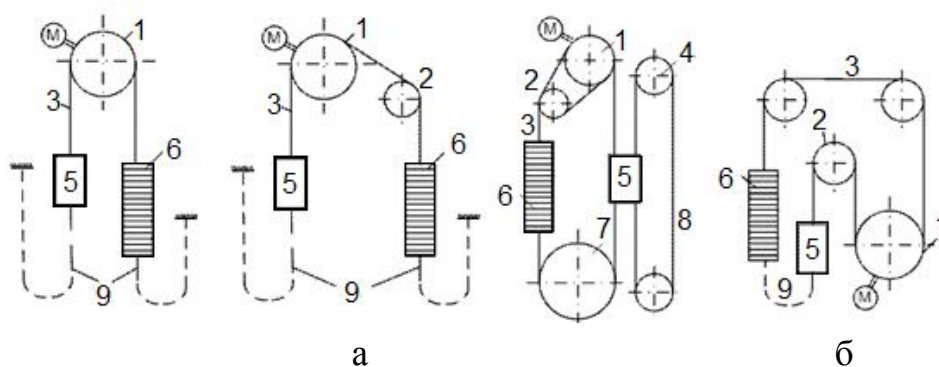


Рисунок 8.12 – Кінематичні схеми: а – верхнє, б - нижнє розташування електроприводу:

1 – канатоведучий шків; 2 – відвідний блок; 3 – канат; 4 – відцентровий регулятор; 5 – кабіна ліфта; 6 – противага; 7 – напрямні шків; 8 – трос; 9 – компенсуючі ланцюги

Для врівноваження ваги канатів використовують компенсуючі ланцюги 9. При великих розмірах кабіни 5 і її противагах виникають труднощі розміщення їх у шахті. В цьому випадку встановлюють відвідний блок 2, який зменшує кут обхвату на канатоведучому шківі 1 і відповідно передається зусилля. Якщо швидкість кабіни перевищує допустиму, то в цьому випадку відцентровий регулятор 4 затискає трос 8, який пов'язаний з уловлювачем.

Уловлювачі це пристрої, які спрацьовують при обриві канатів і при перевищенні швидкості руху кабіни. Вони складаються з двох захоплюючих кліщів, які при нормальній швидкості руху ковзають уздовж напрямної кабіни.

Ліфтова установка складається з трьох основних частин, в яких розміщено електрообладнання машинного відділення, шахти і кабіни.

**Машинне відділення** призначене для розміщення основного обладнання. Як правило, воно розташоване вгорі. У ньому встановлені: приводний двигун, підйомна лебідка, редуктор, шафа та органи керування при наладці.

Лебідки по конструкції можуть бути редукторними і безредукторними. У редукторних лебідок канатоведучий шків кріпиться до тихохідному валу редуктора. Вони застосовуються на вітчизняних пасажирських ліфтах зі швидкостями не більше 1,6 м/с. Швидкісні ліфти мають безредукторні лебідки. Канатоведучий трос кріпиться безпосередньо до валу двигуна.

**Шахта** призначена для розміщення напрямних, по яких рухаються кабіна і противага, поверхова апаратура та апаратура забезпечення безпеки. З зовнішньої сторони шахти (на поверхових майданчиках) розміщена апаратура «виклику» і шахтні двері по всій висоті.

**Кабіна** призначена для розміщення пасажирів (вантажу), апаратури керування і сигналізації. Електропостачання і зв'язок з електрообладнанням знаходяться поза кабіни за гнучким підвісним кабелем. На кабіні встановлені: привод дверей, уловлювачі ковзного типу, датчики уповільнення і точного зупинення.

Схема керування ліфтів, підйомників включає до складу наступні основні вузли: контролю положення кабіни в шахті; автоматичного вибору напрямку руху; гальмування; точної зупинки; автоматичного відкривання і закривання дверей; захисту.

Командні сигнали, які задають програму руху кабіни діляться на: команди-накази, що надходять з кабіни; команди-виклики, що надходять з поверхових площадок.

Залежно від реакції на команди і способи їх відпрацювання розрізняються схеми роздільного і збірного керування.

При *роздільному* – схема сприймає лише одну команду і не реагує під час її виконання на інші накази і виклики.

При *збірному* – схема сприймає одночасно декілька команд і виконує їх в певній черговості, зазвичай у порядку слідування поверхів.

Основними вузлами, що забезпечують роботу ліфта, є вузол контролю положення кабіни в шахті. Такий пристрій називається селектор.

Найпростіший тип селектора це поверховий перемикач. Він призначений для комутації ланцюгів керування рухом, реєструє положення кабіни, автоматично вибирає напрямок руху (вниз або вгору) і дають команду на



відключення привода при зупинці. Конструктивно поверховий перемикач це трипозиційний перемикач, що має рухливі і не рухливі контакти.

Схема автоматичного вибору напрямку руху ліфта за допомогою поверхового перемикача показана на рисунку 8.13.

**Робота схеми.** Кабіна ліфту знаходиться на першому поверсі, при цьому на  $i$ -тому поверсі контактори КН і КВ відключені. При натисканні кнопки виклику КнВк або наказу КнПк, наприклад на  $k$  – поверху, отримує живлення поверхове реле ЕР. Контакт цього реле подає живлення на шини верхнього поверху ШВ або на шини нижнього поверху ШН. Кнопки КнВк і КнПк блокуються контактом поверхового реле і одним із замкнутих контактів контакторів КВ і КН.

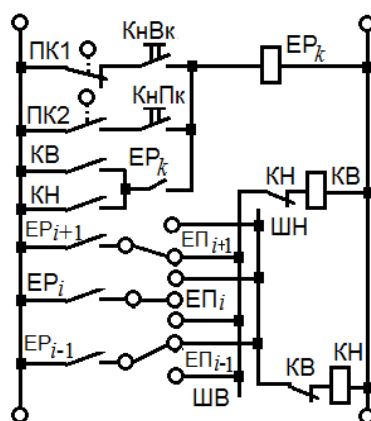


Рисунок 8.13 – Електрична схема перемикання напрямку руху ліфта:  
ЕП – поверховий перемикач; ЕР – поверхове реле; КВ, КН – контактори вперед і назад, які включають двигуни вниз або вгору; ПК1, ПК2 – блокуючі контакти підлоги кабіни; КнВк – кнопка виклику; КнПк – кнопка наказу; ШН – шина;  
 $k$  – номер етаж;  $i$  – перехід на етаж (вгору, вниз)

Якщо в кабіні знаходиться пасажир контакт підлоги ПК1 розриває ланцюг викличних кнопок, а контакт ПК2 підключає ланцюг живлення кнопок наказів.

