

**МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ І НАУКИ УКРАЇНИ**  
**МИКОЛАЇВСЬКИЙ НАЦІОНАЛЬНИЙ АГРАРНИЙ УНІВЕРСИТЕТ**  
**Інженерно-енергетичний факультет**  
Кафедра електроенергетики, електротехніки та електромеханіки

**ЕЛЕКТРОТЕХНІЧНІ СИСТЕМИ ТА КОМПЛЕКСИ**

**конспект лекцій**

для здобувачів початкового рівня (короткий цикл) вищої освіти ОПП «Електроенергетика, електротехніка та електромеханіка» спеціальності 141 «Електроенергетика, електротехніка та електромеханіка» денної форми здобуття вищої освіти

Миколаїв  
2023

УДК 621.3

E50

Рекомендовано до друку науково-методичною комісією Інженерно-енергетичного факультету Миколаївського національного аграрного університету від 27.02.2023, протокол № 7.

Укладачі:

Віталій МАРДЗЯВКО

– асистент кафедри електроенергетики, електротехніки та електромеханіки, Миколаївський національний аграрний університет.

Андрій РУДЕНКО

– асистент кафедри електроенергетики, електротехніки та електромеханіки, Миколаївський національний аграрний університет.

Рецензенти:

Валерій ГАВРИШ

– канд. тех. наук, д.е.н., професор кафедри тракторів та сільськогосподарських машин, експлуатації та технічного сервісу, Миколаївський національний аграрний університет.

Андрій СТАВИНСЬКИЙ

– д-р техн. наук, професор, зав. кафедрою електроенергетики, електротехніки та електромеханіки, Миколаївський національний аграрний університет.

© Миколаївський національний  
аграрний університет, 2023

## ЗМІСТ

|  |     |
|--|-----|
| ВСТУП.....   | 4   |
| ТЕМА №1. Електромеханічні системи та їх основні елементи і класифікація.....                                       | 5   |
| ТЕМА №2. Функціональна структура електромеханічних систем.....   | 17  |
| ТЕМА №3. Роль електропривода в промисловості. електропривод та його елементи.<br>основні поняття і визначення..... | 25  |
| ТЕМА №4. Електромеханічні та механічні характеристики електродвигунів.<br>перехідні процеси в електроприводах..... | 30  |
| ТЕМА №5. Енергетика електропривода.....  | 36  |
| ТЕМА №6. Системи керування електропроводами.....   | 42  |
| ТЕМА №7. Типові схеми автоматизованого керування двигунами постійного та<br>змінного струму.....                   | 51  |
| ТЕМА №8. Автоматичне керування електроприводами.....   | 65  |
| ТЕМА №9. Системи автоматичного регулювання швидкості електродвигунів.....  | 73  |
| ТЕМА №10. Діагностика, захист і моніторинг електромеханічних систем.....   | 85  |
| ТЕМА №11. Основні поняття і визначення електротехнології.....  | 95  |
| ТЕМА №12. Огляд електротехнологічних установок.....  | 101 |
| ТЕМА №13. Дослідження електроустановок індукційного нагрівання.....  | 125 |
| ТЕМА №14. Електрозварювальні установки.....  | 138 |
| ТЕМА №15. Електролізні установки.....  | 166 |
| ТЕМА №16. Електронно-іонні установки.....  | 177 |
| ТЕМА №17. Установки для електрохімічної розмірної обробки металів.....   | 184 |
| ТЕМА №18. Технологічні процеси, засновані на силовому впливі електричних<br>полів на матеріали.....                | 199 |
| ТЕМА №19. Очищення газів від частинок у електрофільтрах.....   | 212 |
| ТЕМА №20. Технології з використанням плазми-хімічних та озонових реакцій.....                                      | 220 |
| ТЕМА № 21. Енергоефективність ситем та комплексів.....   | 238 |
| РЕКОМЕНДАЦІЇ ЩОДО НАПИСАННЯ КОНСПЕКТУ ЛЕКЦІЇ ТА ПІДГОТОВКИ<br>ДО ЛЕКЦІЙНИХ ЗАНЯТЬ.....                             | 248 |
| СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ.....  | 249 |

## ВСТУП

В даний час є багато машин і механізмів, що виконують однакові або аналогічні операції технологічних процесів в різних галузях 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, кривошипна-шатунні механізми та ін.), утворюють електромеханічну систему і служать для передачі руху робочому органу машини, а також пристроям керування і контролю. Тому дисципліна "Електротехнічні системи та комплекси" призначена для ознайомлення здобувачів початкового (короткий цикл) рівня вищої освіти із сучасними проблемами створення електротехнічних комплексів, масового регульованого електроприводу, високоточних електроприводів змінного струму та різновидностями електротехнологічних систем. Програмою дисципліни передбачено вивчення електромеханічних і електротехнологічних систем, їх класифікація, призначення та способи регулювання.

Дисципліна "Електротехнічні системи та комплекси" є однією з профілюючих для здобувачів початкового (короткий цикл) рівня вищої освіти спеціальності 141, «Електроенергетика, електротехніка та електромеханіка».

Метою дисципліни «Електротехнічні системи та комплекси» є ознайомлення здобувачів початкового рівня вищої освіти із сучасними електромеханічними та електротехнологічними комплексами, проблемами їх створення, регулювання і захисту.

Завданнями навчальної дисципліни є:

- озброїти майбутнього спеціаліста знаннями сучасних принципів управління автоматизованими електроприводами загальнопромислових механізмів, основою теорії та практики створення електромеханічних систем;

- ознайомити з методами вибору систем електроприводу та сучасними тенденціями його розвитку та вдосконалення;

- ознайомити з структурою та основою технологічних систем.

У результаті вивчення навчальної дисципліни здобувач початкового рівня вищої освіти повинен знати: принципи роботи, технічні характеристики, конструктивні особливості електричних приводів, що розробляються і використовуються; методи та способи проведення робіт з технічного обслуговування електроприводів; методи створення та аналізу, теоретичних моделей, що дозволяють прогнозувати характеристики поведінки електричних приводів;

Вміти: проводити випробування та визначати працездатність встановленого та ремонтного обладнання; вибирати електроприводи у процесі експлуатації, процесі проектування з використанням інформаційних технологій; розробляти плани випробувань електричних приводів.

## ТЕМА №1. ЕЛЕКТРОМЕХАНІЧНІ СИСТЕМИ ТА ЇХ ОСНОВНІ ЕЛЕМЕНТИ І КЛАСИФІКАЦІЯ

Мета: ознайомити здобувачів початкового рівня вищої освіти з основними поняття та визначення електромеханізованих систем, їх основні елементи та класифікація.

### План лекції

- 1.1. Загальні відомості про створення автоматизованих електроприводних систем;
- 1.2. Структурна робота електромеханічних систем;
- 1.3. Сукупність елементів електромеханічних комплексів і систем;
- 1.4. Загальна класифікація електроприводних систем;
- 1.5. Сучасні автоматизовані електроприводи за ступенем автоматизації.

### Хід проведення лекційного заняття

- I. Організація групи;
- II. Мотивація навчальної діяльності. Оголошення теми й мети;
- III. Викладення та обговорення нового матеріалу.
- IV. Оголошення завдання на самостійне опрацювання та підготовку.

### **1.1. Загальні відомості про створення автоматизованих електроприводних систем**

В даний час є багато машин і механізмів, що виконують однакові або аналогічні операції технологічних процесів в різних галузях 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, кривошипна-шатунні механізми та ін.), утворюють електромеханічну систему і служать для передачі руху робочому органу машини, а також пристроям керування і контролю.

**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 в.) Перший електропривод створений у 1838 р. академіком Б. С. Якобі (рис. 1.1), який вперше поєднав електродвигун на човні з валом двигуна гребного гвинта через механічну систему. Джерелом живлення електродвигуна була батарея, що складалася з сухих елементів. Такий «електрохід» розвивав швидкість 5 км/год і міг перевозити до 12

пасажирів на борту. Але, цей створений електропривод не отримав подальшого поширення через високу вартість і малу ємність батарей. Подальший розвиток електроприводи отримали з появою електрогенераторів різних потужностей.

Створення електроприводних систем відбувалось не тільки на транспортних засобах, також у побуті та військової техніці. Наприклад, перший електропривод для швейних машин розробив відомий електротехнік В. Н. Чиколев (рис. 1.2) у 1882 р. У військовій техніці електропривод почав використовуватися з 1890 р., а саме вперше використаний на бойових кораблях морського флоту в якості підйомників зарядів з льохів до знарядь (рис. 1.3), а також для повороту збройових веж і рульових пристроїв.

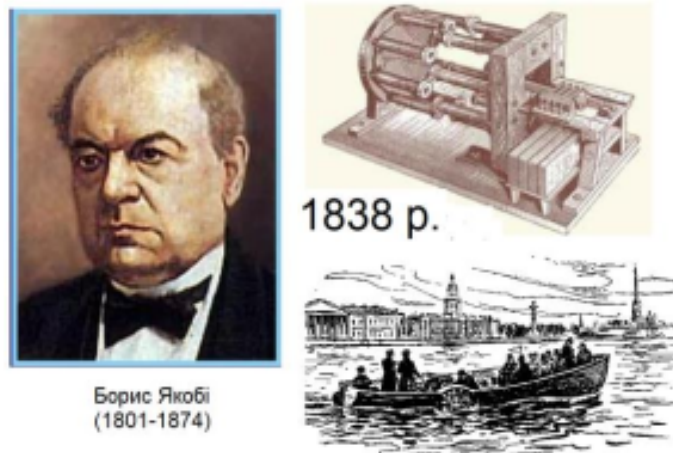


Рис. 1.1 – Перший електродвигун та електропривод для човна

**Чиколев Владимир Николаевич  
(1845 -1898 гг) - електротехник.**

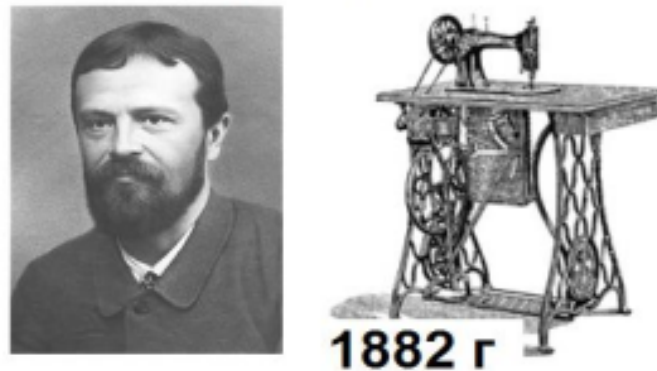


Рис. 1.2 – Перший електропривод для швейної машини

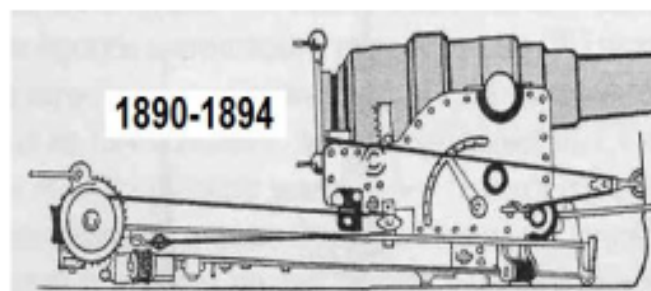


Рис. 1.3 – Електропривод для пушок бойових кораблів

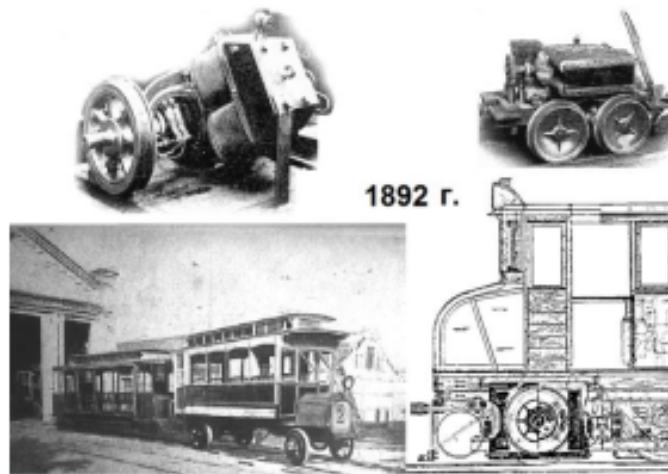


Рис. 1.4 – Перший Київський трамвай та його електропривод

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) та інших місцях. З появою трифазного змінного струму (Н. Tesla, 1887 р.) пов'язані використання електропривода 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 загальною потужністю 1507 кВт та у Харкові.

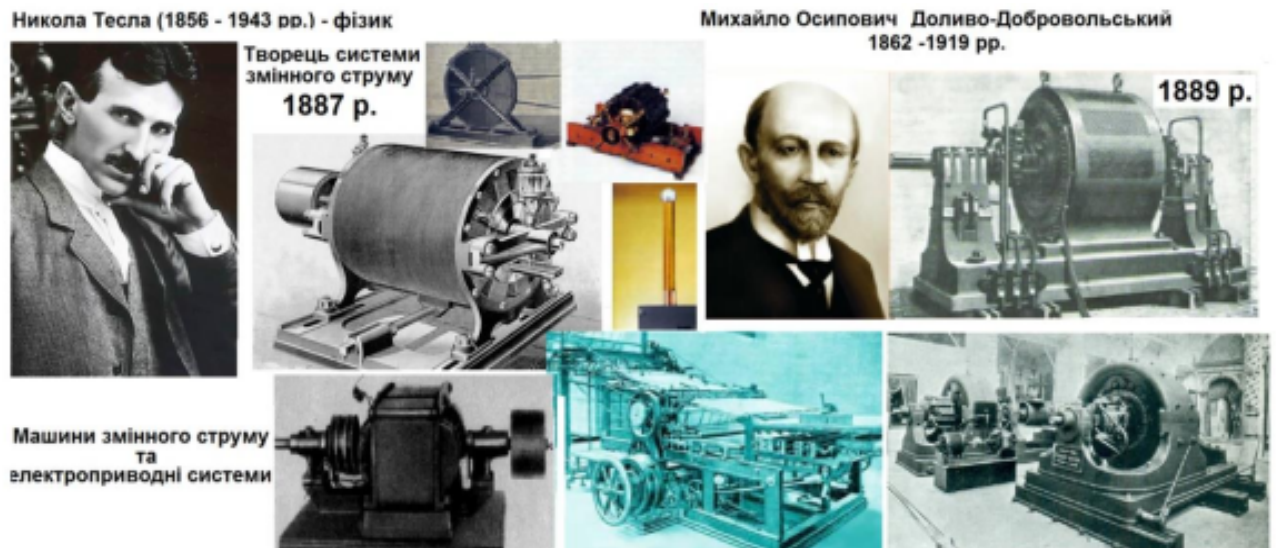


Рис. 1.5 – Видатні вчені та системи електроприводів змінного струму



Рис. 1.6 – Зовнішній вигляд перших електростанцій з асинхронними електроприводами

По мірі створення конструкцій електроприводних систем постійного і змінного струму, розроблялися і теорії електроприводу. Положення теорій об'єднували питання живлення електродвигунів, генераторів, а також можливості підвищення характеристик електроприводних систем та ін. В даний час значно зросла роль автоматизованих систем, заснованих на теоріях частотного регулювання швидкості електроприводів, застосування напівпровідникової техніки, перетворювачів і досягненнях 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. Структурна робота електромеханічних систем

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

За даними економічно розвинених країн на електропривод витрачається більше 65% вироблюваної електроенергії. Тому досконалість електроприводу машин і агрегатів, ступінь їх автоматизації багато в чому визначають технічний рівень робочих машин в цілому.

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

Відповідно, більшість сучасних робочих машин слід розглядати як автоматизовані електромеханічні системи. Наприклад, до таких систем відносяться пасажирські ліфти (пристрої вертикального транспорту, рис. 1.8).



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:

- вибір напрямку руху,
- плавний пуск,
- рух зі сталою швидкістю,
- гальмування і точну зупинку на необхідному поверсі,
- автоматичне відкривання і закривання двері кабіни і ліфтової шахти.



Рис. 1.7 – Автоматизовані системи технологічного процесу



Рис. 1.8 – Пасажирський ліфт

Всі перелічені операції відбуваються у відповідності з отриманим наказом (натисканням кнопки у кабіні) або викликом (натискання кнопки виклику на поверсі). Електродвигун з пристроями регулювання швидкості руху і положенням кабіни, а також редуктор, канатоведучий шків, канатна передача, кабіна і противага, становлять головну електромеханічну систему ліфтової установки. Другою електромеханічною системою ліфта є пристрій відкриття і закриття дверей, що складається з електродвигуна, кінематичних і механічних ланок та 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.

Широке використання автоматизованих електроприводних систем сприяє створенню високотехнологічних комплексів як у побуті, на транспорті і на підприємстві. Наприклад широко відома у побуті автоматична пральна машина, (рис. 1.9), яка виконує різні функції при сукупності роботи всіх елементів і електроприводної системи.

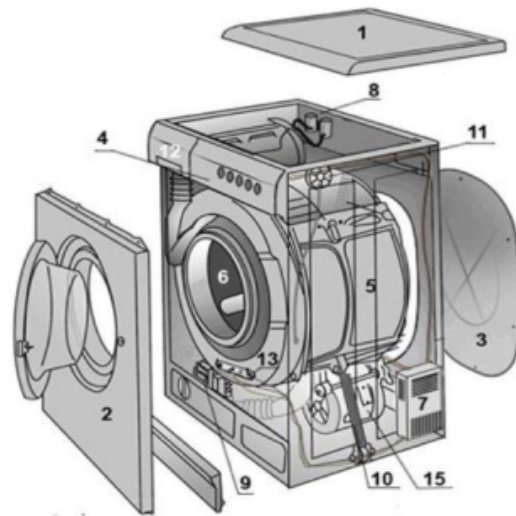


Рис. 1.9 – Зовнішній вигляд автоматичної пральної машини та її основні елементи: 1 – кришка; 2 – передня панель; 3 – задня панель; 4 – панель керування; 5 – бак; 6 – барабан; 7 – електронний модуль; 8 – впускний клапан; 9- зливний насос; 10 – амортизатор; 11 – пресостат; 12 – ємність для порошку; 13 – ТЕН; 14 – ремінь; 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 створює умови прання і віджимання білизни, налив і злив води. Робота різних електричних і механічних елементів функціонально об'єднана пристроєм програмного керування, від якого залежать технологічні операції.

Таким чином, наведені приклади показують, що основним технічним змістом сучасних автоматизованих робочих машин є електромеханічні *комплекси і системи*. Їх кількість може бути багаторазово збільшено. Це найбільш складні і коштовні 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, пускачем, апаратами керування і захисту. По мірі збільшення ступеня автоматизації робочих машин, розширення їх функціональних можливостей з'явилася необхідність у більш складних електричних системах. Наприклад, які спеціально проектуються для окремих видів транспорту, промислових установок, медичної техніки та 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).

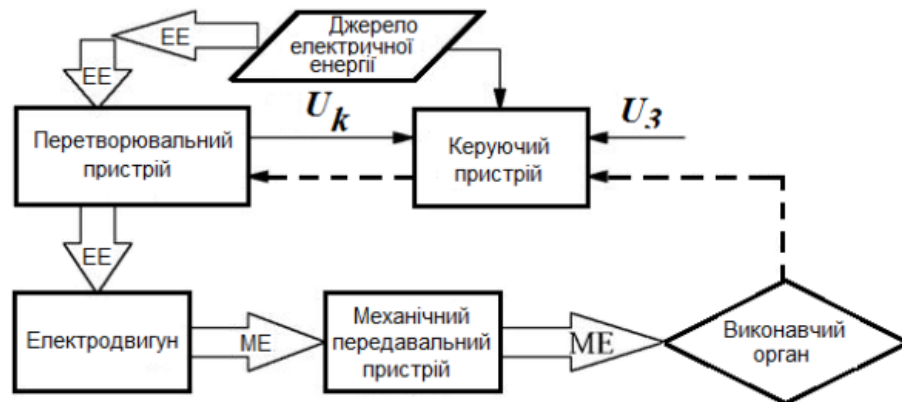


Рис. 1.10 – Автоматизований електропривод механізмів та труктурна схема: EE – електрична енергія; ME – механічна енергія;  $U_k$  – напруга керування;  $U_3$  – напруга, що задається

Але при цьому підвищуються вимоги щодо автоматизованого електроприводу, як за номінальними параметрами (висока швидкість обертання для високошвидкісних механізмів, великий момент для безредукторних приводів тощо), так і по їх керованості. Це призвело до необхідності спільного конструювання як механічної, так і електричної частин робочих машин. Завдяки високим технологіям з'явився напрям «мехатроніка», під яким розуміється створення інтегрованих конструкцій, функціонально закінчених модулів, що поєднують механічні пристрої, електричний двигун з системою його регулювання та мікропроцесорний керуючий пристрій.

### 1.3. Сукупність елементів електромеханічних комплексів і систем

Подальший розвиток автоматизованого електроприводу пов'язано із винятком механічних передач, об'єднанням електромеханічних пристроїв з робочими органами машини. З'явилися інтегровані конструкції, які підвищують функціональні можливості і технічні характеристики механізмів.

До структури 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 тощо);

– 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).

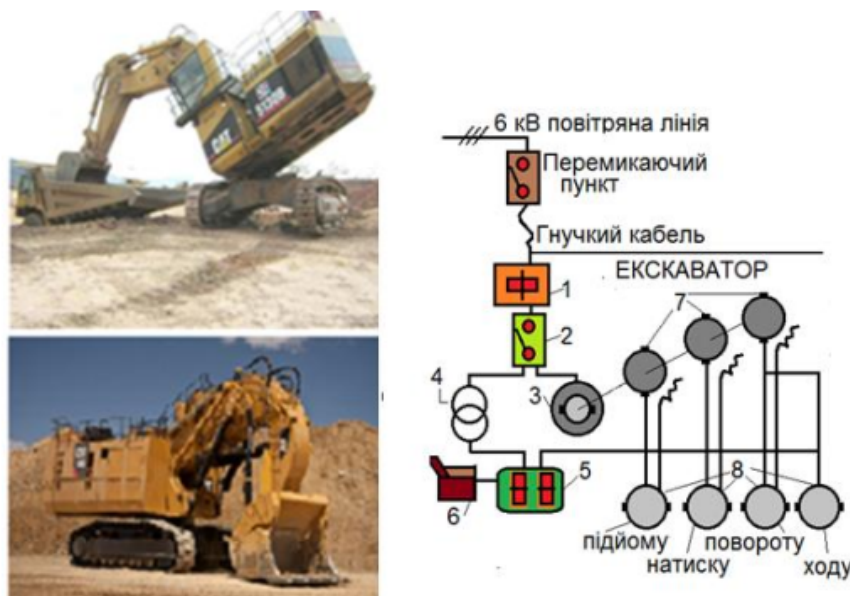


Рис. 1.11 – Загальний вигляд та структура електромеханічного комплексу гірського екскаватора: 1 – кільцевий струмоприймач; 2 – озподільчий пристрій; 3 – синхронний двигун; 4 – трансформатор; 5 – шафи керування; 6 – пульт-крісло машиніста; 7 – генератори; 8 – двигуни

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 ланцюгів служить високовольтний розподільний пристрій (РП). Від РП

живиться синхронний двигун електромашинного перетворювального агрегату і трансформатор, що використовується для живлення ланцюгів керування, допоміжні електроприводів та інших пристроїв.

Електропривод основних рухів екскаватора: підйому, натиску ковша, повороту і пересування - здійснюється двигунами постійного струму, які отримують живлення від індивідуальних генераторів постійного струму. Всі генератори приводяться в обертання синхронним двигуном. Сукупність роботи таких пристроїв створює багатомашинний перетворювальний агрегат.

Для керування електроприводами служать пристрої (шафи) і пульт керування – крісло машиніста. Механічна частина електроприводів екскаватора складається з редуктора, барабанна-канатної передачі, зубчастої рейки приводу напору та інших елементів.

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. Загальна класифікація електроприводних 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 таблиці 1.1.

Таблиця 1.1

##### «Класифікація автоматизованих електроприводів»

| Класифікаційна ознака                           | Класифікаційні градації  |  |   |
|---|--|--|---|
| По виду руху електродвигуна                     | – обертальний<br>       | – лінійний<br>       | – багатокоординатний<br>         |
| За способом з'єднання двигуна з робочим органом | – редукторний<br>       | – безредукторний<br> | – конструктивно-інтегрований<br> |
| За регульованістю                               | – нерегульований   | – багатошвидкісний   | – регульований  |
|   | – з ручним керуванням;<br>– з напівавтоматичним керуванням;<br>– з замкнутою системою керування швидкості; |  |   |

|                              |   |   |
|------------------------------|---|---|
| За ступенем автоматизації    | – з замкнутою системою керування положення, що забезпечує точне позиціонування;                               |   |
|                              | – програмним керуванням;<br> | – слідкуючий<br> |
| За кількістю електродвигунів | – однодвигунний   | – багатодвигунний   |
| За кількістю робочих органів | – індивідуальний  | – груповий  |

В залежності від виду руху електродвигуна (обертального, лінійного) визначається вид руху електроприводу. Розповсюдженими є електроприводи обертального руху. Але останнім часом значна увага приділяється лінійним двигунам, які використовуються у тих механізмах, де робочий орган здійснює поступальний або зворотно-поступальний рух. У таких випадках застосування лінійних двигунів конструктивно набагато зручніше, ніж використання спеціальних кінематичних пар: наприклад, гвинт-гайка, кулько-гвинтові передачі, кривошипна-шатунний механізм та ін.

Раніше через низькі енергетичні і вагогабаритні показники лінійні електродвигуни не знаходили широкого застосування. Створення нових ефективних конструкцій лінійних двигунів з живленням їх від напівпровідникових перетворювачів частоти відкриває нові можливості використання для ряду виробничих машин. Наприклад, для металорізальних верстатів, робототехнічних комплексів тощо.

Також перспективним направленням є використання в багатокоординатних електроприводах крокових електродвигунів, які знаходять застосування у високоточних робототехнічних установках, складальних автоматах, верстатах ЧПУ та інших пристроях.

Основним параметром електроприводних систем є їх *регульованість*.

Цей параметр пов'язаний з багатоопераційними технологічними процесами і є важливим під час роботи автоматизованого комплексу.

Під *регульованістю електроприводу* розуміється можливість зміни або точного підтримання швидкості, прискорення або моменту (зусилля) приводного електродвигуна. Історично склалося, що більшість існуючих електроприводів виконано на базі асинхронних електродвигунів з короткозамкненим ротором. Відповідно їх модифікації двигуни поділяються на одношвидкісні та багатошвидкісні. Електроприводи з багатошвидкісними двигунами дають можливість отримувати дві або три фіксовані робочі швидкості. Але вони не можуть забезпечити плавного регулювання швидкості в заданому діапазоні. До подібних по керованості електроприводам також відносяться 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. В цілому поняття регульований електропривод має:

- встановлення за завданням будь-якій швидкості в межах заданного діапазону;
- стабілізацію значення швидкості з заданою точністю при збурюючих впливах, наприклад, зміни навантаження на валу двигуна;

– регулювання моменту, що розвиває двигун у рухомому і гальмівному режимах, та прискорення (уповільнення) приводу;

– формування необхідного характеру зміни швидкості в часі  $V=f(t)$  з заданою точністю.

У сучасних автоматизованих електроприводних системах більш широко використовуються регульовані електроприводи. В залежності від діапазону регулювання швидкості, електроприводи поділяються на:

- конструкції з обмеженим діапазоном регулювання (не більше 2:1);
- загального призначення з діапазоном регулювання не вище 100:1;
- з високим діапазоном регулювання швидкості (близько 1000:1);
- високоточні (діапазон регулювання 10000:1);
- прецизійні (діапазон регулювання 30000:1 і вище).

Величина діапазону регулювання визначає точність регулювання і швидкодію електроприводу.

### **1.5. Сучасні автоматизовані електроприводи за ступенем автоматизації**

Складність конструкцій електроприводних систем, можливості керування і функціональних операцій сприяють створенню сучасних класифікаційних груп.

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 напіваавтоматичною дією відбувається оператором за допомогою командного контролера, кнопок керування та інших електричних апаратів. Система керування містить елементи автоматичного 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 вантажопідійомних механізмів.

Для регульованого електроприводу використовуються замкнуті системи автоматичного регулювання (САР) по струму і швидкості. У цьому випадку керування може здійснюватися оператором (наприклад, машиністом екскаватору) або системою технологічної автоматики з використанням необхідних елементів (наприклад, дозаторів у папероробних машинах).

Велику класифікаційну групу складають позиційні електроприводні системи, які 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.

Сучасні електроприводні системи мають вплив на рух робочого органу машини, що визначається програмними засобами. Такі системи складають клас електроприводів з числовим програмним управлінням (ЧПУ). Приводи з ЧПУ містять замкнуті контури регулювання швидкості та положення.

Особливістю слідкуючих електроприводних систем є спостереження і відпрацювання необхідного завдання з достатньою точністю при зміні невідомого положення робочого органу. 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 механізми та ін.);
- можливість оптимізації технологічного процесу за рахунок регулювання електромеханічних параметрів (наприклад, прокатні стани);
- 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, зносу інструменту, адаптації технологічного процесу;
- 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 являються:

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

До числа перспективних електроприводів слід також віднести крокові електроприводи та вентильно-індукторний електропривод (рис. 1.12).

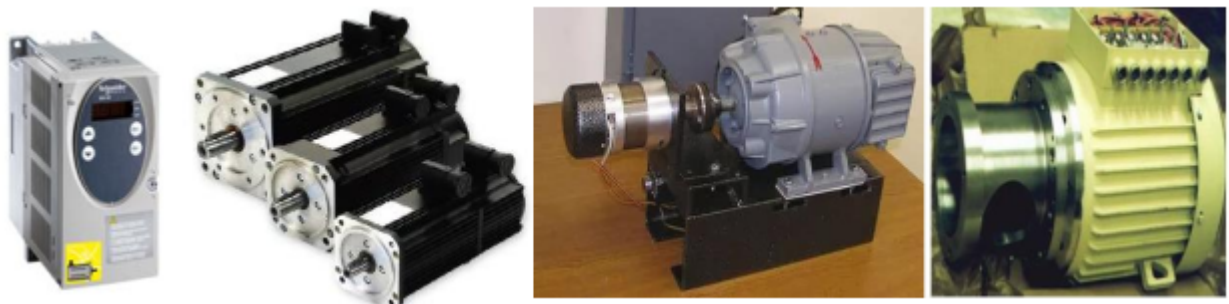


Рис. 1.12 – Перспективні конструкції електроприводів: *а* – крокові; *б* – вентильно-індукторні

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



### **Завдання на самостійне опрацювання та підготовку**

1. Самостійно відновити матеріал по основним поняттям та визначенням;
2. Самостійно опрацювати матеріал з опису принципу дії та схема вмикання двигунів постійного струму незалежного і паралельного збудження. Рівняння статичних електромеханічної та механічної характеристик.

## **ТЕМА №2. ФУНКЦІОНАЛЬНА СТРУКТУРА ЕЛЕКТРОМЕХАНІЧНИХ СИСТЕМ**

Мета: ознайомити здобувачів початкового рівня вищої освіти з поняттями таких об'єктів вивчення як «Електромеханічний пристрій», «Електромеханічна система», «Електропривод», «Електромеханічна система автоматичного керування», їх функціональне призначення, ієрархічна підпорядкованість та структурна побудова.

### **План лекції**

- 2.1. Електромеханічні пристрої та системи;
- 2.2. Основні поняття теорії управління. Терміни і визначення;
- 2.3. Розподіл функцій управління в технологічних системах.

### **Хід проведення лекційного заняття**

- I. Організація групи;
- II. Мотивація навчальної діяльності. Оголошення теми й мети;
- III. Викладення та обговорення нового матеріалу.
- IV. Оголошення завдання на самостійне опрацювання та підготовку.

### **2.1. Електромеханічні пристрої та системи**

Енергетичну основу технологічних об'єктів становлять переважно джерела та споживачі електричної енергії (електричні генератори й двигуни, електромагнітні та електронні пристрої). Це обумовлено перевагами електричної енергії над іншими її видами. Основними з них є: можливість використання наявних енергоносіїв для ефективного виробництва електричної енергії; економічність передачі електричної енергії на великі відстані, розподілу між споживачами та перетворення в енергію інших видів; можливість побудови високоякісних автоматизованих систем управління технологічними процесами (АСУТП). Основним видом обладнання для виробництва електроенергії та її використання в технологічних об'єктах є електромеханічні пристрої.

Електромеханічний пристрій – це технічний об'єкт, який за принципом роботи виконує функцію перетворювача електричної енергії в механічну або механічної в електричну. Основними енергоперетворювальними пристроями в технологічних об'єктах є електричні машини (двигуни й генератори). За типом механічних переміщень рухомої частини (ротора) існують конструкції електричних машин з обертальним та зворотно-поступальним видами руху. Найбільше застосування знаходять електричні машини обертального руху. Завдяки властивості оборотності одна й та ж електрична машина може працювати в двигуновому або генераторному режимі. До категорії електромеханічних пристроїв відносяться також тягові електромагніти, що використовуються в підйомно-

транспортних механізмах, релейно-контакторній апаратурі та багатьох інших технічних пристроях і системах.

У галузі науки і техніки «Електромеханіка» технічні об'єкти, що містять у своєму складі електромеханічні пристрої, прийнято називати електромеханічними системами, з додаванням до назви функціонального (технологічного) призначення цих систем. Поняття електромеханічної системи багатогранне. Щонайперше, ЕМС – це технічна система, яка здійснює перетворення електричної енергії в механічну або механічної енергії в електричну. Розглядаючи будь-який електромеханічний пристрій з позицій системного підходу, доходимо до висновку, що він є системою певного функціонального призначення, яка містить декілька елементів (можливо, й підсистем), конструктивно і функціонально пов'язаних між собою. Електродвигун і електрогенератор, як складні енергоперетворювальні пристрої, є електромеханічними системами. У той же час вони є головними енергоперетворювальними підсистемами, що входять у склад ЕМС відповідного функціонально-технологічного призначення як структурні елементи. Широко розповсюджені електромеханічні перетворювачі дискретної дії – електромеханічні системи контакторів і реле, штовкачів, муфт ковзання та інших технічних пристроїв. Комплекси комутаційних пристроїв (релейно-контакторна апаратура) для підключення/відключення, контролю, сигналізації, блокування та захисту електротехнічних та електронних пристроїв також є електромеханічними системами. Якщо в наших розсудженнях ми не торкаємось внутрішнього устрою системи, а розглядаємо лише її функціональні властивості, то цю систему відносимо до класу пристроїв.

В технологічних об'єктах з виробництва електроенергії (стаціонарних і мобільних) електромеханічними системами найближчого вищого рівня ієрархії по відношенню до електрогенераторів є перетворювальні агрегати (гідрогенератори, турбогенератори, дизель-генератори), в яких електромашинні генератори оснащені приводами їх роторів на базі турбін або двигунів внутрішнього згорання. У промислових технологічних об'єктах електромеханічними системами найближчого вищого рівня ієрархії по відношенню до електродвигунів є електроприводи робочих органів технологічних машин. Автоматизовані технологічні об'єкти містять також ЕМС наступного, угору за ієрархією, рівня. В енергогенеруючих об'єктах такою є ЕМС автоматичного регулювання параметрів електроенергії (напруги, частоти), а в технологічних об'єктах матеріального виробництва, трубопроводного транспорту та багатьох інших – ЕМС керування (ЕМСК) процесами руху робочих органів технологічних машин (механізмів). В автоматизованих ТМ формування заданого закону руху електропривода та його відпрацювання електроприводом (автоматизованим) здійснюється автоматично, без участі людини, тому ЕМСК у складі таких ТМ є системами автоматичного керування. Електромеханічні системи автоматичного керування є окремим, достатньо специфічним і розпоширеним класом систем автоматичного керування. Саме такі ЕМС є предметом вивчення навчальної дисципліни.

## **2.2. Основні поняття теорії управління. Терміни і визначення**

*Управління (керування)* – це цілеспрямована сукупність дій, які змушують об'єкт управління (наприклад, ТМ) виконувати певний алгоритм функціонування з бажаним

результатом. Лексикою мови розмежування термінів «управління» та «керування» чітко не визначено, однак зазвичай термін «управління» застосовують для позначення функцій управління вищого рівня, які містять операції «командного» (координаційного) управління складними технічними (технологічними) об'єктами, а термін «керування» використовують стосовно до безпосереднього управління функціонуванням єдиного об'єкту (процесу) для виконання завдань, що надходять від системи управління (СУ) вищого рівня ієрархії.

*Система управління (керування)* – це сукупність функціонально пов'язаних підсистем і пристроїв, що забезпечують виконання об'єктом управління (керування) певного (наприклад, технологічного) завдання. Якщо управління (керування) здійснюється без участі людини, то СУ (СК) називається автоматичною (САУ, САК). Прикладами автоматичних систем можуть бути СК робочим органом технологічної машини та СК електроприводом, якщо не приймати до уваги операції вмикання/вимикання, налагодження та ін., що виконуються людиною (групою людей). Якщо окремі операції управління здійснює людина, то такі СУ (СК) називаються автоматизованими. До числа останніх можуть належати АСУТП, СУ технологічного агрегату, СУ технологічною машиною. Приймаючи до уваги співвідношення функцій «управління» та «керування», можна вважати, що системи керування (СК, САК) є частковим випадком систем управління (СУ, САУ). Що стосується технічних і технологічних об'єктів, то їх називають автоматизованими, якщо вони оснащені автоматичними або автоматизованими системами управління (керування).

Узагальнену структурну схему СУ (СК) подано на рис. 2.1. Згідно до концептуальних положень теорії управління, СУ (СК) будь-яким об'єктом (процесом) уявляє собою систему функціонально пов'язаних задавального, управляючого (керуючого) і виконавчого пристроїв, об'єкта управління і давачів вимірюваних перемінних стану виконавчого пристрою та об'єкта управління (інформаційно-вимірювальної підсистеми). Функції задавального пристрою може виконувати СУ вищого рівня (за ієрархією). В автономній СУ, що не підпорядкована ніякої СУ вищого рівня ієрархії, задавальний пристрій уявляє собою пульт управління (як технічний засіб виконання функцій управління людиною – оператором).

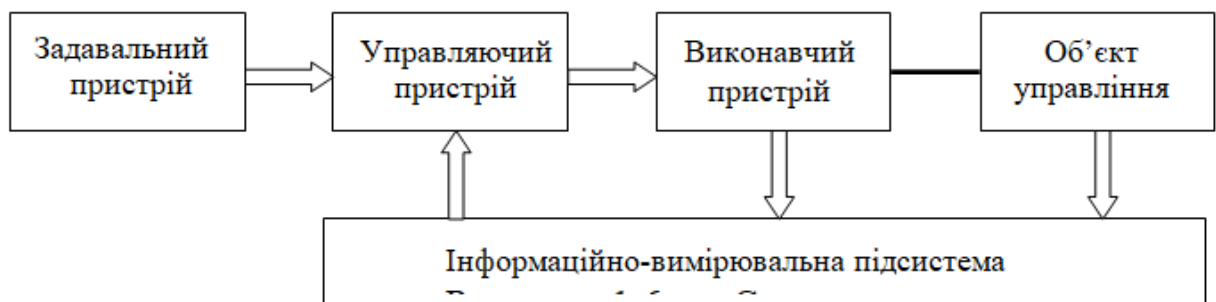


Рис. 2.1 – Узагальнена структурна схема системи управління

Узагальненість структурної схеми рис. 2.1 полягає в тому, що вона відображує загальний випадок структурно-функціональної побудови будь-якої СУ (автоматизованої, автоматичної, автономної), як це буде показано в подальшому.

Функціональні зв'язки між структурними блоками СУ є інформаційними, за винятком зв'язку між виконавчим пристроєм та об'єктом управління, який може бути

енергетичним. В електромеханічних СК виконавчий пристрій є енергоперетворювальним, саме такому випадку відповідає структурна схема рис. 2.1, де енергетичний зв'язок показаний лінією без стрілки.

Крім основних структурних складових, перелічених у наведеному вище визначенні СУ (СК), в її склад входять пристрої (на рис. 2.1 не показані), що забезпечують захист, блокування, сигналізацію, операції включення/відключення пристроїв, а в сучасних системах – також діагностику, тестування і резервування, з конструктивним оформленням у вигляді пультів управління та схем електроавтоматики.

Об'єкт управління в процесі його функціонування підпадає під різні діяння. З боку виконавчого пристрою він зазнає *управляючі (керуючі) діяння*, спрямовані на досягнення цілі управління. З боку довкілля та суміжних об'єктів і систем об'єкт управління зазнає *збурюючі діяння*, які можуть мати як детермінований, так і випадковий характер. Основною задачею СУ (СК) є забезпечення заданого закону функціонування об'єкта управління при будь-яких збурюючих діяннях.

Задачею управління технічним (технологічним) об'єктом часто є забезпечення постійності деякої фізичної перемінної (швидкості руху робочого органу ТМ, тиску, температури та ін.), або її змінення в часі за певним законом. Такий окремий вид управління називається *регулюванням*. Узагальнена структура системи автоматичного регулювання (САР) відрізняється від загальної структури СУ (рис. 2.1) відсутністю задавального пристрою. Функціональну відмінність має лише керуючий пристрій, який містить регулятори однієї або декількох фізичних перемінних. Невід'ємною ознакою САР є наявність зворотних зв'язків з регульованих фізичних перемінних (перемінних стану об'єкта управління). Формування управляючої дії є функцією деякого задавального пристрою, тому очевидно, що САР є структурною складовою системи управління (керування) об'єктом, перемінні стану якого підлягають регулюванню. Якщо кількість регульованих перемінних дорівнює двом і більше, то САР (будь-яка СУ) носить назву *багатомірної*, а в протилежному випадку – *одномірної* системи.

В літературних джерелах, де розглядаються системи управління технічними об'єктами, іноді застосовується термін «система управління об'єкта». Цим терміном характеризується сукупність управляючого пристрою та інформаційно-вимірювальної підсистеми, тобто так званий інформаційний канал системи управління об'єктом. Зокрема, така термінологія застосовується в теорії електропривода для зазначення належності інформаційного каналу певному об'єкту управління.

Для систем управління і, зокрема, САР застосовується наступна класифікація.

*Автоматичні системи стабілізації*, що забезпечують підтримання регульованої фізичної величини на заданому рівні з потрібною точністю. До таких систем відносяться, наприклад, система регулювання температури в нагрівальній пічі, система регулювання швидкості двигуна та багато інших. Системи стабілізації поділяються на статичні та астатичні. *Статичними системами* називаються такі, в яких регульована величина в усталених режимах змінюється при зміненнях збурюючої дії. *Астатичні системи* забезпечують підтримку регульованої перемінної в усталеному режимі на незмінному рівні при зміненнях збурюючої дії. Інакше кажучи, астатичні САР забезпечують регулювання перемінних в усталеному режимі без похибки, тобто суворо на заданому рівні, а статичні САР – з деякою похибкою.

*Слідуючі системи*, що здійснюють відпрацювання завдання регульованої величини в часі за законом, якій заздалегідь невідомий. Прикладами такої системи можуть служити система наведення артилерійської гармати на ціль, що рухається, система навігації радіоантени, що забезпечує зв'язок з космічним об'єктом, та багато інших.

*Системи програмного управління (керування)*, що здійснюють змінення регульованих величин в часі за законами, які заздалегідь запрограмовані (за визначеними програмами). До таких систем відносяться, зокрема, системи числового програмного керування верстатами.

*Адаптивні системи*, що здійснюють оптимальне, за заданим показником якості, управління поточним станом об'єкта при зміненнях умов його роботи. До класу адаптивних відносяться системи, що самонастроюються, самоорганізуються, самонавчаються.

### **2.3. Розподіл функцій управління в технологічних системах**

В автоматизованих ТМ до складу кожної ЕМСК входять робочий орган технологічної машини (механізму), його привод і система управління приводом, функціонально пов'язані технологічним процесом. Тому ЕМСК, як підсистеми автоматизованих технологічних об'єктів, не можуть розглядатися відокремлено від технологічних процесів, для реалізації яких вони призначені. Цю обставину ілюструє узагальнена структурна схема технологічного комплексу, що подана на рис. 2.2.

Автоматизований технологічний комплекс з виробництва певного виду продукції (рис. 2.2) функціонує під управлінням АСУТП, яка виконує функції управління технологічними агрегатами (ТА) і окремими ТМ у складі цього комплексу, тобто здійснює функцію координаційного управління цими технологічними об'єктами. Формування команд (сигналів) управління згаданими ТА і ТМ здійснюється шляхом виконання певних алгоритмів обробки команд, що надходять від СУ виробництвом (вищої за ієрархією, на рис. 2.2 не показана), інформації про поточні значення контрольованих параметрів технологічного процесу та про стан всіх підсистем технологічного комплексу. Звертаючись до рис. 2.1, нескладно бачити такі аналогії: АСУТП виконує функції управляючого пристрою, СУ виробництвом є аналогом задавального пристрою, сукупність ТА і ТМ технологічного комплексу є аналогом виконавчого пристрою, а об'єктом управління є технологічний процес виробництва певного виду продукції. Указані чотири структурні складові прямого тракту управління та інформаційно-вимірювальна підсистема з функціональними зв'язками між ними створюють СУ технологічним процесом, який здійснюється цим технологічним комплексом.

Автоматизований ТА (рис. 2.2) містить власну систему управління – систему управління технологічного агрегата (СУТА), яка виконує функцію координаційного управління технологічними машинами у складі цього ТА. Формування команд (сигналів) управління технологічними машинами здійснюється шляхом виконання певних алгоритмів обробки команд, що надходять від АСУТП, інформації про поточні значення контрольованих параметрів технологічного процесу та інформації про поточний стан всіх підсистем ТА. Отже, по відношенню до СУТА, як аналога управляючого пристрою з інформаційно-вимірювальною підсистемою в узагальненій структурі СУ (рис. 2.1), АСУТП виконує функції задавального пристрою (для кожної з СУ технологічних

агрегатів та відокремлених ТМ, підпорядкованих до АСУТП безпосередньо. Аналогом виконавчого пристрою є сукупність ТМ і механізмів, які створюють цей ТА, а об'єктом управління є технологічний процес, що здійснюється саме цим ТА (частина технологічного процесу, що виконується всім технологічним комплексом). Указані чотири складові з функціональними зв'язками між ними створюють систему управління технологічним процесом, який здійснюється цим ТА.