Перевагою поверхового перемикача є простота схем керування побудованих з його використанням.

Недоліками є шум при роботі і обмежений термін служби.

ЕП такого типу застосовуються у тихохідних ліфтах і для швидкохідних при швидкостях не більше 0,71 м/с.

Для швидкохідних ліфтів і в тих що працюють в інтенсивних режимах, застосовуються електричні селектори з безконтактними датчиками положення кабіни (рис. 8.14).

Найбільшого застосування отримали індуктивні датчики, які являють собою котушку змінного струму, що намотана на П-подібне шихтоване осердя.

Датчики розташовуються в шахті на рівні поверхових майданчиків. При русі ліфта їх магнітопровід по черзі замикається сталеною скобою, закріпленою на кабіні. При розімкнутому магнітопроводі, індуктивний опір котушки датчика малий і напруга живлення майже повністю прикладається до навантаження  $U_{\text{вих}} \approx U_c$ .

При замкнутому магнітопроводі, індуктивний опір котушки великий  $\Rightarrow U_{\text{вих}} = 0$ .

Таким чином, наведений короткий огляд конструкцій установок загальнопромислового застосування показує, що незважаючи на різноманіття приватних різновидів таких машин і механізмів з них можна виділити обмежену кількість механізмів, що виконують в різних конкретних установках однакові функції і працюють в одному і тому ж режимі, до електроприводу яких пред'являються однотипні головні вимоги.

### 8.3 Схеми електроприводів загальнопромислових механізмів

Робота сучасних електроприводів загальнопромислових механізмів заснована на застосуванні силових статичних перетворювачів на базі мікропроцесорів, які застосовуються в приводах як змінного, так і постійного струму.

В даний час, сучасні схеми електроприводів досягли дуже високого технічного рівня, який (в допустимих технологічних межах) в більшості можливостей дозволяють використовувати електропривод змінного струму, там, де раніше застосовувався привід постійного струму.

Однак, традиційний привід постійного струму продовжує відігравати важливу роль, особливо в тих випадках, де потрібно забезпечити високодинамічні режими з постійним моментом обертання та жорсткі вимогами по перевантажувальній здібності в широкому діапазоні швидкостей і рекуперацію енергії назад у мережу.

Варіанти схем систем електроприводів, які живляться від мережі змінного і постійного струму, показані на рисунку 8.15.

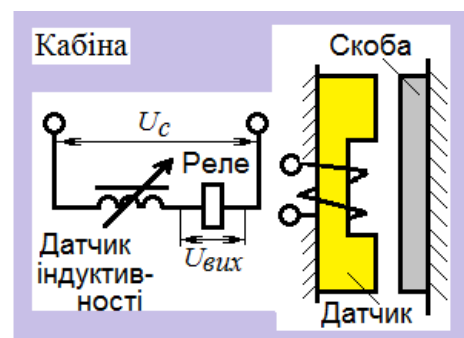


Рисунок 8.14 – Розташування датчиків кабін ліфта

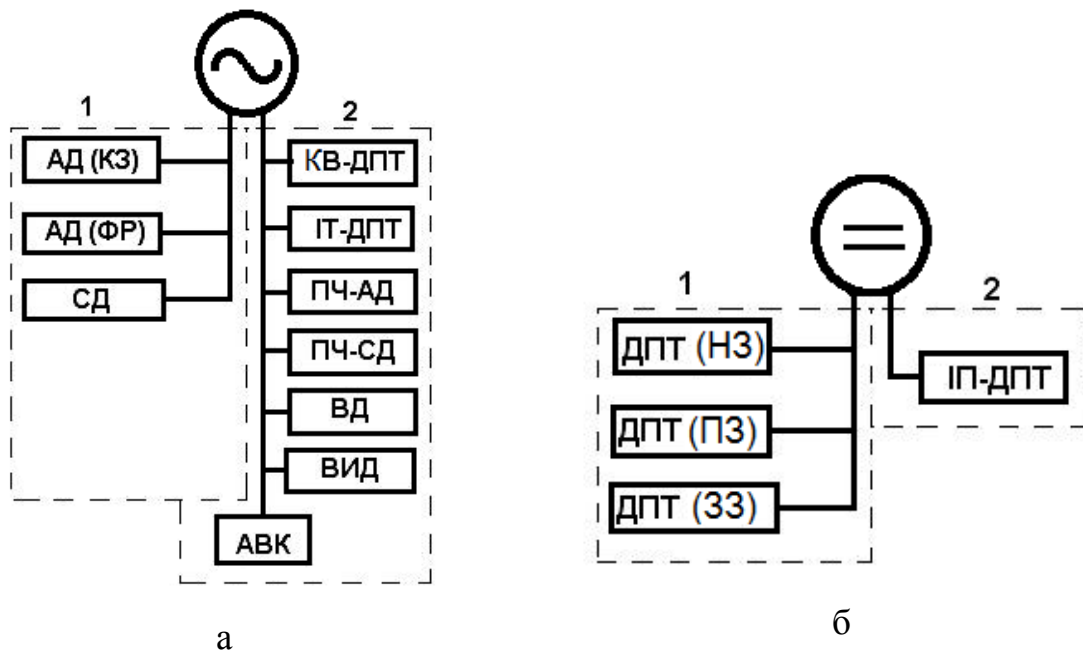


Рисунок 8.15 – Основні варіанти систем електроприводів, які отримують живлення від мережі змінного (а) і постійного струму (б):

АД (КЗ) – асинхронний двигун з короткозамкнутим ротором;

АД (ФР) – асинхронний двигун з фазним ротором; СД – синхронний двигун;

КВ – керований випрямляч; ІТ – імпульсно-тиристорний перетворювач;

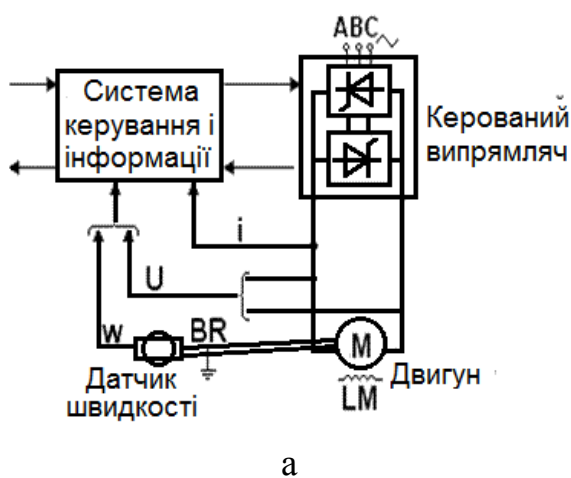
ДПТ – двигун постійного струму (НЗ- незалежного збудження;

ПЗ – послідовного збудження; ЗЗ – змішаного збудження); ПЧ – перетворювач

частоти; ВД – вентильний двигун; ВІД – вентильно-индукторный двигун;

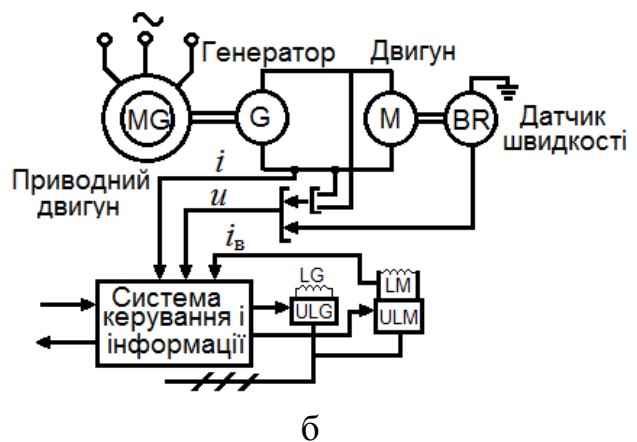
ІП – імпульсний перетворювач; АВК – автоматизований комплекс

Деякі приклади електричних схем електроприводів, які знайшли широке застосування, показані на рисунку 8.16.



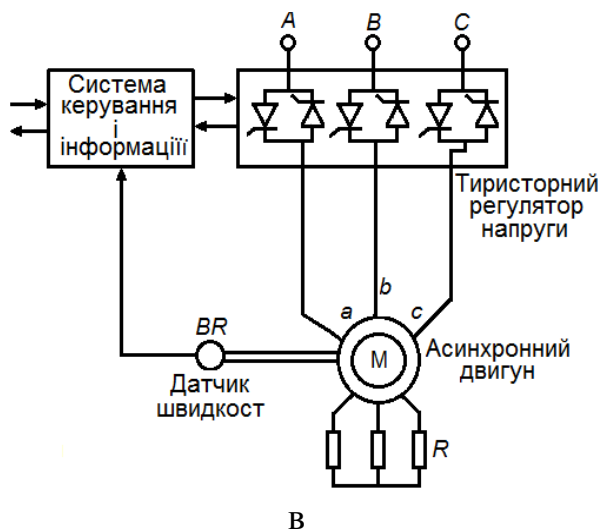
ТП – ДТП

(тиристорний перетворювач –  
двигун постійного струму)



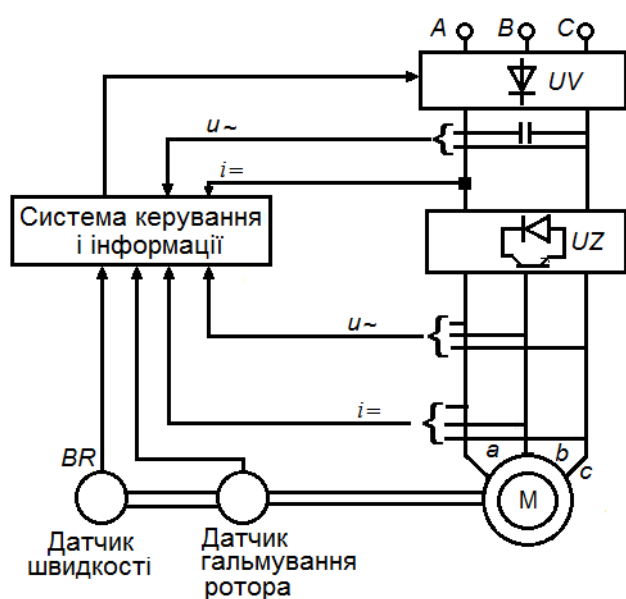
Г – Д

(генератор – двигун постійного  
струму)



АД-ТРН

(асинхронный электропривод с  
тиристорными регуляторами  
напряжения в цепи статора)



Г

ПЧ – АД

(перетворювач частотно-векторний  
та асинхронний двигун)

Рисунок 8.16 – Схеми систем електроприводів постійного і змінного струму

Механічну систему електроприводів можна представити у вигляді кінематичної схеми, яка зображує кінематичний ланцюг виробничих механізмів за допомогою умовних позначень його елементів.

Приклади кінематичних схем механізмів показано на рисунках 8.17–8.19

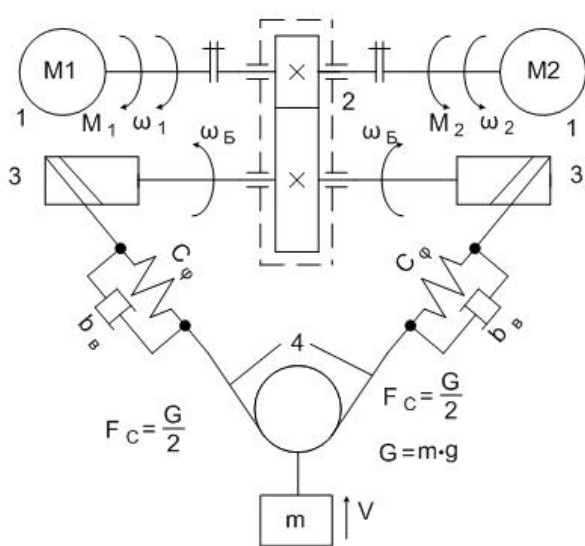


Рисунок 8.17 – Кінематична схема  
механізму підйому:

1 – двигун, 2 – редуктор,  
3 – барабани лебідки, 4 – канати

Характерні особливості:

- податливість канатів та їх провисання;
- наявність зазорів у зубчастих передачах;
- можливість розгойдування вантажу.