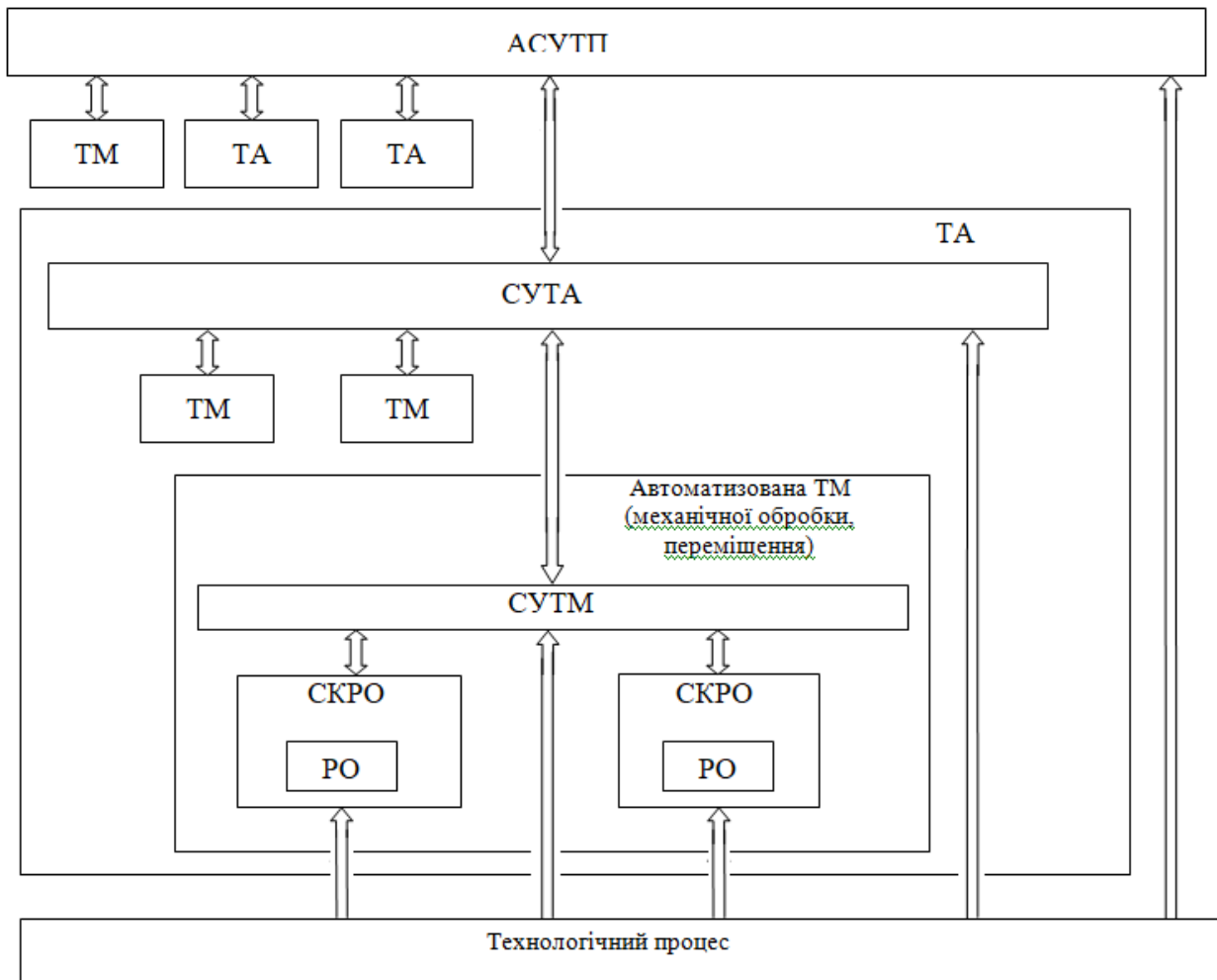


Рис. 2.2 – Структурна схема автоматизованого технологічного комплексу

Автоматизована ТМ містить декілька РО (можливо, єдиний) і власну систему управління – систему управління технологічної машини (СУТМ), яка виконує функції управління механічними процесами (обробки, переміщення) шляхом координаційного управління приводами робочих органів з метою взаємного погодження часових, швидкісних, силових, траєкторних та інших параметрів руху РО у відповідності до технологічного регламенту. Формування команд (сигналів) координаційного управління здійснюється шляхом виконання певних алгоритмів обробки команд, що надходять від СУТА, інформації про поточні значення контрольованих параметрів технологічного процесу та інформації про поточний стан всіх підсистем ТМ. Безпосереднє керування процесами виконання робочими органами корисної роботи здійснюють СК процесами руху робочих органів (СКРО). Результатом функціонування СУТМ є сигнали командного

рівня, якими задаються цільові установки керування рухом робочих органів (величини переміщень, швидкості руху, обмеження силових параметрів та ін.), які передаються на входи СКРО. Отже, для СУТМ як аналога управляючого пристрою з інформаційно-вимірною підсистемою об'єктом управління є сукупність механічних процесів, які має виконувати ця ТМ (частина технологічного процесу, що виконується всім ТА), виконавчим пристроєм є комплекс систем керування процесами руху робочих органів (СКРО), а СУТА виконує функції задавального пристрою.

Розглянута функціональна структура автоматизованого технологічного комплексу (рис. 2.2) є узагальненою. У промислових виробничих системах зустрічаються автономні ТА і ТМ, не підпорядковані АСУТП, а також ТМ, які не входять у склад ТА. Технологічна машина може уявляти собою єдиний механізм з електроприводом його робочого органу (можливо, декількох РО з груповим приводом). В таких часткових випадках СУ технологічного об'єкту є людино-машинною, функції управління командного рівня виконує оператор за допомогою пульта управління. Останній уявляє собою ЕМС у вигляді комплексу комутаційних пристроїв, засобів контролю і сигналізації.

В залежності від виду застосованого приводу, СКРО можуть бути електро-, гідро- або пневмомеханічними. У більшості практичних реалізацій приводи робочих органів технологічних машин, як згадувалось вище, виконуються електричними. Відповідно і СКРО типу ЕМСК відносяться до числа найбільш розповсюджених. Функціональну структуру ЕМСК процесами руху робочого органу технологічної машини пояснює рис. 2.3.

Електропривод РО (можливо, декількох РО при груповому приводі) технологічної машини у загальноприйнятому визначенні містить енергетичний (силовий) канал перетворення і передачі енергії у вигляді послідовного ланцюгу «перетворювальний пристрій – електродвигуновий пристрій – передатний пристрій», та інформаційний канал, складовими якого є керуючий пристрій та інформаційно-вимірвальна підсистема електропривода.

Задавальний пристрій у складі ЕМСК здійснює формування сигналів керування електроприводом шляхом виконання певних алгоритмів обробки команд, що надходять від СУТМ, інформації про поточні значення контрольованих параметрів технологічного процесу та інформації про поточний стан підсистем ЕМСК. Результатом функціонування задавального пристрою є сигнали, якими задаються потрібні за умов технології поточні значення механічних перемінних стану електропривода, а можливо, і робочого органа (положення, швидкості руху, моменту, сили). Вихідні сигнали задавального пристрою є вхідними (задавальними) для електропривода. Електропривод здійснює безпосереднє керування процесами руху РО (одного РО при індивідуальному, або декількох – при груповому приводі). Якщо ЕП є автоматизованим (виконуючим свої основні функції без участі людини), то ЕМСК уявляє собою автоматизовану ЕМС, яка відноситься до категорії ЕМСАК. Отже, в ЕМСК (у загальному випадку – СКРО) функції керуючого і виконавчого пристроїв виконує електропривод, а об'єктом керування є процес руху (поточний стан) РО технологічної машини.

Слід мати на увазі, що керуючий пристрій (КП) електропривода, перетворювальний та електродвигуновий пристрої містять не тільки пристрої, в яких здійснюються інформаційні та енергетичні процеси, але й електромеханічні пристрої для виконання дискретних в часі операцій вмикання/вимикання, захисту та ін. Якщо ЕП не є

автоматизованим, тобто КП електропривода не містить регуляторів координат (перемінних стану) енергетичного каналу, а електродвигуновий пристрій (електродвигун) того ж роду струму, як і джерело живлення (живільна мережа), то перетворювальний пристрій може бути відсутнім. Такий випадок має місце, наприклад, коли автономна ТМ уявляє собою єдиний механізм з електричним приводом РО, задавальним пристроєм є пульт управління, а КП електропривода виконаний у вигляді релейно-контакторної схеми керування двигуном.

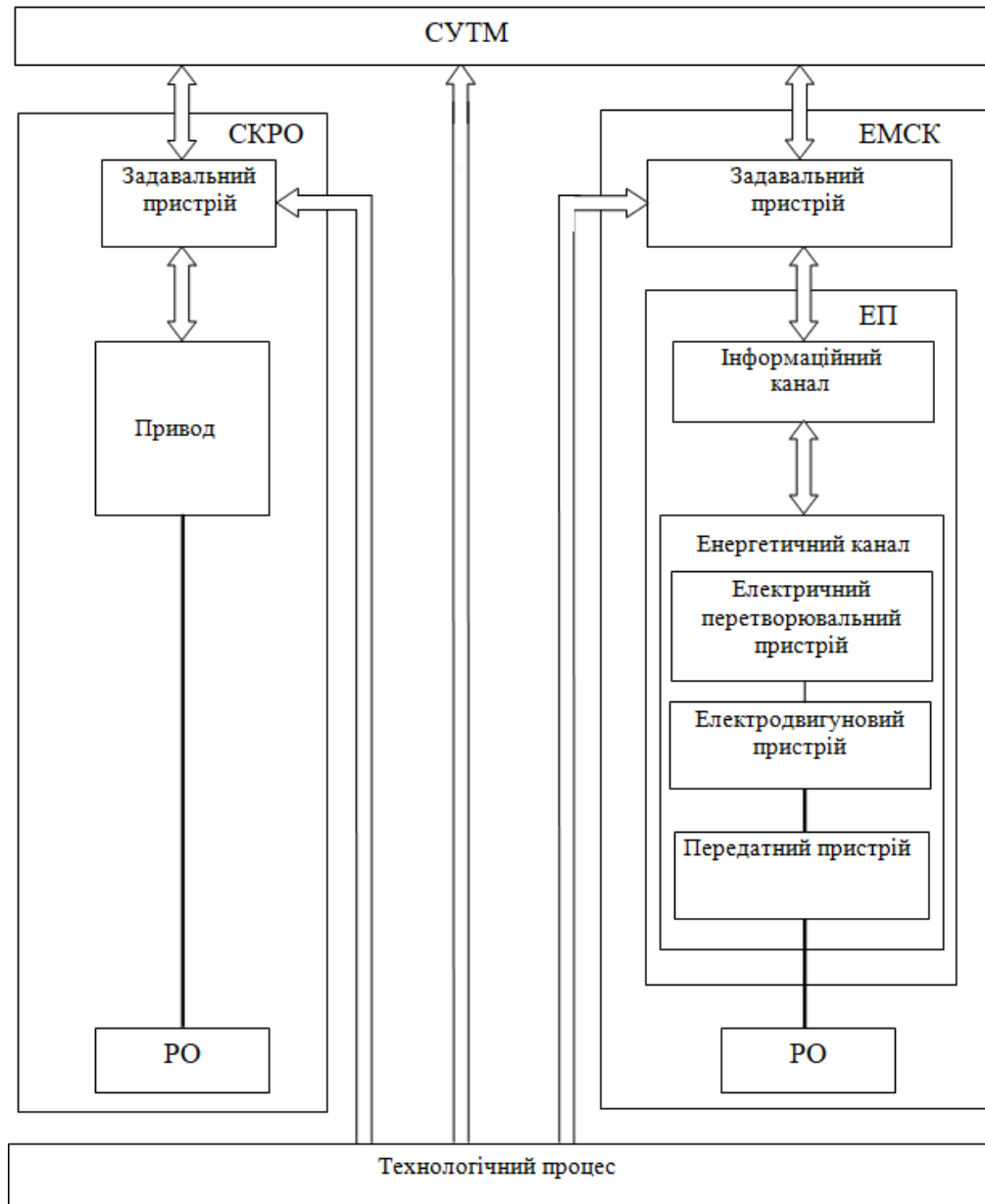


Рис. 2.3 – Структурна схема автоматизованої технологічної машини

В літературних джерелах часто використовується термін «СК електроприводом». Зіставлення цього терміну з наведеними вище визначеннями об'єктів класів «Система управління (керування)», «ЕМСК» і «Електропривод» не дає підстав вважати ЕМСК системою керування електроприводом, тому що в прямому тракті ЕМСК (рис. 2.3) між задавальним пристроєм і електроприводом відсутній керуючий пристрій, а функцію



керування електроприводом виконує, по суті, задавальний пристрій. Однак, оскільки ЕМСК здійснює керування процесом руху РО шляхом формування певного закону руху електропривода, то ЕМСК можна вважати системою, яка виконує функції керування електроприводом.

Подання СУТМ як системи, яка виконує тільки функції координаційного управління робочими органами ТМ, є в певній мірі умовним. До функцій СУТМ можна віднести й функцію формування заданих законів руху приводів РО, яка виконується відповідними підсистемами СУТМ (віртуальними, у вигляді підпрограм роботи промислового контролера, на базі якого виконана СУТМ). Виділення підсистем формування заданих законів руху приводів як окремих структурно-функціональних блоків (задавальних пристроїв) дає можливість, по-перше, подати структурну схему автоматизованої ТМ з чітким розподілом функцій, що виконуються її структурними елементами, а по-друге, врахувати сучасну тенденцію модульної побудови мікропроцесорних контролерів у складі комплектних електроприводів, яка дозволяє комплектування контролера спеціальним модулем – так званою «технологічною платою». Така «технологічна плата» як раз і виконує функцію формування заданого закону руху робочого органа, а виходить, і електропривода, тобто вона є технічним і програмним засобом реалізації задавального пристрою електропривода.

Стосовно використання термінів «управління» та «керування» слід зауважити, що підставою для присвоєння системам АСУТП, СУТА, СУТМ (рис. 2.1, 2.2) саме таких назв (система управління) є виконання функцій організаційних систем (координації роботи підпорядкованих об'єктів), а назву «система керування» ми використовуємо для систем ЕМСК, ЕМСАК, СКРО, що здійснюють функції управління локальними об'єктами.

Найбільш складною, за структурно-функціональною організацією, підсистемою ЕМСК є електропривод робочого органу (можливо, декількох) технологічної машини. Принципи побудови сучасних систем автоматизованого електропривода розглядаються у наступних темах.

#### **Завдання на самостійне опрацювання та підготовку**

1. Самостійно відновити матеріал по основним поняттям та визначенням;
2. Самостійно опрацювати матеріал з опису : Гальмівні режими роботи ДПС ПЗ. Регулювання кутової швидкості ДПС ПЗ.

### **ТЕМА №3. РОЛЬ ЕЛЕКТРОПРИВОДА В ПРОМИСЛОВІСТІ. ЕЛЕКТРОПРИВОД ТА ЙОГО ЕЛЕМЕНТИ. ОСНОВНІ ПОНЯТТЯ І ВИЗНАЧЕННЯ**

Мета: ознайомити здобувачів початкового рівня вищої освіти з станом та основними напрямками розвитку електропривода, його роль у сільськогосподарському виробництві, основні визначення та характеристика його ключових елементів. Представляється структура електроприводу.

#### **План лекції**

- 3.1. Стан та основні напрями розвитку електропривода, його роль у сільськогосподарському виробництві;
- 3.2. Електропривод та його елементи. Основні поняття і визначення;

- 3.3. Класифікація електроприводу;
- 3.4. Механіка електропривода.

Хід проведення лекційного заняття

- I. Організація групи;
- II. Мотивація навчальної діяльності. Оголошення теми й мети;
- III. Викладення та обговорення нового матеріалу.
- IV. Оголошення завдання на самостійне опрацювання та підготовку.

### **3.1. Стан та основні напрями розвитку електропривода, його роль у сільськогосподарському виробництві**

У сільському господарстві для виробництва продукції використовують робочі машини, виконавчий орган яких може приводитися в рух різноманітним приводом. *Привод* – це система пристроїв, призначених для перетворення різних видів енергії в механічну, яка призначена для приведення в рух виконавчого органу робочої машини і керувати цим рухом.

Залежно від виду первинної енергії розрізняють ручний, паровий, гідравлічний, вітряний, тепловий, пневматичний і електричний приводи. Порівняно з іншими видами приводів електропривод має такі переваги: високий коефіцієнт корисної дії (ККД), надійність, високий рівень автоматизації, екологічна чистота, компактність тощо.

Розвиток електропривода розпочався у 1838 р., коли петербурзький академік Б.С. Якобі провів на Неві випробування електродвигуна постійного струму, встановленого на катері. В 1889 р. М.О. Доливо– Добровольський створив трифазний асинхронний електродвигун. Трифазні асинхронні двигуни стали основними двигунами привода стаціонарних робочих машин. Протягом віку з четвертиною розвиток техніки і технологій спонукав до створення та впровадження електроприводів із системами автоматичного керування технологічними процесами і виробництвами. Впровадження цих систем стало можливим завдяки бурхливому розвитку напівпровідникової техніки, широкому застосуванню напівпровідникових приладів, мікропроцесорів і комп'ютерних технологій. З'явилися програмно керовані, адаптивні, слідкуючі та інші види складних приводів. Поряд з розвитком систем керування розроблялися і нові типи та модифікації електродвигунів. На базі лінійних і тихохідних двигунів створюються безредукторні приводи. Широкого застосування набувають комплектні електроприводи, що обслуговують окремі технологічні процеси або цілі комплекси. У сільськогосподарському виробництві здебільшого застосовують нерегульовані електроприводи з асинхронними двигунами з короткозамкненим ротором, які споживають найбільшу кількість електроенергії – біля 70%. Зважаючи на значні об'єми споживаної ними електроенергії, проблема енергозбереження у електроприводі нині є дуже гострою. Тому впроваджуються у виробництво енергозберігаючі асинхронні двигуни, застосовується регульований електропривод змінного струму, контроль і аналіз у реальному часі режимів роботи електроприводів сільськогосподарських машин, механізмів і потокових ліній – все це дає можливість перетворювати електроенергію раціонально, з найвищим економічним ефектом.

### 3.2. Електропривод та його елементи. Основні поняття і визначення

Електропривод (рис. 3.1) – це електромеханічна система, яка складається з: електродвигунного (ЕД), перетворювального (ПП), механічного передавального (МПП) та керуючого (КП) пристроїв і призначена для приведення в рух виконавчих органів робочих машини та керування цим рухом.

Основою будь-якого електропривода є один або декілька електродвигунів постійного або змінного струму, призначених для перетворення електричної енергії в механічну. Вони отримують живлення від джерела електроенергії (ДЕЕ) через перетворювальний пристрій, який перетворює і регулює параметри електричної енергії (струм, напругу, частоту).

Як перетворювальні пристрої в електроприводі використовують автономні генератори з регулюванням в широких межах напруги на їх затискачах, керовані тиристорні випрямлячі, автотрансформатори, перетворювачі частоти тощо.

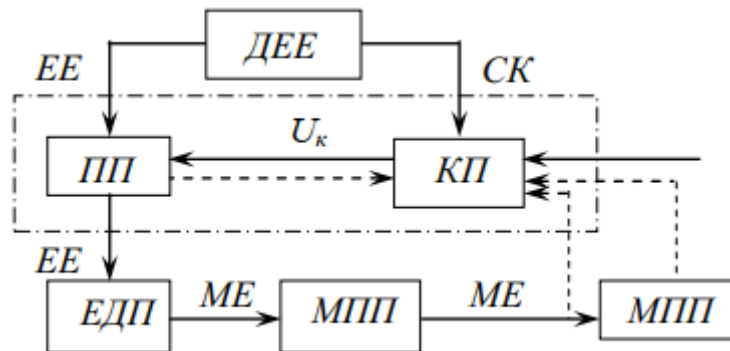


Рис. 3.1 – Структурна схема автоматизованого електропривода

Механічний передавальний пристрій (МПП) передає механічну енергію від електродвигуна до виконавчого органу робочої машини та узгоджує вид та швидкість їх руху.

У сучасних сільськогосподарських електроприводах найпоширеніші клинопасові, зубчасті та ланцюгові передачі, а також різноманітні за своєю конструкцією з'єднувальні муфти. Керування процесом перетворення електричної енергії виконується керуючим пристроєм (КП), який виробляє керуючий сигнал  $U_k$  у функції вхідного сигналу  $U_b$  і різних додаткових електричних сигналів, що містять інформацію про процес перетворення енергії, реальні параметри механічного руху електродвигуна і виконавчого органу робочої машини тощо. Перетворювальний та керуючий пристрої утворюють систему керування (СК), яка разом з обмотками електродвигуна складає електричну частину електропривода. До складу керуючих пристроїв належать апарати керування, захисту, сигналізації та різні підсилювачі, вимірювальні елементи, блоки порівняння дійсних і заданих значень робочих параметрів тощо.

Електропривод має два канали – силовий або енергетичний і інформаційний. Першим транспортується перетворювана електрична енергія до робочої машини, а другим здійснюється керування потоком енергії.

Силовий або енергетичний канал складається з двох частин – електричної і механічної. Послідовно з'єднані елементи електричних, електромеханічних і механічних

перетворювачів енергії, які безпосередньо беруть участь у процесі перетворення електричної енергії на механічну (і навпаки, у разі електричного гальмування), складають собою силовий канал електропривода.

*Інформаційний канал* виробляє керуючий сигнал  $U_k$  у функції вхідного сигналу  $U_v$  і різних додаткових електричних сигналів, що містять інформацію про процес перетворення енергії, реальні параметри механічного руху електродвигуна і виконавчого органу робочої машини тощо. До складу інформаційного каналу можуть входити мікропроцесори, ЕОМ з широкими і різноманітними можливостями керування складним рухом виконавчого органу, наприклад, сучасного маніпулятора або робота.

### 3.3. Класифікація електроприводу

Сучасні електроприводи класифікують за такими основними ознаками:

1. За видом руху електродвигуна і можливістю зміни його напрямку розрізняють електроприводи обертального і поступального руху. При цьому швидкість виконавчого органу може бути регульованою або нерегульованою, а сам рух – неперервним або дискретним, нереверсивним або реверсивним.

2. За кількістю робочих машин або виконавчих органів однієї робочої машини, які приводяться в рух одним електроприводом, – групові та індивідуальні електроприводи. Груповим називають електропривод, який забезпечує рух виконавчих органів кількох робочих машин чи кількох виконавчих органів однієї робочої машини, а індивідуальним – електропривод, що забезпечує рух одного виконавчого органу робочої машини.

3. За наявністю зв'язків з іншими електроприводами – незалежні, режими роботи яких практично не залежать від режимів роботи інших електроприводів і взаємозв'язані, в яких два або кілька електроприводів електрично і механічно зв'язані між собою. При роботі взаємозв'язаних електроприводів підтримується задане співвідношення їх швидкостей, навантажень або положення виконавчих органів робочих машин. Розрізняють два види взаємозв'язаних електроприводів: багатодвигунні, в яких електродвигунні пристрої працюють разом на загальний вал, і електричні вали, в яких забезпечується синхронне обертання двох і більше електродвигунів, вали яких не мають механічного зв'язку.

4. За можливістю зміни параметрів – регульовані електроприводи, параметри яких змінюються під впливом керуючого пристрою, і нерегульовані електроприводи, параметри яких змінюються у результаті збурюючих впливів (зміна навантаження, напруги, частоти, опору окремих кіл).

5. За рівнем автоматизації керування – неавтоматизовані, автоматизовані та автоматичні. Неавтоматизованим називають електропривод, усі операції керування яким виконуються за участю людини. В автоматизованому електроприводі людина бере участь у створенні початкової керуючої дії, а керування автоматичним електроприводом здійснюється без участі людини. Автоматизовані електроприводи поділяються на програмнокеровані, якими керують відповідно до заданої програми, і слідкуючі, що переміщують виконавчі органи робочих машин відповідно до заданого сигналу.

6. За видом перетворювального пристрою – вентильні, автотрансформаторні, за системою генератор – двигун, каскадні тощо. Вентильні електроприводи, в свою чергу, поділяються на системи: випрямляч – двигун і перетворювач частоти – двигун. Перетворювальними пристроями цих електроприводів відповідно є вентильно-

напівпровідникові перетворювачі електричної енергії або регульовані випрямлячі та інвертори і регульовані перетворювачі частоти.

У системі „генератор-двигун” перетворювальним пристроєм є електромашинний перетворювальний агрегат. Каскадним називають регульований електропривод змінного струму з асинхронним двигуном, в якому потужність ковзання за допомогою перетворювачів повертається в електромережу змінного струму або на вал двигуна.

7. За родом механічного передавального пристрою розрізняють редукторний електропривод і безредукторний, привод з варіатором, з пасовою передачею, з фрикційною муфтою.

8. За родом струму – електроприводи постійного струму, в яких електродвигунними пристроями є електродвигуни постійного струму (незалежного, послідовного та змішаного збудження), і електроприводи змінного струму. В електроприводах змінного струму електродвигунними пристроями є асинхронні або синхронні електродвигуни.

9. За призначенням – головні, що забезпечують головний рух виконавчого органу робочої машини або основну операцію виробничого процесу, та допоміжні, які забезпечують допоміжний рух або допоміжну операцію виробничого процесу.

### 3.4. Механіка електропривода

У сучасних приводах в якості джерела МЕ використовуються різні електричні двигуни (ЕД). Вони перетворюють електричну енергію (ЕЕ) в механічну і тому привід отримав назву електроприводу (ЕП). Його функціональна схема наведена на рис. 3.2. До її складу, крім названих елементів, входить керований перетворювач (П), за допомогою якого ЕЕ від мережі подається до ЕД. Змінюючи сигнал управління перетворювачем  $U_y$ , можна змінювати кількість ЕЕ, що надходить від мережі до ЕД. В результаті цього буде змінюватися кількість МЕ, що виробляється двигуном, і одержує ТМ. Це, в свою чергу, призведе до зміни технологічного процесу, ефективність якого характеризується регульованою величиною  $y(t)$ .