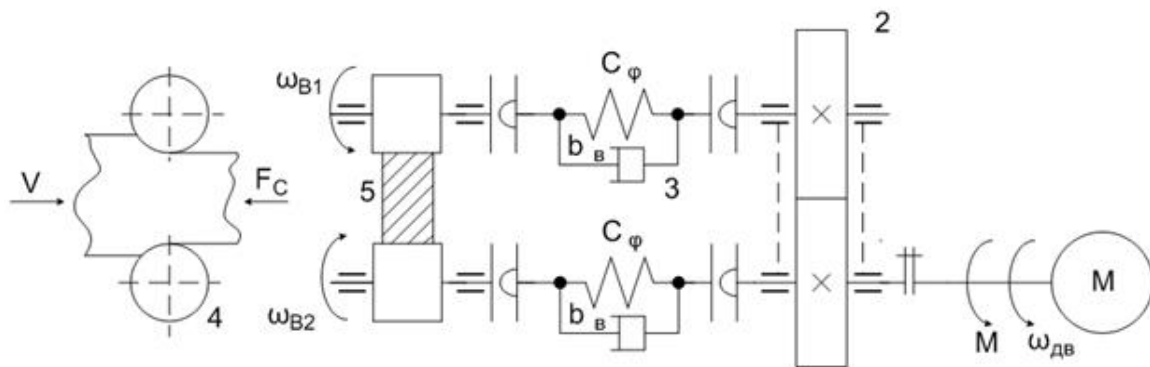


Рисунок 8.18 – Кінематична схема прокатної кліті

1 – двигун, 2 – редуктор (шестеренна кліть), 3 – шпиндель (валопровід),  
4 – прокатний валок (основний елемент), 5 – злиток

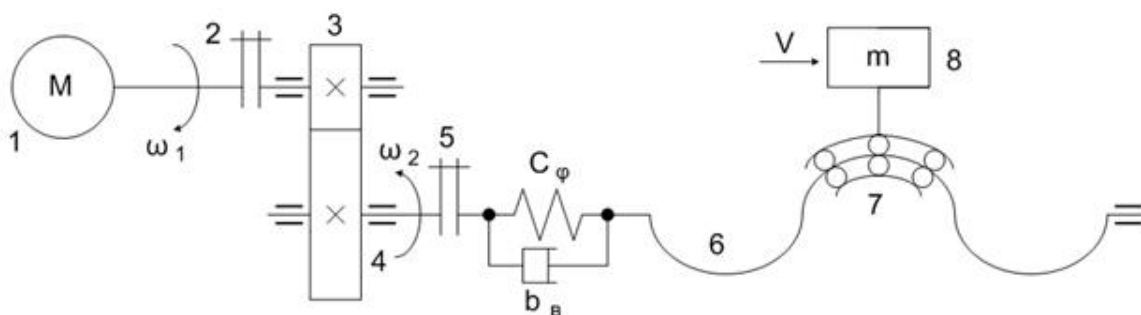


Рисунок 8.19 – Кінематична схема механізму металорізального верстата

1 – двигун, 2 – муфта, 3, 4 – зубчасте колесо;  
5 – муфта, 6 – черв'як, 7 – гайка, 8 – стіл

### Контрольні питання

1. Перелічити типові загальнопромислові механізми по принципу дії.
2. У чому полягає особливість конструкцій підйомних кранів?
3. Що таке драглайни та для чого вони використовуються?
4. У чому полягає різниця між маніпуляторами та промисловими роботами?
5. У чому полягає робота механізмів безперервної дії?
6. Показати особливості роботи електроприводів у стрічкових конвеєрах.
7. Привести приклади механізмів ланцюгових конвеєрів.
8. Які механізми відносяться до відцентрового і поршневого типів?
9. До якого виду механізмів відноситься ліфт?
10. Перелічити обладнання ліфта.
11. Які основні елементи входять до електричної схеми ліфта?
12. Наведіть приклади варіантів схем електроприводів постійного та змінного струму.
13. Які основні елементи електропривода входять до кінематичних схем?

## ЛЕКЦІЯ 9

### КЕРУВАННЯ ЕЛЕКТРОТЕХНІЧНИМИ ПРИСТРОЯМИ В СИСТЕМІ ЕЛЕКТРОПРИВОДУ

**План:**

**9.1 Керування ТАД з короткозамкненим ротором за допомогою магнітних пускачів.**

**9.2 Керування ТАД з короткозамкненим ротором шляхом перемикання числа пар полюсів обмотки статора.**

**9.3 Керування ТАД з контактними кільцями.**

**9.4 Керування синхронними електродвигунами.**

**9.5 Керування електродвигунами постійного струму з послідовним збудженням.**

#### 9.1 Керування ТАД з короткозамкненим ротором за допомогою магнітних пускачів

Асинхронні двигуни з короткозамкненим ротором найчастіше керуються за допомогою магнітних пускачів.

Включення ТАД проводиться на повну напругу безпосередньо через мережу (рис. 9.1). Замиканням ввідного вимикача подається напруга на силову і допоміжну ланцюги схеми. При натисканні на кнопку «Пуск» замикається ланцюг живлення котушки  $K$  через головні контакти контактора, приєднуючи статор  $M$  до живильної мережі. Одночасно з допомогою замикаючих блок контактів створюється ланцюг живлення котушки  $K$  незалежно від положення контактів кнопки.

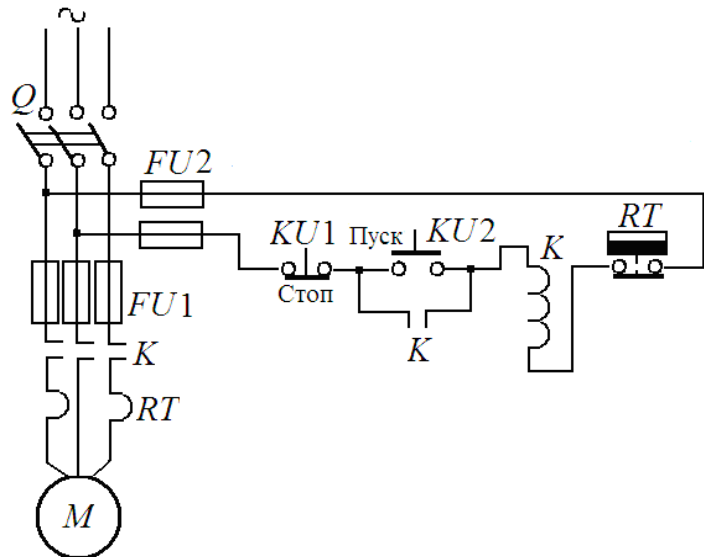


Рисунок 9.1 – Схема контакторного керування ТАД з короткозамкненим ротором

#### Відключення ТАД

здійснюється шляхом натискання на кнопку «Стоп». При цьому контакти  $KU1$ , що розмикають, розривають ланцюг живлення котушки контактора, що тягне за собою розмикання контактів і відключення ланцюга електродвигуна  $M$ .

В схемі передбачено захист електродвигуна, апаратів і проводів:

- від коротких замикань за допомогою запобіжників  $FU1$  і  $FU2$ ;
- від перегріву при тривалих теплових перевантаженнях електродвигуна за допомогою теплових реле  $RT$ , контакти яких розривають ланцюг живлення котушки  $K$  при перевантаженні електродвигуна. При цьому нагрівальні елементи теплових реле включаються в дві фази електродвигуна;
- від мимовільних повторних включень електродвигуна.