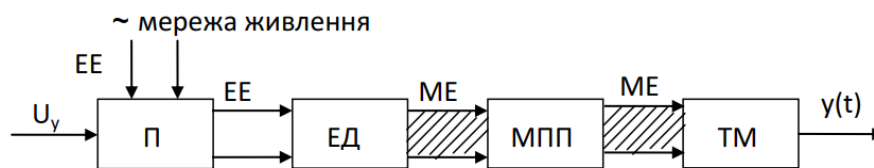


Рис. 3.2 – Функціональна схема електропривода

#### Завдання на самостійне опрацювання та підготовку

1. Самостійно відновити матеріал по основним поняттям та визначенням;
2. Самостійно опрацювати матеріал з опису : Рівняння статичних електромеханічної та механічної характеристик трифазного асинхронного двигуна у параметричній формі та їх аналіз.

## ТЕМА №4. ЕЛЕКТРОМЕХАНІЧНІ ТА МЕХАНІЧНІ ХАРАКТЕРИСТИКИ ЕЛЕКТРОДВИГУНІВ. ПЕРЕХІДНІ ПРОЦЕСИ В ЕЛЕКТРОПРИВОДАХ

Мета: ознайомити здобувачів початкового рівня вищої освіти з поняттям електромеханічних та механічних характеристик двигуноів двигунів постійного струму незалежного збудження та послідовного збудження. Також визначити перехідні процеси під час роботи електродвигуна.

### План лекції

- 4.1. Поняття електромеханічних та механічних характеристик;
- 4.2. Механічні характеристики двигунів постійного струму незалежного збудження;
- 4.3. Механічні характеристики двигунів постійного струму послідовного збудження;
- 4.4. Поняття про перехідні процеси;
- 4.5. Рівняння перехідного процесу в електроприводах;
- 4.6. Форми запису рівняння руху електроприводу;
- 4.7. Час роботи електроприводу в перехідному режимі.

### Хід проведення лекційного заняття

- I. Організація групи;
- II. Мотивація навчальної діяльності. Оголошення теми й мети;
- III. Викладення та обговорення нового матеріалу.
- IV. Оголошення завдання на самостійне опрацювання та підготовку.

### 4.1. Поняття електромеханічних та механічних характеристик

Електричний двигун, на відміну від двигунів інших типів, здатний сам автоматично розганятися до швидкості усталеного режиму роботи, знижувати швидкість при збільшенні моменту опору і з усталеного режиму з більшою швидкістю переходити в сталий режим з меншою швидкістю, збільшувати швидкість при зменшенні моменту опору і переходити з усталеного режиму з меншою швидкістю до сталого режиму з більшою швидкістю. Ця особливість електричного двигуна пояснюється тим, що між швидкістю обертання і обертовим моментом двигуна існує залежність  $\omega = f(M)$ , відповідно до якої зі збільшенням моменту швидкість зменшується і навпаки. Називають цю залежність механічною характеристикою двигуна.

За допомогою механічної характеристики можна визначити основні властивості електричного двигуна і перевірити їх відповідність вимогам технологічної машини. Осі абсцис і ординат, за якими відкладаються відповідно величини  $M$  і  $\omega$ , поділяють площину на чотири квадрата. Перший номер прийнято привласнювати верхньому правому квадрату, а інші нумерувати проти годинникової стрілки. У першому квадранті знаки  $M$  і  $\omega$ , а значить і напрямки величин, збігається. Тому в ньому розташовуються механічні характеристики для рухового режиму роботи електричної машини. Аналогічні характеристики для протилежного напрямку обертання розташовуються і в третьому квадранті, так як знаки  $M$  і  $\omega$  негативні.

У другому квадранті швидкість  $\omega$  позитивна, а момент  $M$  має негативний знак. Тому в ньому розташовуються механічні характеристики, відповідні режиму електричного гальмування, коли під дією інерційних сил напрямок обертання зберігається, а напрямок моменту за рахунок зміни схеми включення двигуна змінюється на протилежний. Аналогічні характеристики для протилежного напрямку обертання розташовуються і в четвертому квадранті, так як в ньому  $\omega$  має негативний знак, а  $M$  - позитивний.

#### 4.2. Механічні характеристики двигунів постійного струму незалежного збудження

Схема включення двигуна постійного струму (ДПС) з незалежним збудженням наведена на рис. 4.1.

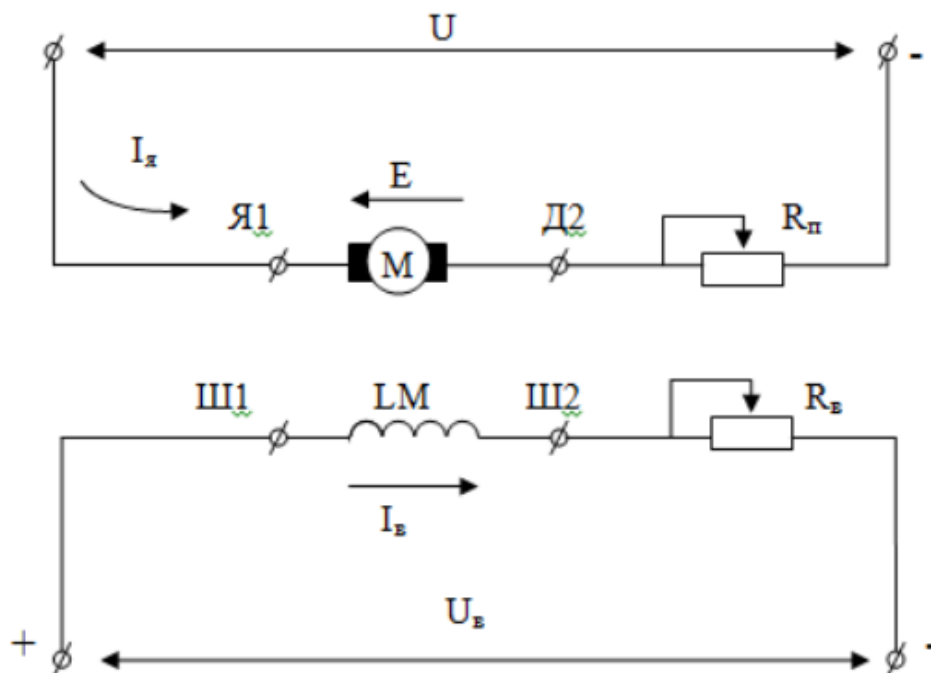


Рис. 4.1 – Схема включення двигуна постійного струму (ДПС) з незалежним збудженням

Якір двигуна і обмотка збудження  $LM$  отримує живлення від незалежних джерел напруги  $U$  і  $U_v$ . Тому струм в обмотці збудження  $I_v$  не залежить від струму якоря  $I_a$ . Потужність джерела  $U_v$  не перевищує 15% від потужності джерела  $U$ .

При обертанні якоря в його обмотці наводиться е.р.с. обертання  $E$ . На схемі включення двигуна напрямок  $E$  зустрічний стосовно напрямку  $U$ , що відповідає руховому режиму роботи. Величина  $E$  дорівнює:

$$E = k\Phi\omega,$$

де  $\omega$  – кутова швидкість двигуна;  $\Phi$  – потік двигуна;  $k$  – конструктивний коефіцієнт двигуна, дані для розрахунку якого наводяться в довідниках;

$$k = \frac{pN}{2\pi a},$$

де  $p$  - число пар полюсів двигуна;  $N$  - число активних провідників обмотки якоря;  $a$  - число пар паралельних гілок обмотки якоря.

Напрямок якірнього струму  $I_{я}$ , як і напрямок  $E$ , на схемі включення показано для рухового режиму роботи.

Рівняння механічної характеристики  $\omega = f(M)$ :

$$\omega = \frac{U}{k\Phi} - \frac{MR_{яц}}{k^2\Phi^2} \quad \text{або} \quad \omega = \frac{U}{c} - \frac{MR_{яц}}{c^2},$$

де  $c = k\Phi$  – коефіцієнт, що приймається постійним і не залежним від струму якоря, якщо у двигуна є компенсаційна обмотка або якщо реакцію якоря не враховувати.

При незмінних параметрах  $U$ ,  $\Phi$ ,  $R_{яц}$  рівняння механічної характеристики є рівняння прямої лінії.

Побудувати механічну характеристику, враховуючи її лінійність, можна по двох точках - точці ідеального холостого ходу з координатами ( $M = 0$ ;  $\omega = \omega_0$ ) і точці, що відповідає номінальному режиму роботи ( $M = M_H$ ;  $\omega = \omega_H$ ). На підставі паспортних даних двигуна ( $P_H$ ,  $U_H$ ,  $I_H$ ,  $n_H$ ) можна знайти:

$$\omega = \frac{2\pi n_H}{60}; M_H = \frac{P_H}{\omega_H}; \omega_H = \frac{U_H}{k\Phi_H}.$$

Механічна характеристика приведена на рис. 4.2.

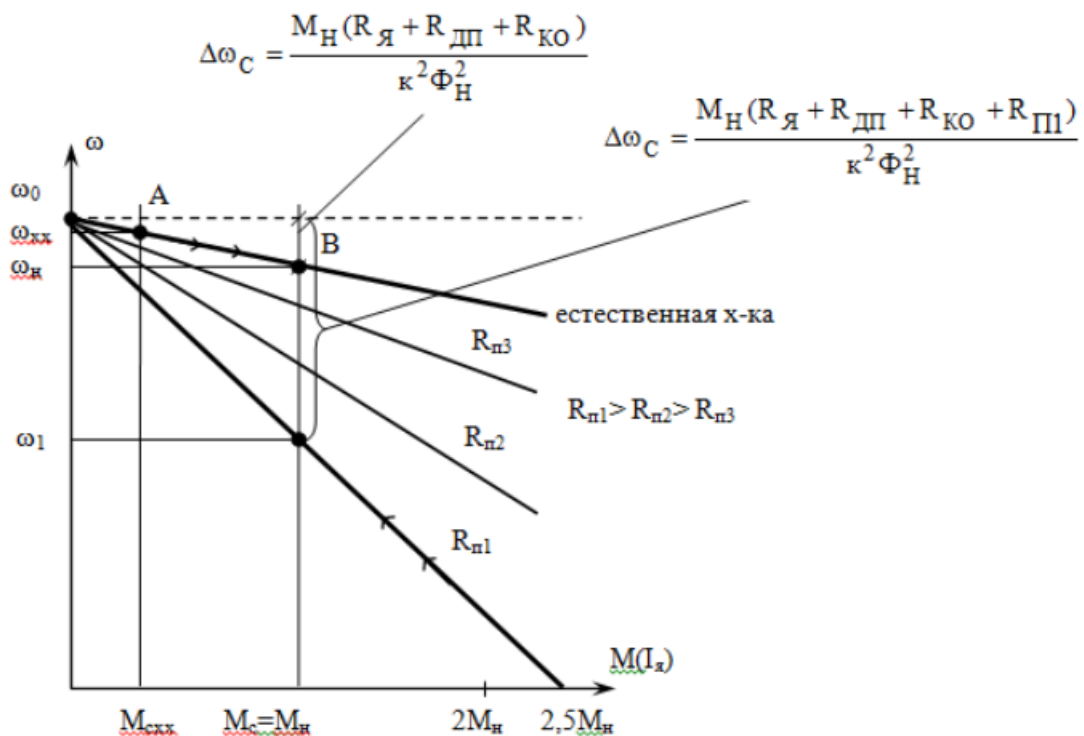


Рис. 4.2 – Механічна характеристика ДПС з незалежним збудженням

### 4.3. Механічні характеристики двигунів постійного струму послідовного збудження

Схема включення двигуна наведена на рис. 4.3. Якір двигуна  $M$  і обмотка збудження  $LM$  включені послідовно і отримують живлення від одного джерела  $U$ . Тому струм якоря  $I_{я}$  є і струмом збудження  $I_{в}$ . Ця обставина визначає єдину відмінність в конструкції двигуна з послідовним збудженням від двигуна з незалежним збудженням: обмотка збудження  $LM$  ДПС з послідовним збудженням виконана провідником того ж перетину, що і обмотка якоря.



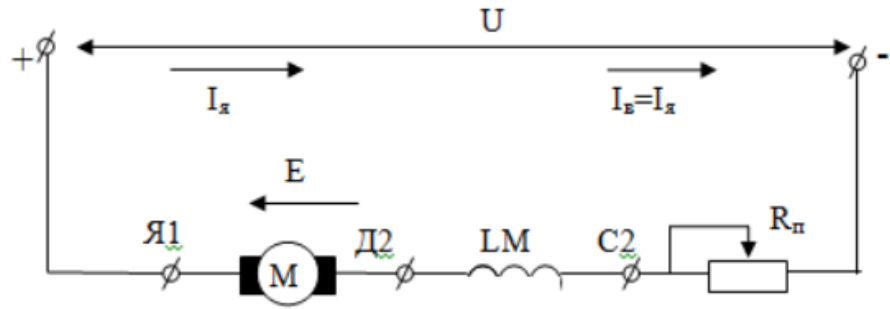


Рис. 4.3 – Схема включення ДПС з послідовним збудженням

Залежність швидкості двигуна  $\omega$  від струму якоря  $I_a$   $\omega = f(I_a)$  називається електромеханічною характеристикою:

$$\omega = \frac{U}{k\Phi} - \frac{I_a R_{яц}}{k\Phi}$$

Рівняння механічної характеристики:

$$\omega = \omega_0 - \Delta\omega_c = \frac{U}{k\Phi} - \frac{I_a R_{яц}}{k\Phi} = \frac{U}{k\alpha I_a} - \frac{I_a R_{яц}}{k\alpha I_a} = \frac{U}{k\alpha \sqrt{\frac{M}{k\alpha}}} - \frac{R_{яц}}{k\alpha} = \frac{A}{\sqrt{M}} - B,$$

де  $A = U/k\alpha$ ;  $B = R_{яц}/(k\alpha)$  – постійні величини.

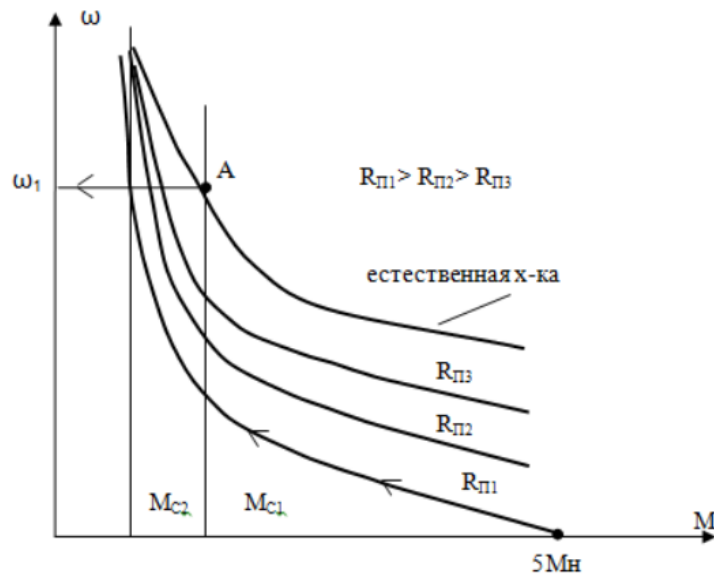


Рис. 4.4 – Механічні характеристики ДПС з послідовним збудженням

#### 4.4. Поняття про перехідні процеси

У процесі роботи електроприводу змінюються режими його роботи, обумовлені пуском і гальмуванням приводного двигуна, змінами навантаження з боку робочої машини, регулюванням частоти обертання і зміною напрямку обертання, коливаннями напруги в мережі живлення і т.і.

Перехід електроприводу з одного усталеного стану, який характеризується визначеними значеннями обертового моменту, частотою обертання, величиною струму, споживаного двигуном, в інший усталений стан з іншими значеннями перерахованих параметрів називається *перехідним процесом*.

Механічна інерція обертових мас електроприводу та електромагнітна інерція обмоток приводного двигуна і керуючих пристроїв уповільнюють тривалість перехідного процесу, що безпосередньо відображається на роботі машин і механізмів, які приводяться в рух.

Найважливіший параметр перехідного процесу — це його тривалість. Тривалість електромагнітних процесів у перехідному режимі роботи електроприводу зазвичай менше тривалості механічних процесів. Тому час протікання перехідного процесу прийнято визначати *електромеханічною постійною часу*  $T_{em}$ , що являє собою час, на протязі якого електропривод, маючи момент інерції  $J$ , розганяється з нерухомого стану до частоти обертання, рівної  $0,633n_0$ , де  $n_0$  — частота обертання ротора (якоря) приводного двигуна при ідеальному холостому ході.

#### 4.5. Рівняння перехідного процесу в електроприводах

Рівняння руху одномасової механічної системи в теорії електроприводу отримало назву рівняння руху електроприводу.

У загальній формі запису воно має вигляд:

$$\pm M \pm M_c = J \frac{d\omega}{dt},$$

де  $d\omega/dt$  - кутове прискорення одномасової системи.

У рівнянні руху «+» ставиться в тому випадку, коли напрям  $M$  або  $M_c$  збігається з напрямком швидкості обертання  $\omega$ , а знак «-», коли вони спрямовані протилежно.

Знак «+» перед  $M$  відповідає руховому режиму роботи електричного приводу: двигун перетворює електричну енергію в механічну, розвиває крутний момент  $M$  і обертає одномасову систему в напрямку крутного моменту.

Знак «-» перед  $M$  відповідає режиму електричного гальмування. Для переведення в цей режим працюючого електропривода схема його включення або її параметри змінюються таким чином, що обертальний момент  $M$  змінюється на протилежний напрямок. Оскільки напрямок обертання зберігається під дією інерційних сил, обертальний момент двигуна починає гальмувати рух одномасової системи. Двигун переходить у генераторний режим роботи. Він забирає запасену в механічній частині приводу механічну енергію, знижуючи тим самим швидкість обертання, та перетворює її в електричну енергію. Електрична енергія або повертається в мережу живлення, або витрачається на нагрів двигуна.

Знак «+» перед  $M_c$  говорить про те, що  $M_c$  сприяє обертанню. Знак «-» говорить про те, що перешкоджає. Всі моменти опору можна розділити на дві категорії: 1 – реактивні  $M_c$ ; 2 – активні або потенційні  $M_c$ .

У першу категорію входять моменти опору, поява яких пов'язана з необхідністю долати тертя. Вони завжди перешкоджають руху електроприводу і змінюють свій знак при зміні напрямку обертання.

У другу категорію входять моменти від сили тяжіння, а також від розтягування, стиснення або скручування пружних тіл. Вони пов'язані зі зміною потенційної енергії окремих елементів кінематичної схеми. Тому вони можуть як перешкоджати, так і сприяти руху, не змінюючи свого знака при зміні напрямку обертання.

#### 4.6. Форми запису рівняння руху електроприводу

На прикладі електроприводу підйомної лебідки можна розглянути всі чотири форми запису рівняння руху електроприводу.

У першому випадку електропривод включений в напрямку підйому вантажу. Двигун працює в руховому режимі. Вантаж, підвішений на гаку, створює момент опору, що перешкоджає обертанню. Тоді рівняння руху буде мати вигляд:

$$+ M - M_c = J \frac{d\omega}{dt},$$

У другому випадку в кінці підйому вантажу двигун переводиться в режим електричного гальмування і його момент, як і момент опору, перешкоджатиме обертанню. Рівняння руху в цьому випадку має вигляд:

$$- M - M_c = J \frac{d\omega}{dt},$$

У третьому випадку електропривод включений в напрямку опускання вантажу, тобто двигун працює в режимі двигуна. Оскільки момент опору, створюваний піднятим вантажем, є активним, то при опусканні вантажу він буде не перешкоджати, а сприяти обертанню.

Рівняння руху має вигляд:

$$+ M + M_c = J \frac{d\omega}{dt},$$

У четвертому випадку в кінці опускання вантажу двигун знову переводиться в режим електричного гальмування, а момент опору продовжує обертати двигун в напрямку спуску. У цьому випадку рівняння руху має вигляд:

$$- M + M_c = J \frac{d\omega}{dt},$$

При прискоренні чи уповільненні електропривод працює в перехідному режимі, вигляд якого повністю визначається законом зміни динамічного моменту  $M_d$ . Останній, будучи функцією обертального моменту  $M$  і моменту опору  $M_c$ , може залежати від швидкості, часу або положення робочого органу машини.

#### 4.7. Час роботи електроприводу в перехідному режимі

Визначення часу роботи електроприводу в перехідному режимі засноване на інтегруванні рівняння руху електроприводу.

Для режиму пуску, коли має місце прискорення приводу, рівняння руху електроприводу має вигляд:

$$+ M - M_c = J \frac{d\omega}{dt},$$

Розділивши змінні в рівнянні, отримаємо:

$$dt = J \frac{d\omega}{M - M_c}$$

Тоді час, необхідний для збільшення швидкості від  $\omega_1$  до  $\omega_2$ ,  $t_{12}$  можна знайти, проінтегрувавши останні рівняння:

$$t_{1,2} = \int_{\omega_1}^{\omega_2} J \frac{d\omega}{M - M_c},$$

Для вирішення цього інтеграла необхідно знати залежності моментів двигуна і механізму від швидкості. Такі залежності  $\omega = f(M)$  і  $\omega = f(M_c)$  називаються механічними характеристиками відповідно двигуна і технологічної машини.

Прийнявши  $M$  і  $M_c$  незалежними від швидкості величинами, отримуємо найпростіший випадок рішення інтеграла. Величина часу розгону  $t_{1,2}$  буде дорівнювати:

$$t_{1,2} = J \frac{\omega_2 - \omega_1}{M - M_c},$$

Для режиму електричного гальмування, коли має місце уповільнення приводу, рівняння руху має вигляд:

$$-M - M_c = J \frac{d\omega}{dt},$$

Зробивши аналогічні розрахунки, отримаємо час гальмування

$$t_{2,1} = J \frac{\omega_2 - \omega_1}{M + M_c},$$

Якщо величини  $M$  і  $M_c$  знаходяться в складній залежності від швидкості, то рівняння руху аналітично не вирішується. Необхідно використовувати наближені методи рішення.

#### **Завдання на самостійне опрацювання та підготовку**

1. Самостійно відновити матеріал по основним поняттям та визначенням;
2. Самостійно опрацювати матеріал з опису : Способи пуску, обмеження пускових струмів і моментів трифазних асинхронних двигунів. Регулювання кутової швидкості асинхронних двигунів.

### **ТЕМА №5. ЕНЕРГЕТИКА ЕЛЕКТРОПРИВОДА**

Мета: ознайомити здобувачів початкового рівня вищої освіти з основними енергетичними показниками електроприводу, а саме: втрати потужності, ККД і коефіцієнт потужності в електроприводах; рівняння нагрівання і охолодження електродвигун; класифікація номінальних режимів роботи електродвигунів; методи визначення потужності.

#### **План лекції**

- 5.1. Втрати потужності, ККД і коефіцієнт потужності в електроприводах;
- 5.2. Рівняння нагрівання і охолодження електродвигуна;
- 5.3. Класифікація номінальних режимів роботи електродвигунів;
- 5.4. Методи визначення потужності.

#### **Хід проведення лекційного заняття**

- I. Організація групи;
- II. Мотивація навчальної діяльності. Оголошення теми й мети;
- III. Викладення та обговорення нового матеріалу.

#### IV. Оголошення завдання на самостійне опрацювання та підготовку.

##### 5.1. Втрати потужності, ККД і коефіцієнт потужності в електроприводах

Втрати потужності в електродвигунах поділяються на постійні та змінні. Вони включають:

- втрати в сталі (втрати в осерді), які залежать від напруги і тому є постійними для електродвигуна, незалежно від його навантаження;
- втрати на тертя (механічні) і вентиляційні втрати. Ці втрати є постійними для заданої швидкості і не залежать від навантаження;
- втрати від струму збудження або струму намагнічування двигуна;
- втрати в міді, відомі як втрати  $I_2R$ , пропорційні квадрату струму навантаження.

Втрати в сталі складаються з втрат на гістерезис, що залежать від фізичних характеристик використовуваної сталі, і втрат на вихрові струми, які визначаються конструкцією і складанням сталевих пластин.

Втрати в сталі впливають на коефіцієнт потужності електродвигуна, оскільки їх виникнення пов'язане зі споживанням реактивного струму.