Якщо потрібно обмежувати пусковий струм короткозамкненого ТАД, то в ланцюг електродвигуна  $M$  вводиться активний опір або реактор.

## 9.2 Керування ТАД з короткозамкненим ротором шляхом перемикання числа пар полюсів обмотки статора

Керування процесом регулювання швидкості обертання ТАД можна здійснювати перемиканням кількості пар полюсів обмотки статора (рис. 9.2). Перемикання ТАД можливо при його обертанні як в прямому, так і в зворотному напрямку.

Після включення ввідного вимикача  $Q$  при натисканні на кнопку «Пуск вперед» на затискачі котушки контактора  $K1$  поступає напруга, що приводить до з'єднання обмоток статору двигуна  $M$  до мережі для отримання меншої швидкості обертання. Перехід до більшої швидкості обертання ротора здійснюється натисканням кнопки «Пуск назад», яка є замикаючою в ланцюзі живлення котушки контактора  $K2$ . Контакти контактора  $K2$  додатково створюють нульову точку для з'єднання обмотки статора в подвійну зірку.

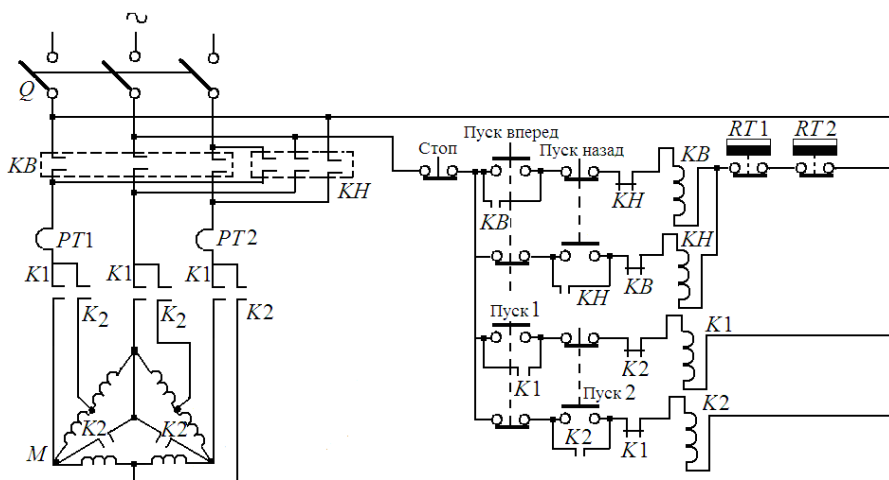


Рисунок 9.2 – Схема керування двошвидкісним ТАД з короткозамкненим ротором



Кнопки подвійної дії застосовуються для здійснення блокування, що виключає спільну роботу контакторів  $KB$  і  $KH$ ,  $K1$  і  $K2$ . Прямий і зворотний напрямки обертання ТАД відбуваються за допомогою реверсивного магнітного пускача з контакторами  $KB$  і  $KH$ .

Гальмування ТАД пояснюють схеми керування, що показані на рисунку 9.3 (протиключенням) і рисунку 9.4 (динамічне гальмування).

При гальмуванні ТАД протиключенням (див. рис. 9.3) застосовується реверсивний магнітний пускач з двома контакторами  $K1$  і  $K2$  і тепловим реле  $RT$ . Можливість реверсування після відключення ТАД запобігається за допомогою реле контролю швидкості  $PC$ , яке служить для відключення контактора  $K2$  в залежності від швидкості обертання ТАД.

Керування ТАД за показаною схемою починається з включення ввідного вимикача  $Q$  і натискання кнопки «Пуск», яка тягне за собою подачу напруги на затискачі котушки  $K1$  ланцюга контактора. Контакти реле швидкості  $PC$  розімкнуті в момент включення ТАД і при менших значеннях швидкості  $10 \div 15\%$ .

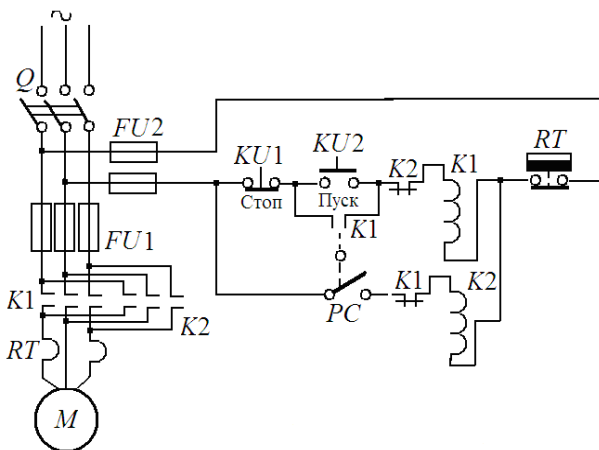


Рисунок 9.3 – Схема керування ТАД при гальмуванні протиключенням

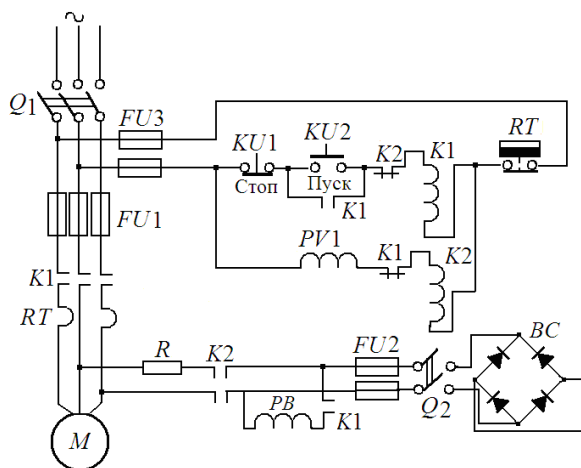


Рисунок 9.4 – Схема керування ТАД при динамічному гальмуванні

При включенні електродвигуна  $M$  через контактор  $K1$  і при подальшому його розгоні через реле  $PC$  замикаються контакти в колі живлення котушки  $K2$  контактора, але включенню контактора  $K2$  перешкоджають блок-контакти  $K1$ , що розмикаються при включенні контактора  $K1$ .

Контактор  $K2$  призначений для гальмування ТАД. При відключенні ТАД натисканням кнопки  $KU1$  «Стоп» контакти  $K1$  замикаються і контактор  $K2$  приєднує статор ТАД до мережі зі зміною порядку чергування фаз обмотки, тому що дві фази перемикаються. Одночасне включення контактора  $K1$  при цьому неможливо внаслідок розмикання блок-контактів контактора  $K2$  в колі котушки  $K1$ .