При низькому навантаженні основну роль грають втрати в сталі, які обумовлюють низькі значення коефіцієнта потужності електродвигуна. Навіть при повному навантаженні асинхронний двигун має порівняно невисокий коефіцієнт потужності індуктивного характеру і становить 0,8-0,9. Щоб звести до мінімуму можливе зниження ККД і коефіцієнта потужності, необхідно, щоб номінальна потужність електродвигуна була по можливості ближче до існуючого навантаження двигуна. Економічність роботи електропривода у будь-якому режимі характеризується коефіцієнтом корисної дії (ККД) – відношенням виконаної механічної роботи до кількості спожитої за цей час електроенергії:

$$\eta_{\text{ц}} = \frac{A_{\text{мех}}}{A_{\text{ен}}} = \frac{\int_0^{T_{\text{ц}}} M_{\text{м}}(t) \omega_{\text{м}}(t) dt}{\int_0^{T_{\text{ц}}} P dt},$$

де  $\eta_{\text{ц}}$  – цикловий ККД електропривода;  $T_{\text{ц}}$  – тривалість робочого циклу, год;  $A_{\text{мех}}$ ,  $A_{\text{ел}}$  – корисна механічна робота і спожита з мережі електрична енергія, Дж;  $M_{\text{м}}$  – момент на валу робочої машини, Н·м;  $\omega$  – кутова швидкість приводного вала робочої машини, с<sup>-1</sup>;  $P$  – потужність, споживана електроприводом з мережі, Вт.

Якщо відомі значення ККД перетворювача електроенергії  $\eta_{\text{п.ел}}$ , двигуна  $\eta_{\text{дв}}$  і механічних передач  $\eta_{\text{мех}}$ , то ККД електропривода:

$$\eta = \eta_{\text{п.ел}} \cdot \eta_{\text{дв}} \cdot \eta_{\text{мех}}.$$

Економічність споживання електроенергії з мережі характеризується коефіцієнтом потужності, який є відношенням активної потужності  $P$  до повної потужності  $S$ :

$$\cos \varphi = \frac{P}{S},$$

Електропривод змінного струму споживає з мережі активну  $P$  і реактивну  $Q$  потужності. Активна потужність витрачається на здійснення електроприводом корисної роботи та покриття втрат в ньому, а реактивна потужність забезпечує створення

електромагнітних полів двигуна і безпосередньо корисної роботи не виробляє. Коефіцієнт потужності електроприводу характеризує його як споживача електроенергії.

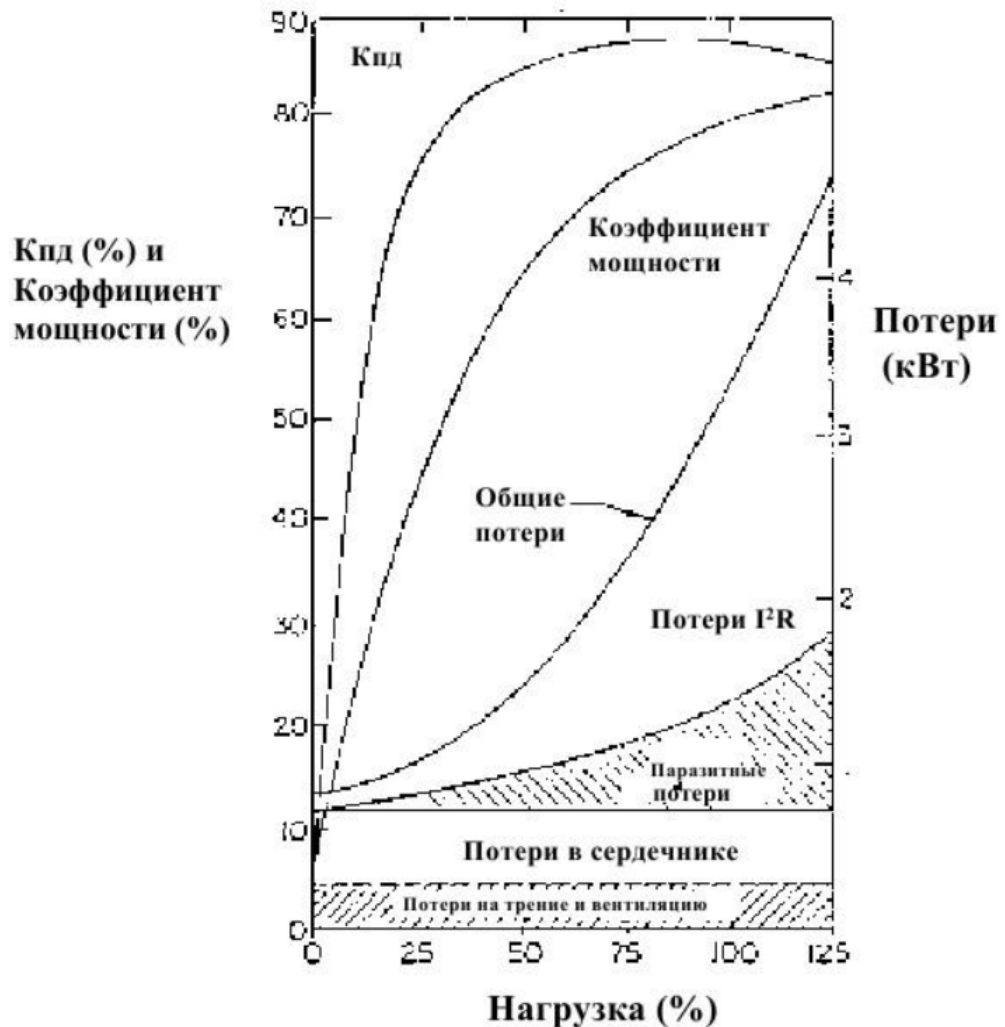


Рис. 5.1 – Втрати потужності в електродвигунах

Кут  $\varphi$  визначає зсув фаз між напругою мережі і струмом електроприводу. Електропривод, споживаючи реактивну потужність, додатково навантажує систему електропостачання, викликаючи додаткові втрати напруги та енергії в її елементах.

Для більшості асинхронних двигунів  $\cos\varphi_n \approx 0,8 \div 0,9$ . Для цих значень  $Q = (0,5 \div 0,75) P$ , тобто асинхронний двигун на кожен кіловат активної потужності споживає з мережі 0,5...0,75 квар реактивної потужності. Чим нижче  $\cos\varphi$ , тим більшу реактивну потужність споживає асинхронний двигун з мережі, завантажуючи її додатковим струмом і викликаючи в ній додаткові втрати.

## 5.2. Рівняння нагрівання і охолодження електродвигуна

Усі види втрат потужності в двигуні перетворюються в теплоту, що частково віддається в навколишнє середовище, а частково йде на нагрівання двигуна. Якщо умовно вважати, що нагрівання відбувається рівномірно по усьому об'єму двигуна, а теплота однаково розсіюється по усій його поверхні, то рівняння теплового балансу:

$$Qdt = G_{\text{дв}}cd\tau + S\lambda\tau dt,$$

де  $Qdt$  - кількість теплоти, яка виділяється у двигуні за час  $dt$ ;  $G_{\text{дв}}cd\tau$  - кількість теплоти, витраченої на нагрівання двигуна;  $G_{\text{дв}}$  - маса двигуна;  $c$  - питома теплоємність, яка визначає кількість теплоти, необхідної для нагрівання 1 кг речовини на  $1^{\circ}\text{C}$ ;  $t$  - перевищення температури двигуна над температурою  $q_1$  навколишнього середовища;  $S\lambda\tau dt$  - кількість теплоти, яка розсіюється з поверхні двигуна в навколишнє середовище;  $S$  - площа поверхні двигуна, з якої розсіюється теплота;  $\lambda$  - коефіцієнт теплового розсіювання, який представляє собою кількість теплоти, яка розсіюється з одиниці поверхні в 1 с при перевищенні температури на  $1^{\circ}\text{C}$ .

В початковий період роботи двигун має температуру, яка практично не відрізняється від навколишнього середовища, тобто  $t > 0$ . В цьому випадку  $S\lambda\tau dt > 0$  і вся теплота, яка виділилася в двигуні, йде на підвищення його температури. В міру підвищення температури двигуна, кількість теплоти, яка розсіюється в навколишнє середовище, збільшується. Коли перевищення температури двигуна над температурою навколишнього середовища досягне

$$t_{\text{уст}} = q_{\text{уст}} - q_1,$$

де  $q_{\text{уст}}$  - установлена температура двигуна, то все тепло, що виділяється в двигуні, буде розсіюватися в навколишнє середовище. При цьому подальше підвищення температури двигуна припиниться,  $dt = 0$  і настає режим теплової рівноваги.

$$Qdt = S\lambda\tau_{\text{уст}}dt,$$

З формули випливає, що  $t_{\text{уст}}$  не залежить від маси двигуна, а визначається кількістю теплоти, виділеної у двигуні за одиницю часу, площею охолодження і коефіцієнтом теплового розсіювання  $\lambda$ .

Залежність перевищення температури двигуна  $t$  над температурою навколишнього середовища від часу  $t$  виражається рівнянням

$$\tau = \tau_{\text{уст}}(1 - e^{-t/T_{\text{н}}}),$$

де  $e = 2,718$  - основа натуральних логарифмів;  $T_{\text{н}}$  - постійна часу нагрівання.

Крива нагрівання (рис. 5.2) показує, що електродвигун досягає сталої температури тільки по закінченню тривалого часу. Провівши дотичну до кривої нагрівання, у її початковій частині одержимо відрізок, рівний у масштабі температур постійної нагрівання  $T_{\text{н}}$ , що являє собою час, за який двигун нагрівається до температури, рівної  $0,632 t_{\text{уст}}$ . Якщо припиниться нагрівання двигуна, наприклад при відключенні двигуна від мережі, то рівняння теплового балансу запишемо у наступному вигляді:

$$-G_{\text{дв}}cdt = S\lambda\tau dt,$$

тобто, випромінювання теплоти з поверхні двигуна відбувається за рахунок накопиченої в ньому теплоти, тому двигун починає охолоджуватися.

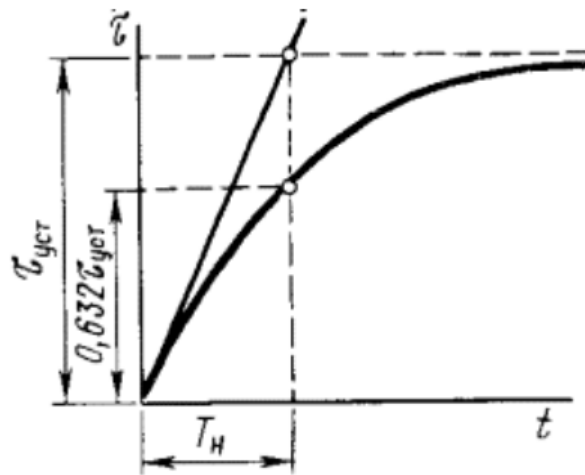


Рис. 5.2 – Графік нагрівання електродвигуна

Зміна температури в процесі охолодження двигуна відбувається відповідно формули:

$$\tau = \tau_{уст} \left( e^{-t/T_n} \right)$$

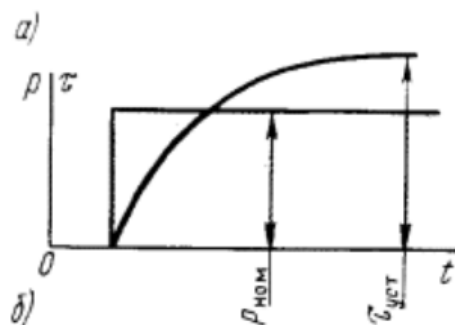
Аналогічні міркування можна провести у випадку охолодження двигуна.

### 5.3. Класифікація номінальних режимів роботи електродвигунів

Існує три основні номінальних режими роботи двигуна (рис. 5.3), що відрізняються характером зміни навантаження:

1) тривалий номінальний режим - режим роботи при незмінному номінальному навантаженні  $P_{ном}$ , що продовжується стільки часу, що температура нагрівання усіх частин машини досягає сталих значень. Навантажувальна діаграма тривалого номінального режиму показана на рис. 5.3, а. Умовне позначення режиму S1;

2) короткочасний номінальний режим — режим роботи, при якому періоди незмінного номінального навантаження чергуються з періодами відключення двигуна. При цьому періоди навантаження двигуна  $t_n$  настільки короткочасні, що температури усіх частин двигуна не досягають сталих значень, а періоди відключення двигуна настільки тривалі, що усі частини двигуна встигають охолонути до температури навколишнього середовища (рис. 5.3,б). Умовне позначення режиму S2;





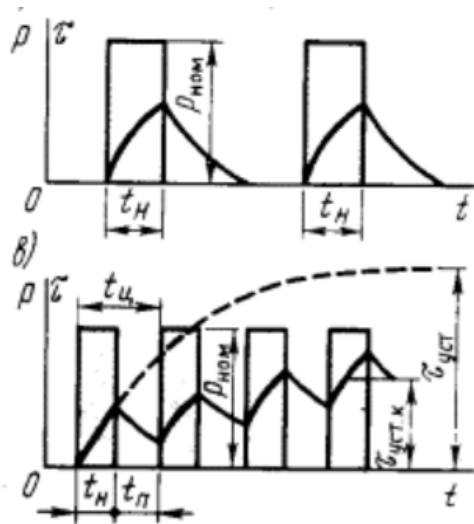


Рис. 5.3 – Навантажувальні діаграми електродвигунів при тривалому (а), короткочасному (б) і повторювально-короткочасному (в) номінальних режимах

3) повторювально-короткочасний номінальний режим — режим роботи, при якому короткочасні періоди номінального навантаження двигуна  $t_H$  чергуються з періодами відключення двигуна (паузами)  $t_п$ , причому за період навантаження перевищення температури усіх частин не встигає досягти сталих значень, а за час паузи частини двигуна не встигають охолонути до температури навколишнього середовища.

Загальний час роботи двигуна в повторювально-короткочасному режимі розділяється на періодично повторювані цикли  $t_ц = t_H + t_п$ . Умовне позначення режиму S3. При повторювально-короткочасному режимі роботи двигуна графік його нагрівання має вигляд пілоподібної кривої (рис. 5.3, в). При досягненні двигуном сталих значень температури відповідному повторювально-короткочасному режиму,  $t_{уст.к}$ , температура перегрівання двигуна продовжує коливатися від  $t_{мін}$  до  $t_{мак}$ , при цьому вона менша установленої температури перегріву при номінальному тривалому режимі роботи  $t_{уст}$ .

Повторювально-короткочасний режим характеризується відносною тривалістю включення, %:

$$ПВ = \frac{t_H}{t_ц} \cdot 100\%;$$

Передбачені номінальні повторювально-короткочасні режими з ПВ 15, 25, 40, 60%. Для тривалого режиму ПВ - 100%. Оскільки при номінальних короткочасному і повторювальнокороткочасному режимах температура перегріву двигуна нижча, ніж при номінальному тривалому режимі, то при переході двигуна з тривалого в повторювально-короткочасний режим роботи корисна потужність двигуна може бути збільшена при ПВ = 60% на 30%, при ПВ = 40% на 60%, при ПВ = 25% у два рази, при ПВ = 15% у 2,6 рази.

#### 5.4. Методи визначення потужності

Попередній вибір потужності двигуна в електроприводі виконується або за допомогою інформації про встановлені потужності на аналогічних механізмах, або за заданою або розрахованою навантажувальною діаграмою, сталою швидкістю і коефіцієнтом динамічності, що враховує нагрів двигуна в пуско-гальмівних режимах.

Номінальна потужність ( $P_H$ ) двигуна при попередньому виборі визначається за

співвідношенням:

$$P_n = K_D \cdot M_{CP} \cdot \omega_n \cdot 10^{-3},$$

де  $K_D$  - коефіцієнт динамічності;  $M_{CP}$  - середній статичний момент за цикл роботи електропривода, який визначається по навантажувальній діаграмі:

$$M_{CP} = \frac{\sum_0^{t_u} M_i t_i}{t_u},$$

Перевірка обраної потужності двигуна по нагріванню для всіх режимів, окрім режиму S1, проводиться методом послідовних наближень, при виконанні яких треба підібрати потужність двигуна і його завантаження, що забезпечує використання вибраного обладнання по нагріванню на 85-90%.

### **Завдання на самостійне опрацювання та підготовку**

1. Самостійно відновити матеріал по основним поняттям та визначенням;
2. Самостійно опрацювати матеріал з опису : Механічні перехідні процеси в електроприводі з лінійною механічною характеристикою двигуна при незмінних статичному моменті і моменті інерції.

## **ТЕМА №6. СИСТЕМИ КЕРУВАННЯ ЕЛЕКТРОПРОВОДАМИ**

Мета: ознайомити здобувачів початкового рівня вищої освіти з функціями систем автоматичного керування електроприводом та правила виконання електричних схем.

### **План лекції**

- 6.1. Функції систем автоматичного керування електроприводом;
- 6.2. Правила виконання електричних схем;
- 6.3. Типові вузли і блоківки у схемах керування електроприводами.

### **Хід проведення лекційного заняття**

- I. Організація групи;
- II. Мотивація навчальної діяльності. Оголошення теми й мети;
- III. Викладення та обговорення нового матеріалу.
- IV. Оголошення завдання на самостійне опрацювання та підготовку.

### **6.1. Функції систем автоматичного керування електроприводом**

Керування – це сукупність дій на керуючі пристрої для забезпечення пуску, підтримання режиму роботи електропривода у відповідності з вимогами технологічного процесу і його зупинки. Залежно від участі в цих діях людини (оператора) розрізняють неавтоматичне (ручне), автоматизоване та автоматичне керування.

Неавтоматичним (ручним) називають керування, при якому оператор приймає безпосередню участь у всіх операціях із керування електроприводом (наприклад, комутація електричних кіл за допомогою апаратів ручного керування). Використання цих апаратів пов'язане з додатковими затратами часу на керування, що знижує продуктивність

механізму, особливо при частих пусках або при регулюванні швидкості. Крім того, застосування апаратів ручного керування виключає можливість дистанційного керування. В деяких потужних електроприводах ручне керування вимагає значних зусиль від людини для перемикання апаратів.

Автоматизованим називають керування, при якому оператор бере лише участь у створенні початкових імпульсів на вмикання, вимикання та зміну режиму роботи обладнання, а всі інші операції з керування здійснюються автоматично.

Автоматичним вважають таке керування, при якому основні операції здійснюються без участі оператора. Автоматичне керування електроприводами дає можливість підвищити продуктивність робочих машин, підвищити якість продукції, зменшити питомі витрати енергії на виробництво продукції, підвищити продуктивність праці та поліпшити умови роботи обслуговуючого персоналу, забезпечити оптимальний режим роботи обладнання.

У системах автоматичного керування електроприводами використовуються: релейно-контактні апарати, серед яких основними є реле, контактори, шляхові перемикачі тощо; підсилювачі, перетворювальні пристрої і датчики – електромашинні, електромагнітні, напівпровідникові тощо; безконтактні логічні елементи, мікропроцесори та мікроЕОМ.

Під системою автоматичного керування електроприводом розуміють сукупність механічних, електромеханічних, напівпровідникових та інших елементів, за допомогою яких здійснюється керування. Системи автоматичного керування бувають розімкненими і замкненими.

Розімкненою називають таку систему автоматичного керування, при якій із зміною збурення (наприклад, навантаження на валу двигуна) змінюється раніше заданий режим роботи електропривода і не відновлюється без втручання оператора.

Замкненою називають таку систему автоматичного керування, при якій із зміною збурюючої дії заданий режим роботи електропривода не змінюється. Заданий режим підтримується керуючими діями системи керування, що створюються засобами зворотного зв'язку.

У сільськогосподарському виробництві використовуються в основному розімкнені системи автоматичного керування.

Керування у функції часу полягає в тому, що перемикання електричних кіл, зміна опору пускових і гальмівних резисторів або напруги здійснюється в певні, наперед задані проміжки часу. У схемах керування застосовують реле часу, які здійснюють вмикання відповідного контактора.

Прикладом автоматичного керування електроприводом у функції часу є керування пуском трифазного асинхронного двигуна з перемиканням обмоток із «зірки» на «трикутник». Двигун спочатку вмикається в мережу з обмотками, з'єднаними «зіркою», а через певний час за командою реле часу система керування перемикає обмотки на «трикутник». При цьому система не контролює ні величини пускового струму, ні швидкості ротора на момент перемикання.

Керування у функції струму здійснюється за допомогою реле струму, які вмикають контактори при зниженні струму двигуна до заданого значення.

Керування у функції швидкості здійснюється за допомогою реле швидкості, або реле, які реагують на зміну інших величин, які перебувають у прямій залежності від швидкості – ЕРС у двигунів постійного струму або частоти струму ротора у асинхронних

двигунів. Для вимірювання ЕРС реле напруги приєднують до затискачів якоря, а реле частоти струму вмикають у коло ротора.

Керування електроприводом у функції шляху полягає у тому, що при досягненні приводним механізмом заданого положення шляховий вимикач перемикається, внаслідок чого приводний механізм або зупиняється, або реверсується.

Керування у функції регульованого параметра полягає в тому, що датчики (один або декілька) системи автоматичного керування вимірюють регульований параметр і при його відхиленні від заданого значення видають сигнал на зміну режиму роботи привода. Наприклад, у системі автоматичного керування вентиляційною установкою у функції температури датчик вимірює температуру повітря у тваринницькому приміщенні і при відхиленні її від заданого значення регулятор видає команди на зміну швидкості обертання двигунів вентиляторів.

Будь-яка система автоматичного керування (САК) електроприводом виконує кілька функцій, які залежать від прийнятого технологічного процесу та вибраної системи електропривода. При цьому технологічний процес приймається за основу при виборі САК.

У сільському господарстві системи автоматичного керування електроприводом найчастіше виконують такі функції.

1. Пуск електродвигуна та його зупинку. Цю функцію виконують всі без винятку САК з тією різницею, що це може бути прямий пуск, перемиканням обмоток статора із «зірки» на «трикутник», із введенням опорів у коло ротора чи статора, пуск при зниженій напрузі, пуск у два ступені.

2. Регулювання швидкості електропривода зміною підведеної напруги, перемиканням числа пар полюсів, введенням опору в коло ротора, зміною частоти струму тощо.

3. Реверсування з витримкою часу або без неї, з електричним гальмуванням або без нього.

4. Електричне гальмування електропривода: противмиканням, динамічне, рекуперативне.

5. Захист електроприводів та приводних механізмів від коротких замикань, перевантажень та інших аномальних режимів.

6. Сигналізація стану системи окремими сигнальними лампами або мнемосхемами технологічного процесу.

7. Здійснення відповідної послідовності пуску та зупинки електропривода та блокувань: пуск і зупинка електроприводів потокових ліній, блокування неправильних дій оператора.

8. Автоматичне підтримання швидкості або її зміна за відповідним законом.

9. Стабілізація контрольованого параметра на заданому рівні.

10. Синхронізація руху окремих елементів механізму чи агрегату.

11. Слідкування за сигналами, які подаються на вхід системи від датчиків, та їх відпрацювання.

Чим більше функцій виконує САК, тим ширше зона її застосування. Одночасно зростає складність схеми керування.

## **6.2. Правила виконання електричних схем**

Залежно від основного призначення розрізняють схеми структурні, функціональні, принципальні, з'єднань, підключень, загальні, розміщення та об'єднані. В електроприводах найчастіше використовують схеми структурні, функціональні, принципальні та з'єднань.

Структурні схеми визначають основні функціональні частини електропривода, їх зв'язок між собою та призначення. Ці схеми передують розробці інших схем і використовуються для загального ознайомлення з електроприводом. Функціональні частини електропривода зображують у вигляді прямокутників, з'єднаних лініями зв'язку із стрілками, які показують напрям ходу процесу. Назву елементів вказують всередині прямокутників. У регульованих електроприводах для їх аналізу і синтезу усередині прямокутників записують передаточні функції елементів.

Функціональні схеми пояснюють процеси, які протікають в окремих функціональних елементах електропривода або установки в цілому. Використовуються ці схеми для вивчення принципу роботи, а також при налагодженні, контролі та ремонті. Функціональні елементи електропривода на цих схемах зображують у вигляді умовних графічних позначень або прямокутників. Вони повинні мати найменування, позначення або тип. Зв'язки між елементами та напрям передавання дії вказують стрілками.

При проектуванні електроприводів використовують також функціональні схеми робочих машин та агрегатів, на яких зображують технологічні зв'язки між окремими робочими органами або машинами, що необхідно для розробки електричної схеми керування електроприводом. Принципальними називають схеми керування, які визначають повний склад елементів електроустановок і зв'язки між ними і дають уявлення про принцип роботи установки. Використовуються ці схеми для вивчення принципу дії установки, а також при монтажу, ремонті, налагодженні та контролі. Розробку принципальної схеми починають з визначення її функцій, потім схему креслять і описують її роботу. Принципальні схеми креслять без дотримання масштабу, як правило, рознесеним способом, коли елементи одного пристрою можуть бути розміщені в різних колах схеми відповідно до їх електричних з'єднань. Фактичне розміщення окремих частин електроустановки не враховують або враховують наближено. Всі елементи схеми зображують у вигляді умовних графічних позначень згідно з вимогами Єдиної системи конструкторської документації. Складні пристрої, які мають свою внутрішню схему (регулятори, перетворювачі напруги, частоти струму, програмні пристрої тощо), дозволяється зображувати у вигляді прямокутника з елементами зовнішніх приєднань. Елементи зображують у вимкненому стані.

При рознесеному способі зображення умовні позначення елементів або їх складових частин, які входять до одного кола, зображують послідовно один за одним на одній прямій, а окремі кола – одне під одним. Лінії зв'язку між ними повинні бути найкоротшими і мати мінімальну кількість перетинів. Кожний елемент принципальної електричної схеми повинен мати буквено-цифрове умовне позначення, яке складається з латинських букв і цифр однакової висоти (наприклад, автоматичний вимикач *QF1*; електромагнітний пускач *KM1*, *KM2*, *KM3*; теплові реле *KK1*, *KK2*, *KK3* тощо).

Позиційні позначення на схемі проставляють поряд з умовним графічним позначенням з правого боку або над ним. На принципальних електричних схемах допускається зображувати механічні зв'язки між елементами пунктирними або подвійними лініями. Принципальні схеми керування електроприводами складаються з

силових (головних) кіл (ліва частина) та кіл керування (права частина). До силових кіл відносять кола якоря, статора і ротора електродвигунів та силові кола перетворювачів електричної енергії. В колах керування знаходяться котушки контакторів і реле, допоміжні контакти контакторів і апаратів захисту, кнопки керування, пристрої сигналізації.

Для зручності читання схеми та розробки за нею схеми з'єднань ділянки кіл принципіальної електричної схеми маркують. Маркування здійснюють від вводу джерела живлення, де вказують напругу мережі постійного струму або напругу і частоту струму мережі змінного струму. Вхідні ділянки силового кола трифазного змінного струму маркують  $L1, L2, L3, N$ ; однофазного змінного струму –  $L1, N; L2, N; L3, N$ ; постійного струму –  $L+, L-$ .

Ділянки електричного кола, розділені контактами апаратів, котушками реле, контакторів, обмотками машин, резисторами та іншими елементами повинні мати різне маркування ( $L1.1, L2.1, L3.1; L1.2, L2.1, L3.1$  і т.д.), а ділянки кола, що проходять через рознімні, розбірні або нерозбірні контактні з'єднання – однакове маркування.

Послідовність маркування повинна бути у напрямку від джерела живлення до споживача, а ділянки кола, що розгалужуються, маркують зверху вниз у напрямку зліва направо. Маркування проставляють біля кінців або в середині ділянки кола при вертикальному зображенні кола – зліва, при горизонтальному – над ним. Кола керування, захисту та сигналізації маркують послідовними арабськими цифрами зліва-направо, зверху-вниз.

Дані про елементи схеми повинні бути записані в таблиці переліку елементів, яка розміщується над основним надписом графічної частини або на окремому аркуші. Елементи схеми записують у алфавітному порядку їхніх умовних позначень.

Приклад виконання принципіальної електричної схеми керування електроприводом показаний на рис. 6.1.

Схемою з'єднань називають схему, на якій показані з'єднання всіх складових частин електроустановки, а також проводи, кабелі і жгути, якими здійснюються ці з'єднання, та місця їх приєднання і вводу.

Схема з'єднань складається на основі принципіальної електричної схеми і повинна бути узгоджена з нею.

Апарати і прилади на схемі з'єднань зображують у вигляді прямокутників або фігур, що зовнішніми обрисами нагадують відповідний апарат, а їх елементи – у вигляді умовних графічних позначень чи прямокутників. Розміщення пристроїв повинно відповідати дійсному розміщенню їх у шафі керування. Масштаби не витримуються. Біля графічних позначень треба вказувати позиційні позначення елементів відповідно до принципіальної схеми.

Проводи, які ідуть в одному напрямку, допускається зливати в одну лінію, а при підході до апарата кожний провід треба зображати окремою лінією. Місце приєднання до апарата позначають кружечком з номером.

Номери проводів проставляють біля обох кінців їх зображень. Допускається біля обох кінців ліній вказувати адресу з'єднань.

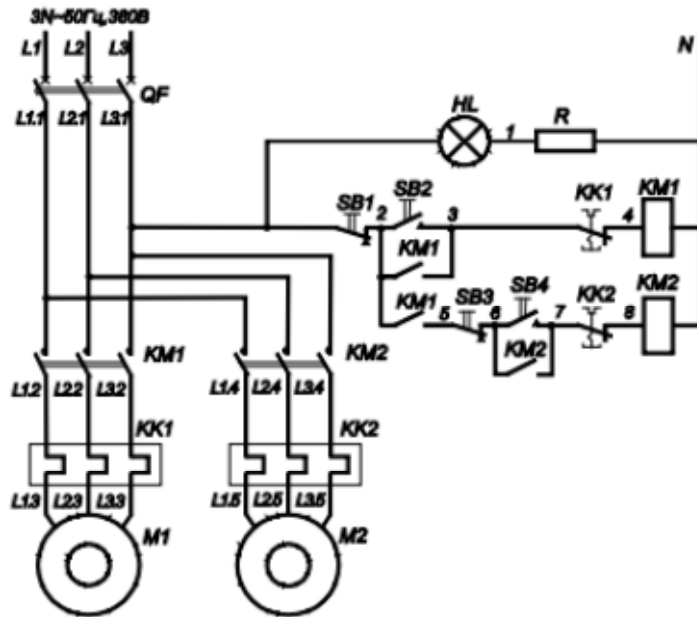


Рис 6.1 – Принципіальна електрична схема керування гноєприбиральним транспортом ТСН-3Б

Приклад виконання схеми з'єднань показаний на рис. 6.2.

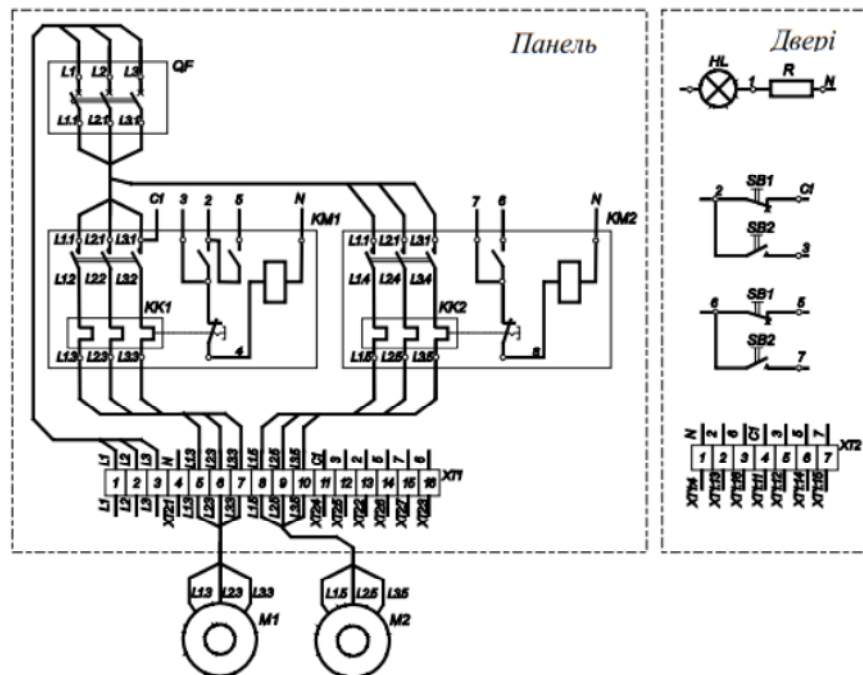


Рис 6.2 – Схема з'єднання станції керування гноєприбиральним транспортом ШАП 5901Ж-03А

### 6.3. Типові вузли і блоківки у схемах керування електроприводами

Типові вузли схем керування електроприводами показані на рис. 6.3. При короткочасному вмиканні двигуна (поштовхом) натискають на кнопку *SB1*, при цьому спрацьовує пускач *KM* (рис. 6.3, а). При перевантаженні двигуна спрацьовує теплове реле *KK*, контакт якого розмикається у колі котушки пускача *KM* (рис. 6.3, б). Світлову сигналізацію про вмикання пускача, подачу напруги на схему, та вмикання двигуна

забезпечують схеми, показані відповідно на рис. 6.3, в, з, д.

Для запобігання виходу з ладу електрообладнання та підвищення надійності його роботи застосовують різні види захисту та захисні блокування.

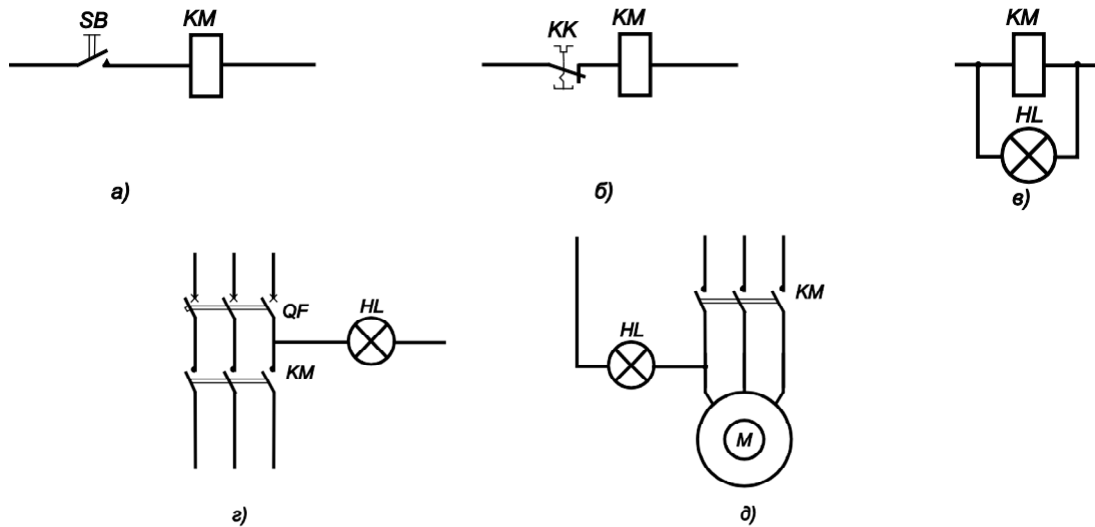


Рис. 6.3 – Типові схеми керування електродвигунами: а – поштовх; б – електромагнітний пускач з тепловим реле; в – сигнал «Пускач увімкнено»; г – світлова сигналізація про подачу напруги на схему; д – сигнал «Двигун увімкнено»

Захист від коротких замикань (максимальний струмовий захист) забезпечується: у силових колах плавкими запобіжниками  $FU$  (рис. 6.4, а, б) та автоматичними вимикачами  $QF$  з електромагнітними розчіплювачами (рис. 6.4, в, г), у колах керування – максимальнo-струмовим захистом силового кола (при потужності двигуна до 10 кВт) або власними плавкими запобіжниками чи автоматичними вимикачами.

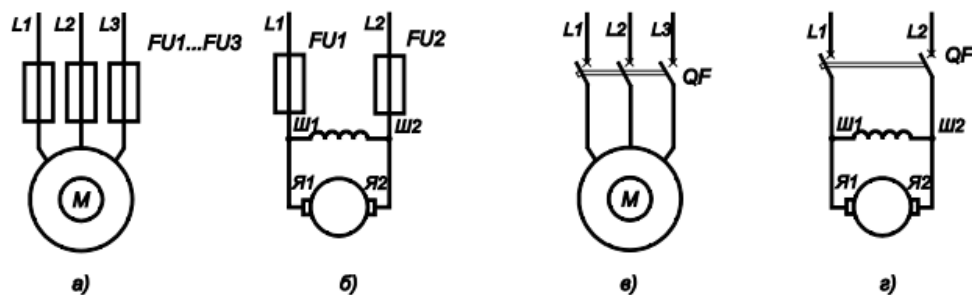


Рис. 6.4 – Вузли схем захисту електродвигунів від коротких замикань: а, б – плавкими запобіжниками; в, г – автоматичними вимикачами

Захист двигунів від перевантажень забезпечується при тривалому режимі роботи – тепловими реле або тепловими розчіплювачами автоматичних вимикачів (рис. 6.5, а), при повторно-короткочасному режимі роботи – за допомогою максимальних струмових реле  $KA$  (рис. 6.5, б). Реле часу вводять у схему для запобігання вимикання двигуна реле струму  $KA$  при пуску. На час пуску контакт реле часу  $KT$  шунтує розмикаючі контакти  $KA1, KA2, KA3$ .



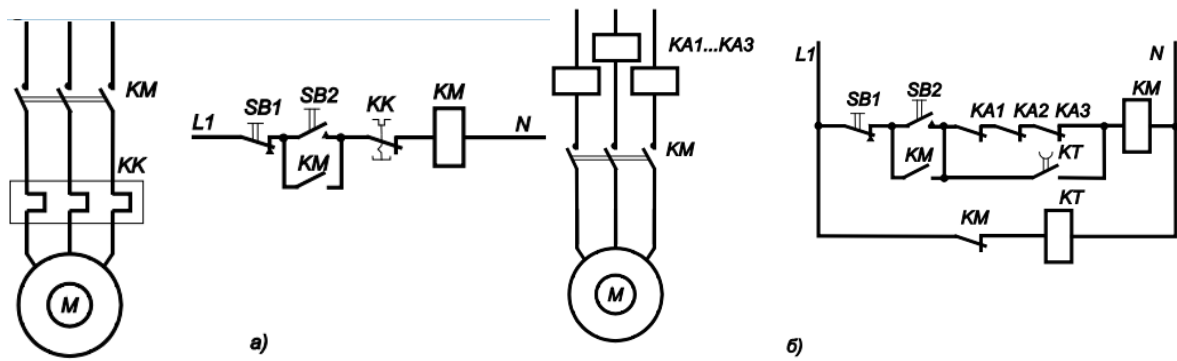


Рис. 6.5 – Вузли схем захисту електродвигунів від перевантажень: *а* – тепловими реле *б* – реле струму

Захист від обриву поля, тобто при обриві кола збудження двигуна постійного струму або синхронного двигуна, здійснюється реле мінімального струму (рис. 6.6). Котушка реле *КА* вмикається послідовно із обмоткою збудження, і реле замикає свій контакт при струмі, близькому до номінального. При зникненні або недопустимому зниженні струму збудження двигуна контакт реле струму *КА* в колі котушки пускача *КМ* розмикається, внаслідок чого вимикається двигун.

Захист від перенапруги на обмотці збудження двигуна постійного струму після її вимкнення здійснюється розрядним опором *R<sub>p</sub>*, величина якого приймається: при напрузі 220 В – (6–8) *R<sub>ОЗД</sub>*, при напрузі 110 В – (3–5) *R<sub>ОЗД</sub>*. Для запобігання втрат енергії в розрядному опорі при роботі двигуна у коло *R<sub>p</sub>* вмикається діод *VD* (рис. 6.6).

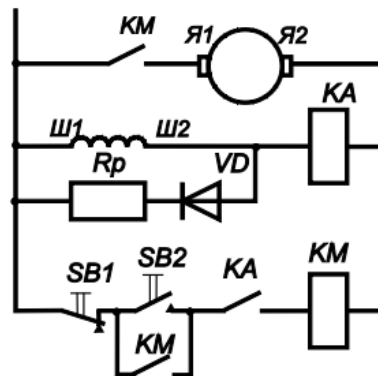


Рис. 6.6 – Вузли схем захисту електродвигуна постійного струму від обриву кола збудження і перенапруги на обмотці збудження

Захисні електричні блокування підвищують надійність роботи електроприводів, запобігають хибним і аварійним увімкненням апаратів, пристроїв і робочих машин. В схемах автоматичного керування електроприводами найчастіше застосовують блокування, що забезпечують задану послідовність вмикання і вимикання кількох двигунів, не допускають одночасного вмикання контакторів або інших апаратів, запобігають мимовільному пуску двигунів (нульова блокування), нещасним випадкам і аваріям, які можуть виникнути внаслідок неправильних дій обслуговуючого персоналу.

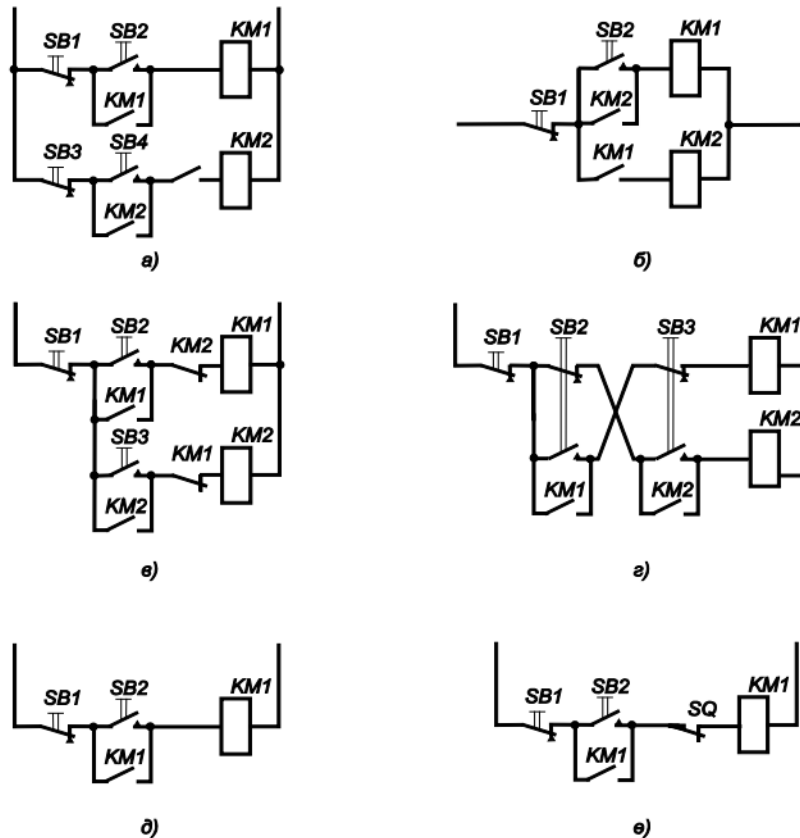


Рис. 6.7 – Блокувальні зв’язки у схемах керування електроприводами: *a* – пуск у заданій послідовності; *б* – одночасний пуск; *в,г* – одночасна робота двигунів неможлива; *д* – мимовільний пуск двигуна неможливий; *е* – обмеження руху робочої машини

Для забезпечення заданої послідовності вмикання електродвигунів *M1* і *M2* (рис. 6.7) послідовно з котушкою електромагнітного контактора *KM2*, який забезпечує керування електродвигуном *M2*, вмикають допоміжний замикаючий контакт контактора *KM1*, призначеного для керування двигуном *M1* (рис. 6.7, *a*). При цьому вмикання двигуна *M2* буде можливим лише після замикання допоміжного контакту контактора *KM1*, тобто після вмикання двигуна *M1*.

Для забезпечення одночасного вмикання двигунів *M1* і *M2* допоміжний замикаючий контакт контактора *KM1*, призначеного для керування двигуном *M1*, вмикають послідовно з котушкою контактора *KM2*, призначеного для керування двигуном *M2*, а допоміжний замикаючий контакт контактора *KM2* – паралельно кнопці «Пуск» *SB2* (рис. 6.7, *б*). При натисканні на кнопку *SB2* спрацьовує контактор *KM1* і своїми головними контактами вмикає двигун *M1* в мережу, а допоміжним замикаючим контактом подає живлення на котушку контактора *KM2*. Контактор *KM2* спрацьовує і вмикає двигун *KM2*. Якщо контактор *KM2* з певних причин не спрацює, при відпусканні кнопки *SB2* зупиниться і двигун *M1*. Одночасне вимикання двох двигунів здійснюється кнопкою «Стоп» *SB1*.

Щоб не допустити одночасного вмикання контакторів *KM1* і *KM2* (рис. 6.7, *в*), необхідно послідовно з котушкою контактора *KM1* увімкнути допоміжний розмикаючий контакт контактора *KM2*, а послідовно з котушкою контактора *KM2* – допоміжний розмикаючий контакт контактора *KM1*.

При цьому, якщо один з контакторів спрацює, розмикається його допоміжний контакт у колі котушки іншого контактора і вмикання цього контактора стає неможливим.

Таку блокіровку здійснюють також за допомогою здвоєних кнопок (рис. 6.7, з), що мають розмикаючий і замикаючий контакти. При натисканні на кнопку *SB2* її замикаючий контакт замикає коло котушки контактора *KM1*, а розмикаючий – розмикає коло котушки контактора *KM2*. Якщо ж натиснути на кнопку *SB3*, то, навпаки, замкнеться коло котушки контактора *KM2* і розімкнеться коло котушки контактора *KM1*. При одночасному натисканні на обидві кнопки розмикаються кола котушок обох контакторів, і вони вимикаються. Одночасна робота двох контакторів неможлива.

Для забезпечення нульової блокіровки, тобто захисту від мимовільного вмикання електродвигуна при появі зниклої апаратури, замикаючий допоміжний контакт контактора вмикають паралельно кнопці «Пуск» (рис. 6.7, д). При нормальній напрузі мережі натисканням на кнопку «Пуск» *SB2* спрацьовує контактор *KM1*, який головними контактами вмикає двигун, а допоміжним шунтує кнопку «Пуск». Після цього кнопка *SB2* повертається у вихідне положення, а живлення котушки контактора відбувається через його допоміжний контакт. При значному зниженні або зникненні напруги контактор повертається у вихідне положення, вимикаючи головними контактами двигун, і розмикає допоміжний контакт, увімкнений паралельно кнопці «Пуск». Після відновлення напруги запустити двигун можна лише натиснувши на кнопку «Пуск» *SB2*.

Обмеження переміщення робочого органу або машини в цілому у просторі здійснюється за допомогою кінцевого вимикача *SQ*, увімкненого у коло котушки контактора *KM1* (рис. 6.7, е). При спрацюванні кінцевого вимикача *SQ* розмикається коло котушки контактора *KM*, який вимикає двигун.

#### **Завдання на самостійне опрацювання та підготовку**

1. Самостійно відновити матеріал по основним поняттям та визначенням;
2. Самостійно опрацювати матеріал з опису: Шляхи енергозбереження в електроприводі.

### **ТЕМА №7. ТИПОВІ СХЕМИ АВТОМАТИЗОВАНОГО КЕРУВАННЯ ДВИГУНАМИ ПОСТІЙНОГО ТА ЗМІННОГО СТРУМУ**

Мета: ознайомити здобувачів початкового рівня вищої освіти з описом типових схем автоматизованого керування двигунами постійного та змінного струму та схеми керування електроприводами на безконтактних логічних елементах.

#### **План лекції**

- 7.1. Типові схеми автоматизованого керування двигунами змінного струму;
- 7.2. Типові схеми автоматизованого керування двигунами постійного струму.

#### **Хід проведення лекційного заняття**

- I. Організація групи;
- II. Мотивація навчальної діяльності. Оголошення теми й мети;
- III. Викладення та обговорення нового матеріалу.
- IV. Оголошення завдання на самостійне опрацювання та підготовку.

## 7.1. Типові схеми автоматизованого керування двигунами змінного струму

Асинхронні електродвигуни з короткозамкненим ротором невеликої потужності (до 5,5 кВт), як правило, запускаються безпосереднім вмиканням в електричну мережу на номінальну напругу (прямий пуск). Схема нереверсивного керування електродвигуном з нульовою блокуванням за допомогою електромагнітного пускача наведена на рис. 7.1. При натисканні на кнопку *SB2* «Пуск» замикається коло котушки пускача *KM*, пускач спрацьовує і головними контактами вмикає двигун у мережу. Замикаючий допоміжний контакт шунтує кнопку *SB2*, і при її відпусканні котушка пускача залишиться увімкненою через цей контакт. Вимикання двигуна відбувається при натисканні на кнопку *SB1* «Стоп» або при спрацюванні теплового реле *KK*. В обох випадках розмикається коло живлення котушки пускача *KM*, він повертається у вихідне положення і вимикає двигун з мережі. Захист силових кіл від коротких замикань здійснює автоматичний вимикач *QF1*, кіл керування – *QF2*.