Автоматичне відключення ТАД з гальмуванням противключенням проводиться при швидкості обертання, меншою 10–15% номінальної, т му що розмикаються контакти реле *РС*.

При динамічному гальмуванні (рис. 9.4) по обмотці статора ТАД проходить постійний струм. Магнітний потік, що створюється струмами в обмотках ТАД, взаємодіючи зі струмом ротора, створює гальмівний момент.

Керування ТАД з динамічним гальмуванням починається з замикання контактів ввідних вимикачів *Q1* і *Q2*. При подачі напруги на колі змінного струму натисканням кнопки *KU2* «Пуск» подається живлення на затискачі котушки контактора *K1* і ТАД включається в мережу. Блок-контакти контактора *K1* служать для створення кола живлення котушки реле часу *PВ*, приєднаної до мережі постійного струму. При подачі напруги на котушку реле його контакти миттєво замикають ланцюг через затискачі котушки контактора *K2*, але включення контактора *K2* перешкоджають розімкнуті контакти *K1*.

Гальмування ТАД починається після відключення кнопки *KU1* «Стоп». При цьому на котушку *K1* не надходить напруга і контакти контактора *K2* замикаються, включаючи контактор гальмування *K2*.

На котушку реле *PВ* не надходить напруга завдяки розмиканню блок-контактів контактора *K1* і контакти реле *PВ* розмикаються з витримкою часу, по закінченні якого відбувається автоматичне відключення ТАД від джерела постійного струму.

Включення контактора *K1* під час гальмування перешкоджають блок-контакти контактора *K2*, встановлених в колі живлення котушки контактора *K1*. Опір *R* призначається для обмеження струму гальмування в необхідних межах.

Для гальмування електродвигунів в деяких випадках використовується механічний колодкове гальмо, що керовано електромагнітом.

### **9.3 Керування ТАД з контактними кільцями**

Керування асинхронними двигунами з контактними кільцями передбачає автоматичний пуск електродвигуна, зміну напрямку обертання і регулювання швидкості обертання шляхом зміни опору в ланцюзі ротора, а також електричне гальмування двигуна противключенням.

Керування пуском двигуна здійснюється:

- за принципом незалежної витримки часу, при якому відбувається виведення окремих ступенів опорів через певні проміжки часу після включення електродвигуна. Даний вид пуску недоцільний, оскільки здійснюється за допомогою реле часу постійного струму з харчуванням схеми керування від джерела постійного струму;
- за принципом зміни струму із застосуванням струмових реле прискорення, які включаються в ланцюг ротора електродвигуна. Розглянемо цей спосіб керування (рис. 9.5).

Схема має кнопкове керування і передбачає керування пуском двигуна і його захист без гальмування і реверсування.

Вмикається ввідний вимикач  $Q$  і подається напруга на головні і допоміжні контакти ланцюга струму. При замиканні контактів кнопки  $2KU$  «Пуск» подається живлення на котушку контактора  $K$ . Силові контакти контактора  $K$  замикаються і електродвигун  $M$  приєднується до мережі при повному пусковому опорі в роторі. Блокувальні контакти  $K$  шунтують кнопку  $2KU$ , створюючи ланцюги живлення котушок  $K$  і блокувального реле  $RB$ .

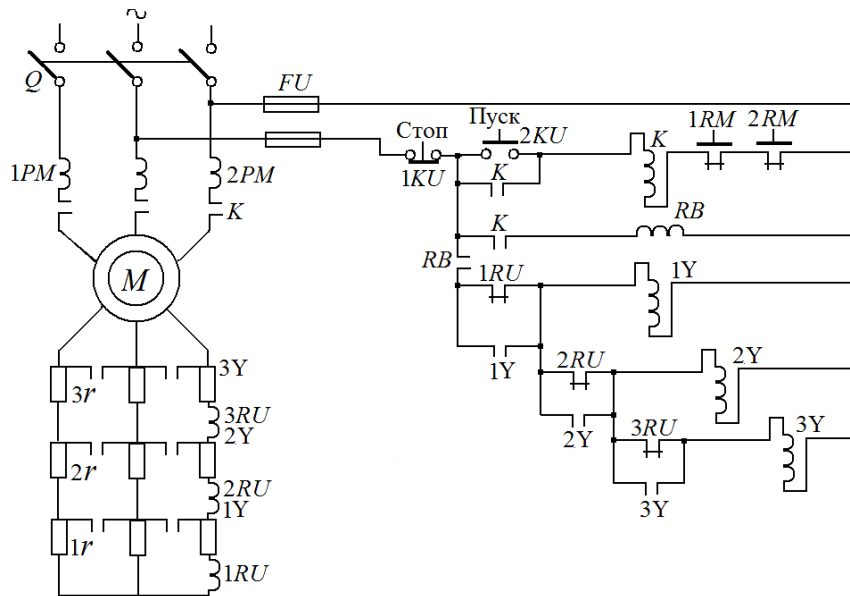


Рисунок 9.5 – Схема керування асинхронним двигуном з контактними кільцями в залежності від струму

Замикаючі контакти подають живлення на кола котушок контакторів прискорення  $1Y$ ,  $2Y$ ,  $3Y$ . Але оскільки одночасно з включенням контактора  $K$  отримують живлення котушки реле прискорення  $1RU$ ,  $2RU$ ,  $3RU$ . При цьому власний час включення реле менше, ніж контактора, тому реле 1 спрацює

раніше включення контактора прискорення  $1Y$  і розгін електродвигуна  $M$  буде відбуватися при повністю введеному в коло ротора пусковому опорі.

Реле прискорення відрегульовано таким чином, що їх контакти розмикаються при найбільшому значенні пускового струму і залишаються відкритими до тих пір, поки пусковий струм не зменшиться на величину струму перемикача. Це дозволяє створювати коло живлення котушки  $1Y$  через контакти реле  $1Y$  в момент виведення пускового опору  $1r$ . Після спрацьовування реле  $1Y$  та його блок контакти забезпечують живлення котушки  $1Y$  незалежно від реле  $1RU$  і готують ланцюг живлення котушки  $2Y$  для подальшого включення.

Оскільки силові контакти  $1Y$  при цьому також замикаються і шунтують ступінь пускового опору  $1r$ , то пусковий струм знову зростає до найбільшого значення і спрацьовує реле  $2RU$ , перешкоджаючи включенню  $2Y$ . Розмикаючи контакти  $2RU$  відкриваються раніше, ніж якір контактора  $2Y$  втягується, внаслідок того, що власний час спрацьовування реле  $2RU$  менше, ніж контактора  $2Y$  і котушка контактора  $2Y$  не отримує живлення.

При повторному зниженні пускового струму по мірі прискорення електродвигуна до величини струму перемикач контакти реле  $2RU$  замикаються, створюючи ланцюг живлення котушки контактора  $2Y$ . При цьому шунтується частину пускового опору  $2r$ , що призводить до збільшення пускового струму до величини  $I_1$ . Подальше зменшення пускового струму до  $I_1 = I_2$  сприяє виведенню останньої ступені пускового опору  $3r$ . Після цього двигун  $M$  виходить на природну характеристику.

Захист електродвигуна  $M$ , апаратів і проводів в даній схемі здійснюється від:

- КЗ – максимальними реле  $1RM$  і  $2RM$  і запобіжниками  $FU$ ;
- від мимовільних включень (після відновлення напруги внаслідок його зниження) – контактором  $K$ .

## 9.4 Керування синхронними електродвигунами

Запуск синхронного двигуна здійснюється через автотрансформатор, активний опір або через реактор для обмеження пускових струмів і падінь напруги в мережі. Наприклад, активні опори, включаються до фази обмотки статора (рис. 9.6). При цьому замикаються контакти ввідних вимикачів  $Q1$  і  $Q2$  з мережею змінного і постійного струму. Натисканням кнопки  $KU2$  «Пуск» замикається ланцюг живлення котушки контактора  $K1$  і статор двигуна приєднується до мережі через пускові опори  $R$ . Одночасним замиканням блок-контакту  $K1$  створюється коло живлення котушки  $K1$  не залежна від натискання кнопки  $KU2$ .

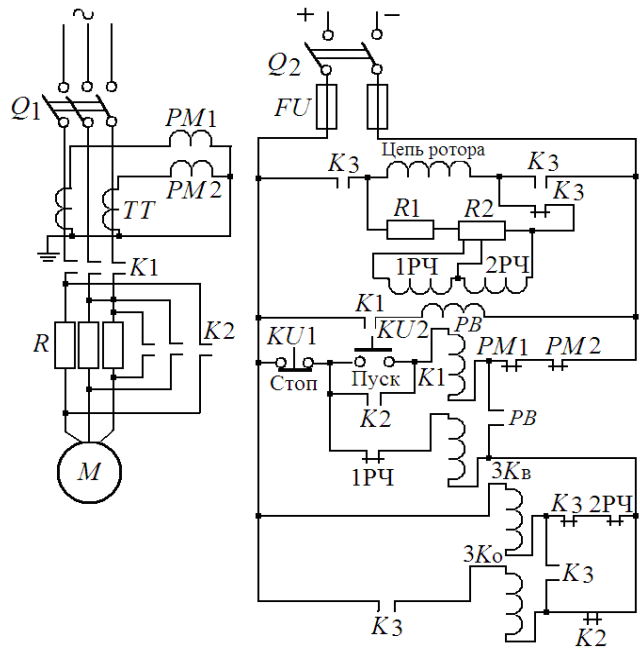


Рисунок 9.6 – Схема керування синхронним двигуном

Робота контакторів  $K2$  і  $K3$  пов'язана зі спрацюванням реле частоти  $1РЧ$  і  $2РЧ$ , діючих в залежності від швидкості обертання ротора. При пуску електродвигуна обертання ротора має найбільшу величину і размыкаючи контакти реле  $1РЧ$  і  $2РЧ$  розриваються, причому розрив контактів реле відбувається раніше включення блокувального реле  $РВ$ . Тому на контакторі  $K2$  відсутня напруга. Частота напруги струму при розгоні електродвигуна зменшується, струм також зменшується пропорційно обертанню, і якор реле частоти відключається.

При замиканні контактів  $1РЧ$  отримує живлення котушка контактора  $K2$ , силові контакти якого замикаються в головному колі і шунтують пусковий опір, що включений до фази обмотки статора. Двигун включається на повну напругу живильної мережі.

При замиканні контактів  $2РЧ$  створюється коло живлення котушки контактора  $K3$ . Включення контактора  $K3$  можливо тільки при швидкості, яка визначає входження двигуна в синхронізм.

Контактор  $K3$  має дві котушки:  $3K_{в}$ , що втягується і  $3K_{0}$ , що відключає. Він забезпечений механізмом засувки, яка звільняється котушкою  $3K_{0}$ . У колі збудження закриті контакти  $K3$  закриваються в колі збудження, а розкриті

контакти  $K3$  розриваються, відключаючи обмотку ротора електродвигуна від розрядних опорів  $R1$  і  $R2$ , приєднуючи ротор до мережі постійного струму.

Блокувальні контакти контактора  $K3$  готують коло до подальшого включення.

Відключення електродвигуна відбувається натисканням кнопки  $KU1$  «Стоп», яка звільняючи засувку, відключає втягуюче котушку контактора  $K3$ . Як тільки механізм засувки спрацює, так котушка  $K3$  буде знеструмлена.

Захист електродвигуна від неприпустимих поштовхів струму передбачений за допомогою реле максимального струму  $PM1$  і  $PM2$ , а захист кола керування від  $K3$  – запобіжниками  $FU$  і за допомогою контактора  $K1$ .

У схемах керування синхронним електродвигуном високої напруги з пуском через автотрансформатор або реактор живлення електродвигуна від мережі здійснюється через вимикач високої напруги і роз'єднувач.

### **9.5 Керування електродвигунами постійного струму з послідовним збудженням**

Автоматизація пуску двигуна з послідовним збудженням здійснюється переважно в залежності від часу. Розглянемо автоматичне керування пуском ДПТ за допомогою контакторів прискорення і електромагнітних реле часу (рис. 9.7).

Подається напруга з мережі в коло головного та оперативного струму за допомогою вимикача  $Q$ . Одночасно включається котушка реле часу  $1PB$  з миттєвим розривом контактів  $1PB$ . Натисканням кнопки  $2KU$  включається котушка контактора  $K$ , що приєднує електродвигун до мережі шляхом замикання силового контакту  $K$ . Одночасно отримують живлення котушки реле  $2PB$  і  $3PB$ , контакти яких розмикаються. Блок-контакт контактора  $K$  шунтують котушку реле часу  $1PB$ , і розривний контакт  $1PB$  в колі котушки  $1Y$  замикається з витримкою часу, що відповідає тривалості спаду пускового струму до величини струму перемикавання. Контактор спрацьовує  $1Y$ , у зв'язку з чим в колі якоря двигуна виводиться опір  $R1$ .

Одночасно включається котушка реле часу  $1PB$  з миттєвим розривом своїх контактів. Натисканням

кнопки  $2KU$  включається котушка контактора  $K$ , що приєднує електродвигун до мережі шляхом замикання своїх силових контактів.