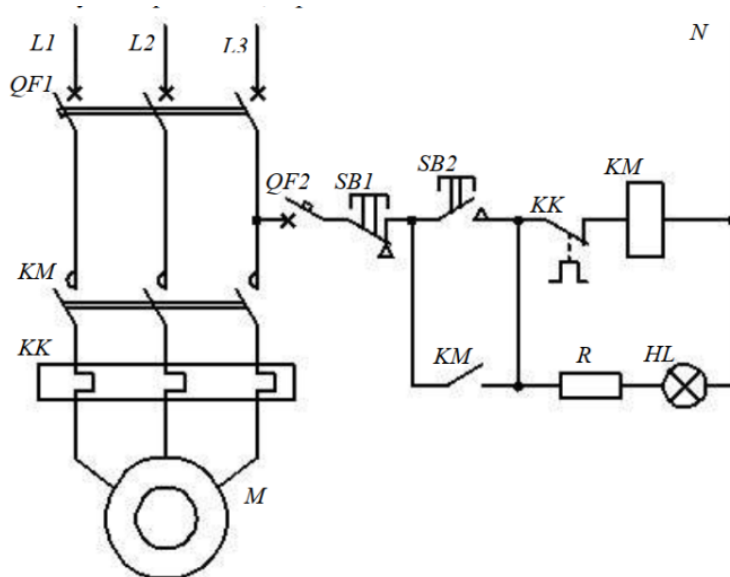


Рис. 7.1 – Схема нереверсивного керування асинхронним електродвигуном

При необхідності керування двигуном з кількох місць всі замикаючі контакти командних апаратів потрібно увімкнути паралельно, а розмикаючі – послідовно.

Для реверсивного керування асинхронним двигуном необхідно два нереверсивні пускачі або один спеціальний реверсивний, що має два контактори. Реверсивне керування здійснюється за схемою, зображеною на рис. 7.2.

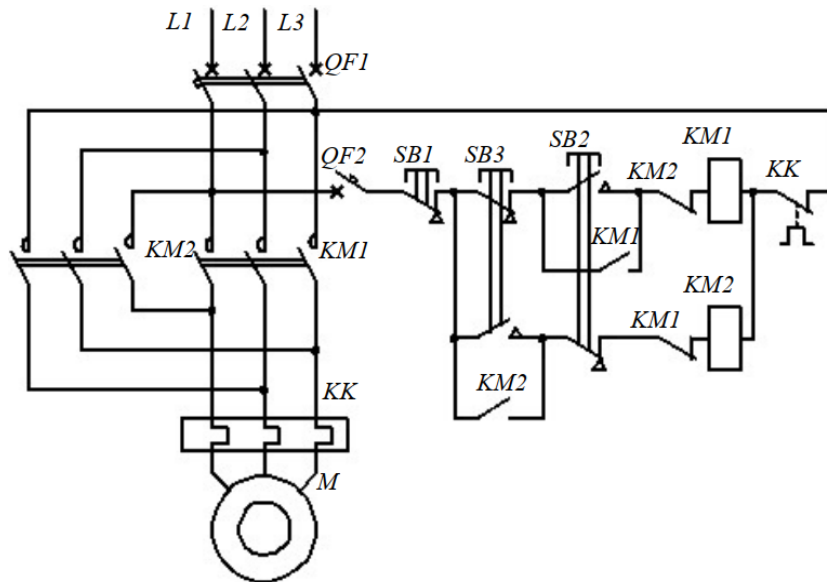


Рис. 7.2 – Схема реверсивного керування асинхронним електродвигуном

Для пуску двигуна «Вперед» натискають на кнопку *SB2*. При цьому спрацьовує контактор *KM1*. Зупинку двигуна здійснюють натисканням на кнопку *SB1* «Стоп». Для пуску «Назад» натискають на кнопку *SB3*, яка вмикає контактор *KM2*. Схема передбачає можливість реверсування двигуна «з ходу». У цьому випадку, коли двигун, наприклад, обертається «Назад», натискають на кнопку *SB2*. При цьому вимикається контактор *KM2* і вмикається контактор *KM1*. Двигун гальмується гальмуванням противмиканням, а потім починає обертатися в заданому напрямку.

Схемою реверсивного керування обов'язково передбачають блокування, що виключають одночасне вмикання обох контакторів *KM1* і *KM2* (для запобігання короткому замиканню на головних контактах). Для цього керування контакторами здійснюється кнопками *SB2* і *SB3*, що мають як замикаючі, так і розмикаючі контакти (рис. 7.2). За відсутності механічної блокування у коло живлення котушок пускачів вмикають «чужі» розмикаючі допоміжні контакти. Коли спрацює один контактор, то своїм розмикаючим допоміжним контактом розірве коло живлення котушки іншого контактора.

Якщо необхідно здійснити автоматичне реверсування механізмів у функції шляху, то у схему, зображену на рис. 7.2, вмикають контакти кінцевих перемикачів *SQ1* і *SQ2* (рис. 7.3). Для пуску двигуна «Вперед» натискають кнопку *SB2*. Контактор *KM1* вмикає двигун, і механізм рухається до місця встановлення кінцевого вимикача *SQ1*. При підході механізму до нього розмикаючий контакт *SQ1.1* розмикає коло котушки *KM1*, а замикаючий контакт *SQ1.2* замикається у колі котушки *KM2*. Контактор *KM1* вимикається, і вмикається контактор *KM2*. Двигун реверсується, і механізм починає рухатися у зворотному напрямку до місця встановлення кінцевого перемикача *SQ2*. При цьому контакти *SQ1* повертаються у вихідний стан і готують коло керування до повторного реверсу. При підході механізму до іншого крайнього положення аналогічно перемикаються контакти перемикача *SQ2*.

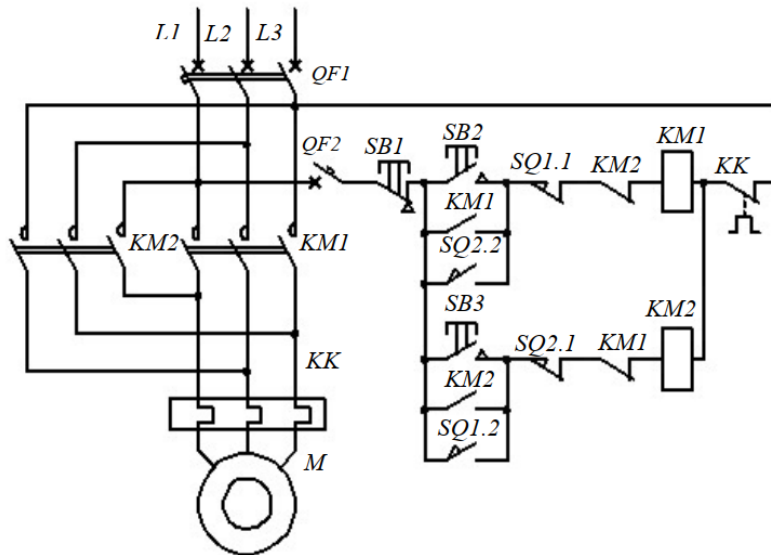


Рис. 7.3 – Схема керування асинхронним електродвигуном у функції шляху

Трифазні асинхронні електродвигуни з короткозамкненим ротором мають великі кратності пускового струму. При пуску потужних двигунів ( $P_N \geq 11$  кВт) обмежують пусковий струм вмиканням у коло статора опору (активного чи реактивного) або зменшенням підведеної до статора напруги. Індуктивні опори (пускові реактори) та пускові автотрансформатори застосовують для порівняно потужних двигунів ( $P_N = 75 - 100$  кВт). Для двигунів меншої потужності використовують активні опори.

Схема обмеження пускового струму і моменту з симетричними опорами в колі статора зображена на рис. 7.4.

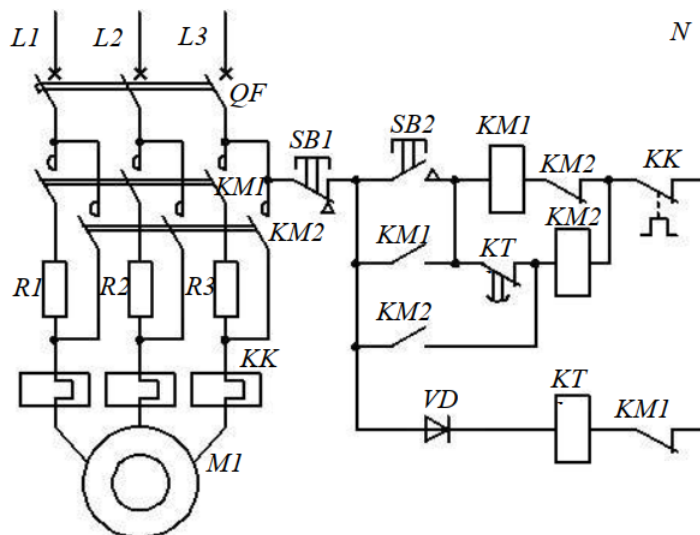


Рис. 7.4 – Схема керування трифазним асинхронним електродвигуном з короткозамкненим ротором з обмеженням пускового струму і моменту активними опорами

Пускач  $KM1$  вмикає статор у мережу через пускові опори  $R1$ ,  $R2$  і  $R3$ , а пускач  $KM2$  – безпосередньо у мережу. Тривалість пуску з опорами в колі статора контролюється електромагнітним реле часу  $KT1$ . При вмиканні автоматичного вимикача  $QF$  спрацьовує

реле *KT1* і розмикає свій контакт у колі котушки пускача *KM2*. Схема підготовлена до пуску. Для пуску двигуна натискають на кнопку *SB2* «Пуск». При цьому спрацьовує пускач *KM1* і вмикає двигун у мережу через пускові опори. Одночасно його розмикаючий допоміжний контакт розмикає коло котушки реле часу *KT1*. З витримкою часу якір реле відпадає, його розмикаючий контакт вмикає котушку пускача *KM2*, який головними контактами вмикає двигун *M2* безпосередньо в мережу, а допоміжними контактами вимикає пускач *KM1*. Для зупинки двигуна натискають кнопку *SB1* «Стоп».

З метою обмеження пускового струму широко застосовується пуск з перемиканням обмоток статора при пуску з «зірки» на «трикутник». Керування пуском двигуна найчастіше здійснюється у функції часу із застосуванням різних реле часу (рис. 7.5).

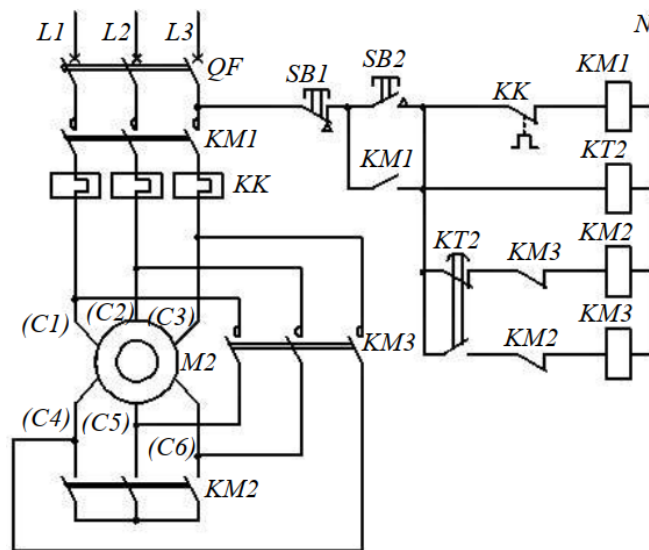


Рис. 7.5 – Схема керування трифазним асинхронним електродвигуном з перемиканням обмотки статора із «зірки» на «трикутник» при пуску

Пускач *KM1* – лінійний, має теплове реле *KK* для захисту двигуна від перевантажень. Пускач *KM2* з’єднує обмотки двигуна «зіркою», пускач *KM3* – «трикутником». Пускачі *KM2* і *KM3* взаємно заблоковані розмикаючими контактами.

Для пуску двигуна натискають на кнопку *SB2* «Пуск». При цьому отримують живлення котушки контакторів *KM1*, *KM2* і пневматичного реле часу *KT2*. Контактори *KM1* і *KM2* спрацьовують і вмикають у мережу обмотки статора двигуна при з’єднанні «зіркою». Через задану витримку реле часу *KT2* розмикаючим контактом розмикає коло котушки контактора *KM2*, а замикаючим замикає коло котушки контактора *KM3*. Контактор *KM2* вимикається, а контактор *KM3* вмикається, з’єднуючи обмотки статора в «трикутник». Вимикають двигун натисканням на кнопку *SB1* «Стоп». При пуску потужних асинхронних двигунів з фазним ротором для обмеження пускового струму застосовують пускові опори, які вмикають у коло ротора. При пуску двигуна їх необхідно поступово виводити по мірі розгону двигуна. Процес пуску може відбуватися у функції часу, струму або частоти струму в роторі. Схема керування пуском асинхронного двигуна з фазним ротором у функції часу показана на рис. 7.6.

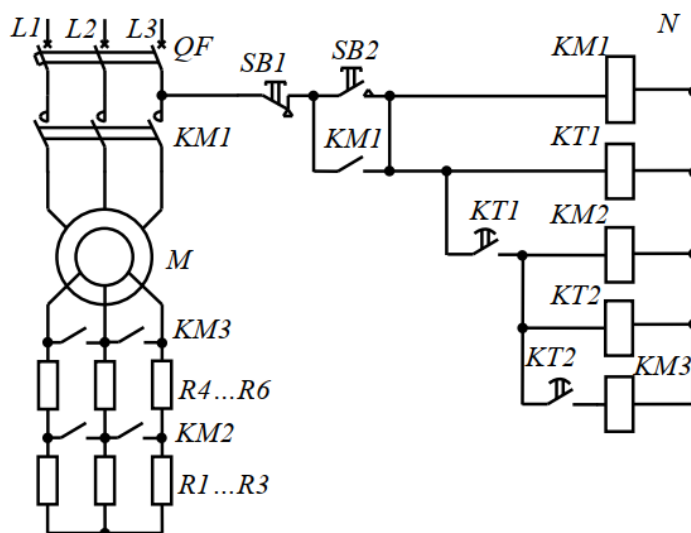


Рис. 7.6 – Принципіальна електрична схема керування пуском асинхронного двигуна з фазним ротором у функції часу

При натисканні на кнопку *SB2* «Пуск» одержують живлення котушки контактора *KM1* і реле часу *KT1*. Контактор головними контактами вмикає обмотку статора двигуна в мережу, а допоміжним замикаючим контактом шунтує кнопку *SB2*. Двигун розганяється при увімкнених у коло ротора пускових резисторах *R1–R6*. Через заданий проміжок часу реле *KT1* своїм замикаючим контактом подає напругу на котушки контактора *KM2* і реле часу *KT2*. Контактор *KM2* замикає головні контакти і закорочує перший ступінь пускового реостата *R1–R3*. Двигун продовжується розганятися при зменшеному опорі кола ротора. Через задану витримку часу реле часу *KT2* замикає свій контакт у колі котушки контактора *KM3*, який спрацьовує і головними контактами закорочує другий ступінь пускового реостата *R4–R6*. Далі двигун розганяється на природній характеристиці при закороченому пусковому реостаті.

Схема керування пуском асинхронного двигуна з фазним ротором у функції струму показана на рис. 7.7.

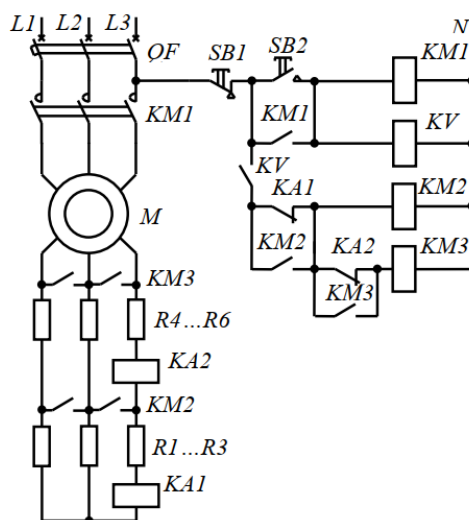


Рис. 7.7 – Принципіальна електрична схема керування пуском асинхронного двигуна з фазним ротором у функції струму



При натисканні на кнопку *SB2* «Пуск» спрацьовує лінійний контактор *KM1* і блокувальне реле *KV*. Контактор головними контактами вмикає обмотку статора двигуна в мережу, а допоміжним замикаючим контактом шунтує кнопку *SB2*. При пуску двигуна через обмотку ротора проходить великий пусковий струм, тому реле струму *KA1* і *KA2*, котушки яких увімкнені у це коло, спрацьовують і розмикають свої контакти у колі котушок контакторів *KM2* і *KM3*.

Блокувальне реле *KV* створює витримку часу, достатню для спрацювання реле струму *KA1* і *KA2*. Тому контактори *KM2* і *KM3* не спрацьовують, і двигун розганяється при увімкненому у коло ротора пусковому реостаті *R1–R6*. При зростанні кутової швидкості двигуна струм падає, і при певних значеннях струму реле *KA1* і *KA2* по черзі повертаються у вихідне положення, подаючи своїми розмикаючими контактами напругу на котушки контакторів *KM2* і *KM3*. При цьому спочатку спрацьовує контактор *KM2* і своїми головними контактами закорочує перший ступінь *R1–R3*, а потім, через деякий час, спрацьовує контактор *KM3* і закорочує другий ступінь *R4–R6* пускового реостата.

Схема керування пуском асинхронного двигуна з фазним ротором у функції частоти струму в роторі показана на рис. 7.8.

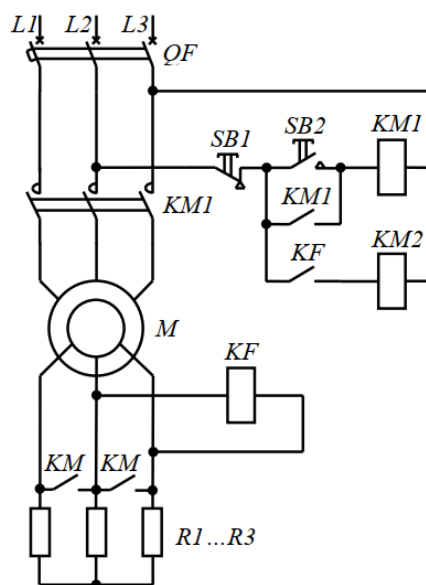


Рис. 7.8 – Принципіальна електрична схема керування пуском асинхронного двигуна з фазним ротором у функції частоти струму ротора

При натисканні на кнопку *SB2* «Пуск» спрацьовує лінійний контактор *KM1*, який вмикає обмотку статора двигуна в мережу. На початку пуску двигуна частота струму ротора висока, тому реле частоти струму *KF* не спрацьовує, і двигун розганяється при введених пускових резисторах *R1–R3*. По мірі розгону двигуна частота струму в колі ротора спадає і при певному її значенні реле *KF* спрацьовує і своїм замикаючим контактом подає напругу на котушку контактора *KM2*. Контактор *KM2* головними контактами закорочує пускові резистори *R1–R3*. Автоматичне керування багатошвидкісними двигунами забезпечує безступінчастий та ступінчастий пуск двигуна. Безступінчастий пуск двигуна здійснюється безпосереднім вмиканням на задану швидкість за допомогою контакторів, які керуються кнопками керування. При

ступінчастому пуску вмикання на другу, третю або четверту швидкість здійснюється через контрольовану реле часу затримку на першій швидкості.

У схемах керування багатошвидкісними електродвигунами для захисту кіл від коротких замикань використовують автоматичні вимикачі, для захисту від перевантажень – теплові реле. Оскільки номінальні потужності та номінальні струми двигуна при різних частотах обертання різні, тому в схемах керування багатошвидкісними двигунами в коло обмоток кожної швидкості встановлюють свої теплові реле. Для запобігання одночасному вмиканню контакторів, що вмикають двигун на різні частоти обертання, в схемах передбачена взаємна електрична блокування допоміжними контактами.

Схема безступінчастого керування двошвидкісним двигуном показана на рис. 7.9.

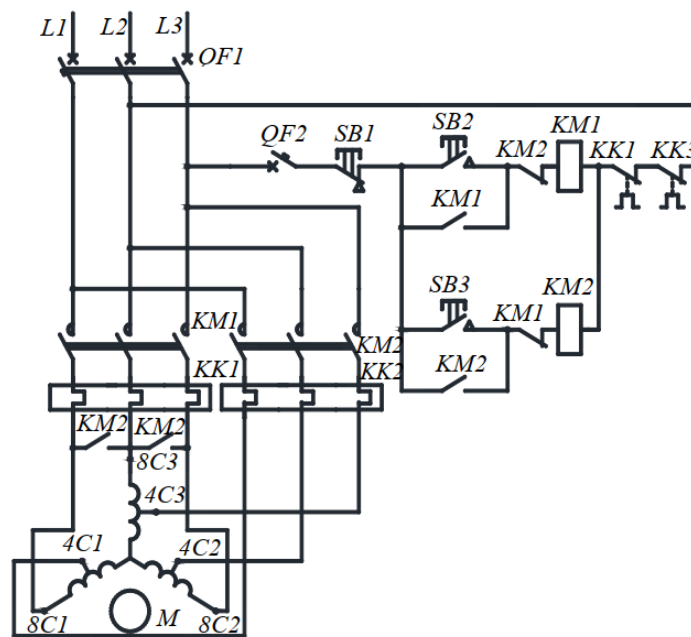


Рис. 7.9 – Схема керування двошвидкісним електродвигуном

При пуску двигуна на нижчій швидкості натискають на кнопку *SB2*. При цьому отримує живлення котушка контактора *KM1*. Пускач *KM1* головними контактами вмикає двигун на першу швидкість (з'єднання обмоток у «зірку»), замикаючи допоміжним контактом шунтує кнопку *SB2* і розмикає контакт у колі котушки контактора *KM2*. Для вимикання двигуна натискають на кнопку *SB1* «Стоп». Пуск на вищу швидкість здійснюють натисканням кнопки *SB3*. При цьому спрацьовує контактор *KM2*, який з'єднує обмотки статора у «подвійну зірку». Захист силових кіл від коротких замикань здійснює автоматичний вимикач *QF1*, кіл керування – *QF2*. При перевантаженні спрацьовують теплові реле *KK1* або *KK2*, які вимикають двигун.

Схемою безступінчастого пуску тришвидкісного електродвигуна (рис. 7.10) передбачено пряме вмикання на відповідну швидкість; перемикання з нижчої швидкості на вищу; нульову та електричну блокування, захист від коротких замикань автоматичними вимикачами *QF1* та *QF2* і від перевантажень тепловими реле *KK1*, *KK2*, *KK3*.

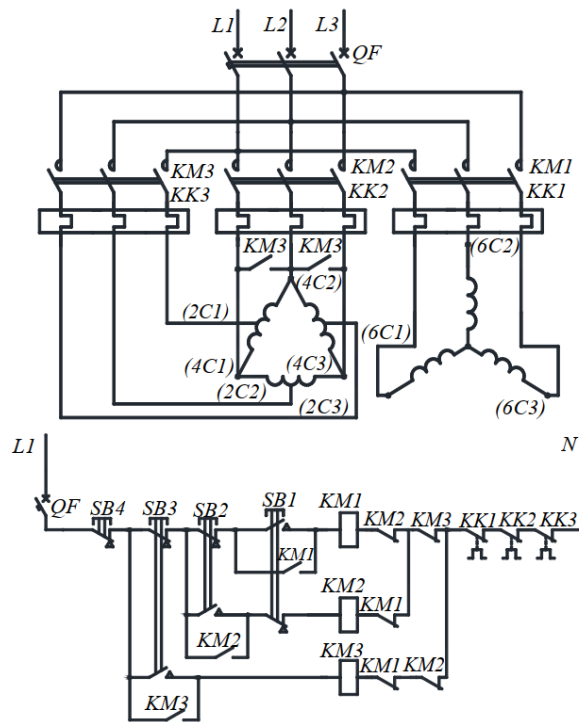


Рис. 7.10 – Схема безступінчастого керування трифазним асинхронним електродвигуном

Для запуску двигуна на яку-небудь швидкість натискають кнопку *SB1* або *SB2*, або *SB3*. Спрацьовує відповідний контактор *KM1*, *KM2* або *KM3*, який головними контактами вмикає двигун у мережу, замикаючим контактом шунтує контакт кнопки, а розмикаючі контакти розмикають кола «чужих» котушок. Двигун зупиняють натисканням на кнопку *SB4* «Стоп».