Одночасно отримують живлення котушки реле  $2PB$  і  $3PB$ , контакти яких розмикаються. Блок-контакт

контактора  $K$  шунтує котушку реле часу  $1PB$ , і постійного струму з послідовним збудженням розривний контакт  $1PB$  в

ланцюзі котушки замикається з витримкою часу, що відповідає тривалості спаду пускового струму до величини струму перемикавання. Контактор  $1Y$  спрацьовує, у зв'язку з чим в колі якоря двигуна виводиться опір  $R1$ .

Одночасно також шунтується котушка реле часу  $2PB$ , і розмикальний контакт  $2PB$  замикається з витримкою часу, включаючи котушку контактора прискорення  $2Y$ . Контактор  $2Y$  спрацьовує, і ступінь пускового опору виводиться. Разом з тим шунтується котушка реле часу  $3PB$ . Контакти реле  $3PB$  в ланцюзі котушки контактора прискорення  $3Y$  закриваються з витримкою часу, пусковий опір  $R2$  виводиться і пуск електродвигуна закінчується.

Захист ланцюгів від коротких замикань здійснюється плавкими запобіжниками  $FU1$  і  $FU2$ , нульовий захист – контактором  $K$ .

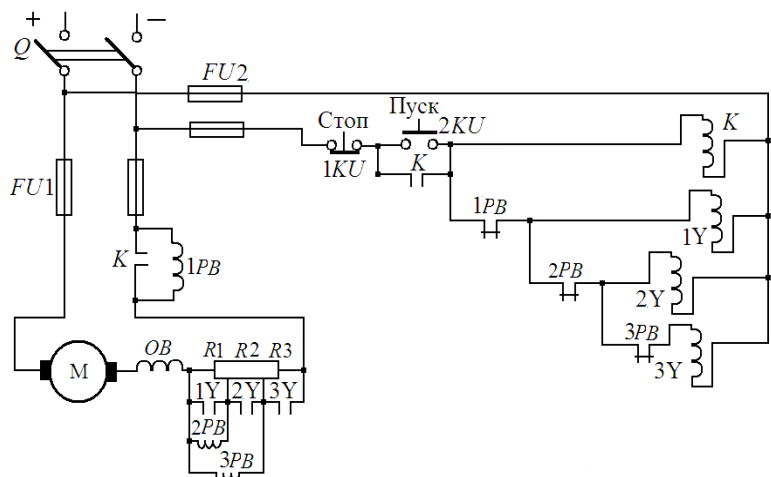


Рисунок 9.7 – Схема керування пуском двигуна постійного струму з послідовним збудженням

### Контрольні питання

1. Перелічити способи керування електротехнічними пристроями в системі електроприводу.
2. У чому полягає принцип керування ТАД з короткозамкненим ротором?
3. Як відбувається керування ТАД контактними кільцями?
4. У чому полягає особливості керування синхронними двигунами?
5. Особливості керування двигуна постійного струму з послідовним збудженням.
6. Перелічити основні елементи електричних схем керування електротехнічними пристроями.



## СПИСОК РЕКОМЕНДОВАНИХ ДЖЕРЕЛ

### Базові

1. Павленко Т. П. Электроснабжение промышленных предприятий : учеб. пособие / Т. П. Павленко, В. И. Милых. – Харьков : НТУ «ХПИ», 2015. – 267 с.
2. Далека В. Х. Електропостачання електричного транспорту / В. Х. Далека, В. І. Скуріхін. – Харків : ХНАМГ, 2012. – 168 с.
3. Буряк В. М. Експлуатація електрообладнання систем електропостачання : навч. посібник / В. М. Буряк. – Харків, ХДАМГ, 2001. – 386 с.
4. Мілих В. І. Електропостачання промислових підприємств : підручник / В. І. Мілих, Т. П. Павленко. – Харків : НТУ «ХПІ», 2016. – 272 с.
5. Нем В. К. Електропостачання електричного транспорту : практикум до лабораторних і практичних занять / В. К. Нем, О. В. Донець, Н. П. Лукашова. – Харків: ХДАМГ, 2009. – 137 с.
6. Нем В. К. Методические указания к выполнению лабораторных работ по курсу «Электроснабжение электрического транспорта» / В. К. Нем, Н. П. Лукашова. – Харьков : ХНАМГ, 2007. – 82 с.
7. Правила експлуатації трамвая та тролейбуса зі змінами і доп. – Київ. – 2005. – 196 с.

### Додаткові

1. Технологічні карти з капітального ремонту пристроїв контактної мережі електрифікованих залізниць. Книга 1. Капітальний ремонт. – Київ, 2003. – 456 с.
2. Шевченко В. В. Электроснабжение наземного городского электрического транспорта / В. В. Шевченко, Н. В. Арзамасцев, С. С. Бодрухина. – М. : Транспорт, 1987. – 271 с.
3. Афанасьев А. С. Тяговые сети трамвая и троллейбуса / А. С. Афанасьев. – М. : Стройиздат, 1974. – 361 с.
4. Електропостачання метрополітенів. Прилад, експлуатація та проектування. [під. ред. Є. І. Бикова]. – М. : Транспорт, 1977 – 431 с.
5. Тяговые подстанции: [учебник для вузов ж.-д. транспорта] / [Ю. М. Бей и др.]. – М. : Транспорт, 1986. – 319 с.

*Навчальне видання*

**ПАВЛЕНКО** Тетяна Павловна,  
**ДОНЕЦЬ** Олександр Вадимович,  
**ПЕТРЕНКО** Олександр Миколайович

## **АВТОМАТИЗОВАНИЙ ЕЛЕКТРОПРИВОД ЗАГАЛЬНОПРОМИСЛОВИХ МЕХАНІЗМІВ**

### **КОНСПЕКТ ЛЕКЦІЙ**

*(для студентів всіх форм навчання за спеціальністю  
141 – Електроенергетика, електротехніка, електромеханіка»)*

Відповідальний за випуск *Ю. П. Бархаєв*

*За авторською редакцією*

Комп'ютерне верстання *І. В. Волосожарова*

План 2017, поз. 114Л

---

Підп. до друку 04.04.2018. Формат 60 x 84/16  
Друк на ризографі. Ум. друк. арк. 5,0  
Тираж 50 пр. Зам. №

Видавець і виготовлювач:  
Харківський національний університет  
міського господарства імені О. М. Бекетова,  
вул. Маршала Бажанова, 17, Харків, 61002  
Електронна адреса: rectorat@kname.edu.ua  
Свідоцтво суб'єкта видавничої справи:  
ДК № 5328 від 11.04.2017.