Для перемикання з нижчої швидкості на вищу натискають відповідну кнопку *SB2* або *SB3*, розмикаючий контакт якої знеструмлює котушку працюючого пускача, а замикаючий замикається в колі котушки *KM2* або *KM3*. Після вимикання працюючого пускача *KM1* спрацьовує пускач *KM2* або *KM3* і двигун вмикається на потрібну швидкість.

Пуск однофазних двигунів найчастіше здійснюють у функції струму (рис. 7.11) за допомогою пускового реле *KA*, а захист від перевантажень – тепловим реле *KK*.

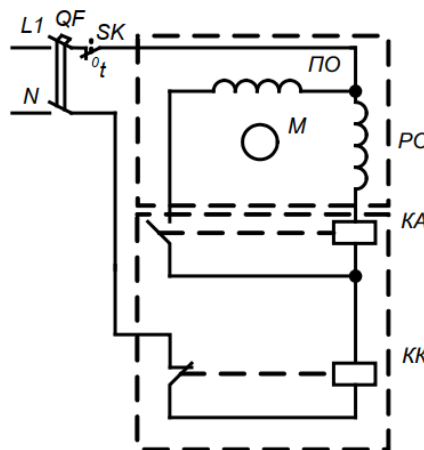


Рис. 7.11 – Принципіальна схема керування однофазним двигуном

При вмиканні двигуна, наприклад, температурним реле *SK*, через робочу обмотку *PO* двигуна *M* проходить пусковий струм, спрацьовує пускове реле *KA*, замикаючим контактом якого вмикається пускова обмотка *ПО*. Двигун запускається. Коли струм в робочій обмотці знизиться до номінального значення, реле *KA* розмикає контакт і пускова обмотка вимикається. При перевантаженні двигуна теплове реле *KK* вимикає робочу обмотку. Після охолодження біметалевої пластинки контакт *KK* автоматично замикається і двигун знову працює.

Пуск і автоматичне керування гальмуванням противмиканням асинхронного двигуна здійснюється за схемою (рис. 7.12), в якій використовуються два контактори – лінійний *KM1* і гальмівний *KM2*, проміжне реле *KV*, реле контролю швидкості *BR*, кнопки *SB2* «Пуск» і *SB1* «Стоп».

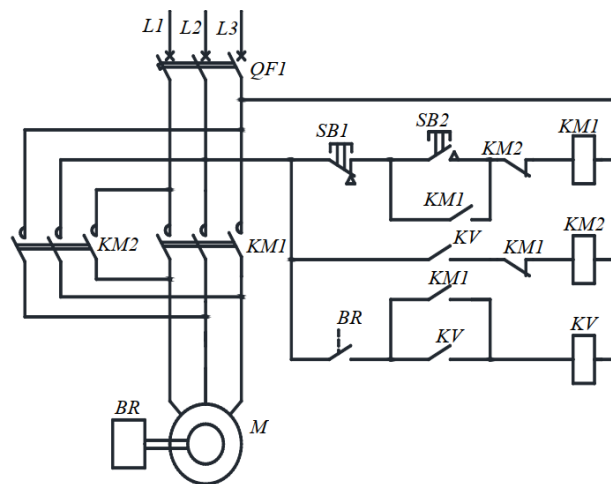


Рис. 7.12 – Схема керування асинхронним електродвигуном з автоматичним гальмуванням противмиканням

Для пуску двигуна натискають на кнопку *SB2* «Пуск». При цьому спрацьовує лінійний контактор *KM1* і вмикає двигун у мережу. Один замикаючий допоміжний контакт контактора *KM1* шунтує кнопку «Пуск», а інший готує коло котушки реле *KV*. При досягненні валом двигуна деякої швидкості контакт реле *BR* замикається, і реле *KV* спрацьовує. При цьому один його замикаючий контакт шунтує контакт *KM1* у колі котушки реле *KV*, а інший також замикається і готує коло живлення котушки гальмівного контактора *KM2*. При роботі двигуна котушка контактора *KM2* не може одержати живлення, тому що розмикаючий контакт *KM1* у колі котушки *KM2* розімкнений.

При натисканні на кнопку *SB1* «Стоп» контактор *KM1* вимикається, його розмикаючий допоміжний контакт у колі котушки контактора *KM2* замикається, контактор *KM2* спрацьовує і вмикає двигун у мережу зі зворотним чергуванням фаз. Двигун загальмовується, і при швидкості ротора, близькій до нуля, реле *BR* розмикає свій контакт, реле *KV* знеструмлюється і вимикає контактор *KM2*. На цьому гальмування завершується. Схемою передбачені також нульова блокування та електрична блокування від одночасного вмикання контакторів *KM1* та *KM2*. Гальмування противмиканням виходить різким, що для деяких приводів недопустимо. При динамічному гальмуванні зі збудженням статора постійним струмом гальмівний момент нарощується плавно,

максимальний гальмівний момент має місце при низькій швидкості (3 – 30 % номінальної).

Для здійснення динамічного гальмування асинхронного двигуна потрібно двигун вимкнути з мережі змінного струму і подати на статор знижену напругу постійного струму ( $U < 0,1 U_{H\sim}$ ). Добрі гальмівні характеристики асинхронного двигуна з короткозамкненим ротором одержують при подачі в обмотку статора постійного струму, який у 3 – 4 рази перевищує струм холостого ходу двигуна. При наявності мережі постійного струму двигун підключають до неї без витримки часу, а при живленні від випрямляча – з витримкою, достатньою для затухання магнітного потоку статора. Після закінчення гальмування живлення обмотки статора постійним струмом повинно бути вимкнено.

Пуск і динамічне гальмування асинхронного електродвигуна з короткозамкненим ротором здійснюється за схемою, зображеною на рис. 7.13.

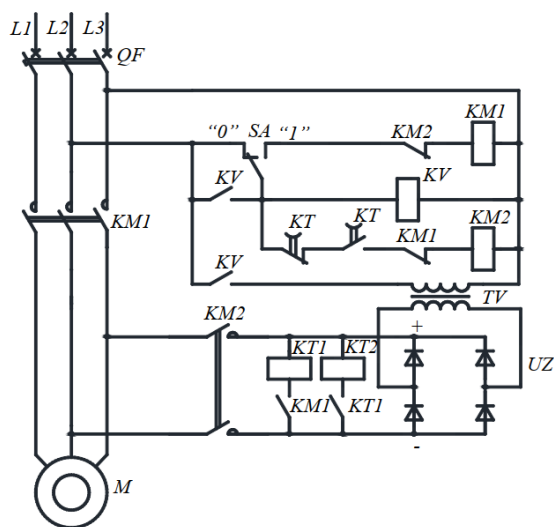


Рис. 7.13 – Схема пуску та динамічного гальмування трифазного асинхронного електродвигуна з короткозамкненим ротором

У ній використовуються два контактори – лінійний *KM1* і гальмівний *KM2*. Керування двигуном здійснює перемикач *SA*, а нульову блокування – реле *KV*. Для автоматичного керування процесом гальмування використовуються два електромагнітних реле часу *KT1* і *KT2*. Постійний струм на статор подається від випрямляча *UZ*, що живиться від знижувального трансформатора *TV*. Для пуску двигуна подають напругу на схему і ставлять перемикач *SA* в нульове положення. При цьому одержує живлення котушка реле *KV*, яке спрацьовує, один його замикаючий контакт шунтує контакти перемикача *SA*, а другий – вмикає трансформатор *TV*. Розмикаючий допоміжний контакт *KM1* у колі котушки контактора *KM2* розмикається, а замикаючий у колі котушки реле *KT1* замикається, реле *KT1* спрацьовує і своїм замикаючим контактом вмикає реле *KT2*. Реле *KT1* і *KT2* своїми контактами готують коло котушки контактора *KM2* до гальмування. У такому стані схема знаходиться при роботі двигуна.

Для зупинки двигуна перемикач *SA* потрібно повернути в нульове положення. При цьому розмикається коло котушки контактора *KM1* і статор двигуна вимикається з мережі. Також розмикається коло живлення котушки реле *KT1*. Розмикаючий контакт *KM1* у колі

катушки контактора *КМ2* замикається. Залишившись без живлення, реле *КТ1* з витримкою 1 – 1,5 с (достатньою для затухання магнітного потоку двигуна) відпускає свій якір, і через його замкнений розмикаючий контакт подається живлення на катушку контактора *КМ2*. Контактор *КМ2* спрацьовує і подає постійний струм від випрямляча на статора двигуна. Ротор двигуна швидко загальмовується. Одночасно з цим реле *КТ1* своїм замикаючим контактом, що розмикається, знеструмлює катушку реле *КТ2*. Якір відпадає з витримкою, достатньою для повного гальмування двигуна (2 – 3 с). При цьому замикаючий контакт реле *КТ2* розмикається і контактор *КМ2* вимикається, припиняючи живлення статора двигуна постійним струмом.

## 7.2. Типові схеми автоматизованого керування двигунами постійного струму

Схеми пуску двигунів постійного струму передбачають прямий пуск двигунів невеликої потужності (до 0,75 кВт), реостатний пуск або від перетворювачів напруги. При реостатному пуску двигуна необхідно ступінчасто виводити пускові опори, увімкнені в коло якоря, яке може здійснюватися у функції часу, ЕРС або струму. Схема автоматичного пуску двигуна постійного струму паралельного збудження у функції часу показана на рис. 7.14.

При вмиканні автоматичного вимикача *QF* отримує живлення обмотка збудження двигуна. Натисканням на кнопку *SB2* «Пуск» одержують живлення катушки контактора *КМ1* і реле часу *КТ1*. Контактор головними контактами вмикає обмотку якоря двигуна в мережу, а допоміжним замикаючим контактом шунтує кнопку *SB2*. Двигун розганяється при увімкнених у коло якоря пускових резисторах *R1* і *R2*. Через заданий проміжок часу реле *КТ1* своїм замикаючим контактом подає напругу на катушки контактора *КМ2* і реле часу *КТ2*. Контактор *КМ2* спрацьовує і головним контактом закорочує пусковий резистор *R1*. Двигун продовжує розганятися при зменшеному опорі кола якоря. По закінченні витримки часу реле *КТ2* замикає свій контакт у колі катушки контактора *КМ3*, який спрацьовує і своїм контактом закорочує пусковий резистор *R2*. Далі двигун розганяється на природній характеристиці при закороченому пусковому реостаті.

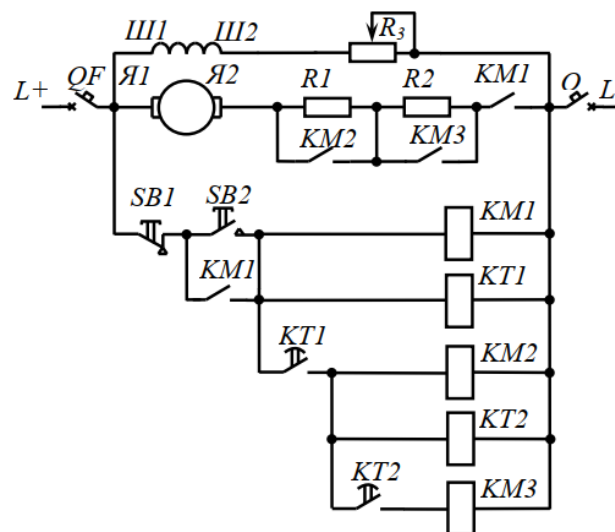


Рис. 7.14 – Принципіальна електрична схема керування пуском двигуна постійного струму паралельного збудження у функції часу

Схема автоматичного пуску двигуна постійного струму паралельного збудження у функції ЕРС показана на рис. 7.15.

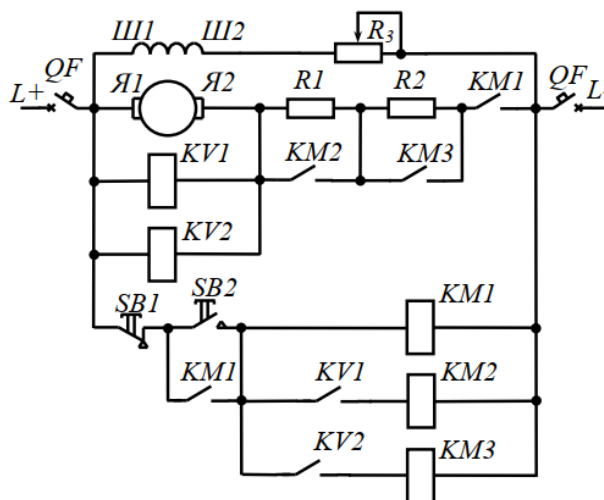


Рис. 7.15 – Принципіальна електрична схема керування пуском двигуна постійного струму паралельного збудження у функції ЕРС

При вмиканні автоматичного вимикача  $QF$  отримує живлення обмотка збудження двигуна. Після натискання на кнопку  $SB2$  «Пуск» спрацьовує лінійний контактор  $KM1$ , який своїми головними контактами вмикає обмотку якоря двигуна в мережу при введених резисторах  $R1$  і  $R2$ . В момент пуску двигуна напруга на котушках реле напруги  $KV1$  і  $KV2$  мала, тому вони не спрацьовують. Із збільшенням швидкості двигуна зростає ЕРС якоря. При певному її значенні спрацьовує реле  $KV1$  і контактор  $KM2$ , який закорочує пусковий резистор  $R1$ . При подальшому зростанні кутової швидкості спрацьовує реле  $KV2$  і контактор  $KM3$ , який закорочує резистор  $R2$ , і двигун переходить на природну механічну характеристику. Реле  $KV1$  і  $KV2$  налагоджують на різні напруги спрацювання, які визначаються сумою ЕРС двигуна і спаду напруги на обмотці якоря.

Схема керування пуском двигуна постійного струму паралельного збудження у функції струму показана на рис. 7.16.

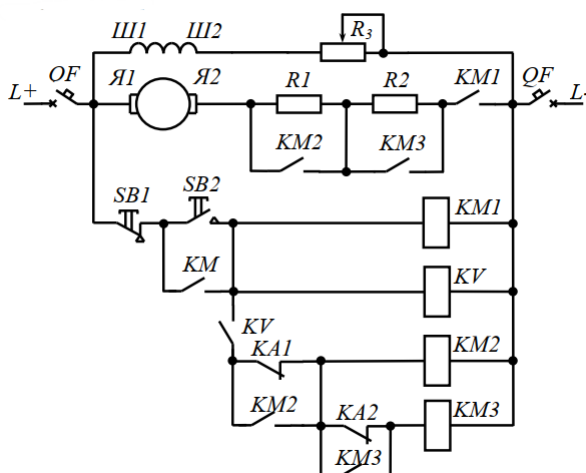


Рис. 7.16 – Принципіальна електрична схема керування пуском двигуна постійного струму паралельного збудження у функції струму

При вмиканні автоматичного вимикача  $QF$  отримує живлення обмотка збудження двигуна. При натисканні на кнопку  $SB2$  «Пуск» спрацьовує контактор  $KM1$  і блокувальне реле  $KV$ . Контактор головним контактом вмикає обмотку якоря двигуна в мережу, а допоміжним замикаючим контактом шунтує кнопку  $SB2$ . При пуску двигуна через обмотку якоря проходить великий пусковий струм, тому реле струму  $KA1$  і  $KA2$ , котушки яких увімкнені у це коло, спрацьовують і розмикають свої контакти у колі котушок контакторів  $KM2$  і  $KM3$ . Блокувальне реле  $KV$  створює витримку часу, достатню для спрацювання реле струму  $KA1$  і  $KA2$ . Тому контактори  $KM2$  і  $KM3$  не спрацьовують, і двигун розганяється при увімкненні у коло якоря пускових резисторів  $R1$  і  $R2$ . При зростанні кутової швидкості двигуна струм падає, і при певних його значеннях реле  $KA1$  і  $KA2$  по черзі повертаються у вихідне положення, вмикаючи своїми розмикаючими контактами котушки контакторів  $KM2$  і  $KM3$ . При цьому спочатку спрацьовує контактор  $KM2$  і своїми контактами закорочує резистор  $R1$ , а потім, через деякий час, спрацьовує контактор  $KM3$  і закорочує резистор  $R2$  пускового реостата.

Гальмування двигунів постійного струму також може відбуватися у функції часу, ЕРС, струму. Схема динамічного гальмування двигуна постійного струму паралельного збудження у функції часу показана на рис. 7.17.

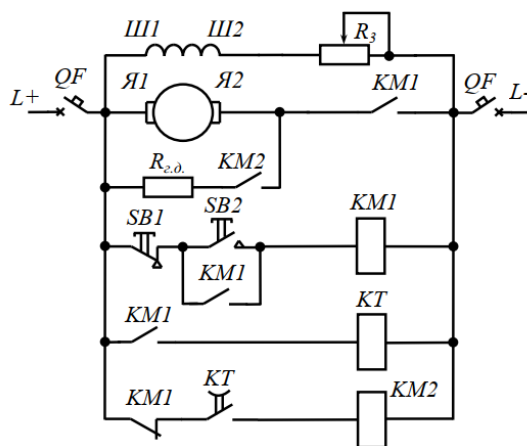


Рис. 7.17 – Принципіальна електрична схема динамічним гальмуванням двигуна постійного струму паралельного збудження у функції часу

Схема керування пуском двигуна не показана. Коли двигун працює при усталеній швидкості, увімкнені контактор  $KM1$ , реле часу  $KT$ , а контакт його у колі котушки контактора  $KM2$  замкнений. Але котушка контактора  $KM2$  знеструмлена розмикаючим контактом контактора  $KM1$ . При натисканні на кнопку  $SB1$  «Стоп» вимикається контактор  $KM1$ , який вмикає обмотку якоря з мережі. Його замикаючий допоміжний контакт розмикає коло котушки реле часу  $KT$ , яке починає відлік часу гальмування. Розмикаючий допоміжний контакт  $KM1$  повертається у вихідне положення, спрацьовує контактор  $KM2$  і своїм контактом замикає обмотку якоря на гальмівний резистор  $R_{z.d.}$ . Двигун загальмовується динамічним гальмуванням. Після закінчення витримки часу реле  $KT$  вмикає контактор  $KM2$ .

На схемі динамічного гальмування двигуна постійного струму паралельного збудження у функції ЕРС (рис. 7.18) пуск двигуна не показаний.



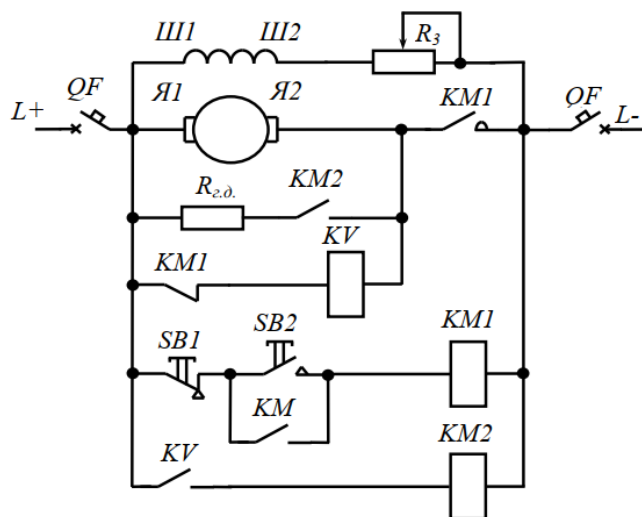


Рис. 7.18 – Принципіальна електрична схема динамічного гальмування двигуна постійного струму паралельного збудження у функції ЕРС

При натисканні на кнопку *SB1* «Стоп» вимикається контактор *KM1*, який вимикає обмотку якоря з мережі. Розмикаючий контакт контактора *KM1* повертається у вихідне положення і вмикає реле напруги *KV*, яке контролює ЕРС двигуна. Контакт *KV* вмикає контактор *KM2*, і відбувається динамічне гальмування двигуна. Коли швидкість двигуна стане малою, реле *KV* відпускає свій якір і вимикає контактор *KM2*. Застосовуване реле *KV* повинно мати невеликий коефіцієнт повернення ( $K_{нов} = 0,1 - 0,15$ ).

#### Завдання на самостійне опрацювання та підготовку

1. Самостійно відновити матеріал по основним поняттям та визначенням;
2. Самостійно опрацювати матеріал з опису: Нагрівання та охолодження електродвигунів. Класи нагрівостійкості ізоляції обмоток електродвигунів.

### ТЕМА №8. АВТОМАТИЧНЕ КЕРУВАННЯ ЕЛЕКТРОПРИВОДАМИ

Мета: ознайомити здобувачів початкового рівня вищої освіти з описом технічних засобів автоматики в електроприводах, функціональні елементи системи автоматичного керування, виконавчі механізми автоматичного керування.

#### План лекції

- 8.1. Технічні засоби автоматики в електроприводах;
- 8.2. Функціональні елементи системи автоматичного керування;
- 8.3. Вимірювальні перетворювачі;
- 8.4. Виконавчі механізми автоматичного керування.

#### Хід проведення лекційного заняття

- I. Організація групи;
- II. Мотивація навчальної діяльності. Оголошення теми й мети;
- III. Викладення та обговорення нового матеріалу.

#### IV. Оголошення завдання на самостійне опрацювання та підготовку.

##### 8.1. Технічні засоби автоматики в електроприводах

В основі побудови систем автоматичного керування покладені загальні фундаментальні принципи керування, які визначають, яким чином здійснюється узгодження алгоритмів керування з завданням та фактичним функціонуванням системи, а інколи зі збуреннями, які викликають відхилення вихідної величини об'єкта керування від заданого значення. У системах керування технологічними об'єктами застосовуються три основні фундаментальні принципи: розімкненого керування, компенсації збурення та керування за відхиленням.

Принцип розімкненого керування полягає у тому, що алгоритм керування здійснюється шляхом вибору законів, які визначають дію керуючого пристрою з урахуванням властивостей керованого об'єкта. При цьому не враховується фактичне значення керованої величини та дії збурень.

Принцип компенсації (керування за збуренням) полягає у тому, що керуючий пристрій формує керуючу дію таким чином, щоб компенсувати дію збурення на об'єкт керування.

Принцип керування за відхиленням полягає у тому, що керуюча дія формується тільки при відхиленні регульованої величини від заданого її значення. Одним із основних недоліків розімкнених систем регулювання кутової швидкості приводів постійного та змінного струму є невеликий діапазон регулювання, що пояснюється зменшенням коефіцієнта жорсткості механічних характеристик двигунів при параметричному регулюванні. В розімкнених системах неможливо також одержати високу стабільність регулювання, оскільки збурення з боку навантаження призводить до коливання кутових швидкостей. Отже, в розімкнених системах задана кутова швидкість не стабілізується і залежить від параметрів двигуна і характеру навантаження на його валу. У ряді випадків виникає необхідність задавати певні значення кутової швидкості і відповідні моменти двигуна при цьому, тобто здійснювати регулювання координат. Всі зазначені недоліки розімкнених систем регулювання відсутні в замкнених системах. В таких системах передбачаються керовані перетворювачі і регулятори, які дають можливість автоматично під дією зворотних зв'язків змінювати напругу, опір, частоту, струм та інші параметри.

Характерною ознакою замкненої системи є зворотні зв'язки, що з'єднують її вихід з входом. Вони можуть бути жорсткі і гнучкі. Жорсткі зворотні зв'язки діють в усталеному і перехідному режимах, а гнучкі – лише в перехідному. За впливом на вихідну величину зворотні зв'язки поділяють на від'ємні і додатні. При від'ємному зворотному зв'язку сигнал зворотного зв'язку віднімається від задаючого сигналу, а при додатному – додається. Для формування зворотних зв'язків у електроприводах використовують такі вихідні величини: струм, напругу, частоту обертання тощо.

Аналіз і синтез замкнених систем регулювання координат електропривода виконуються методами теорії автоматичного регулювання.

##### 8.2. Функціональні елементи системи автоматичного керування

Система автоматичного керування складається із функціональних елементів, основними з яких є задавальний елемент, сприймаючий елемент, елемент порівняння,

керуючий елемент та виконавчий елемент. У складних системах автоматичного керування, окрім цих елементів, застосовують також коригувальні елементи.

**Задавальний елемент** призначений для установки завдання регулятору; він виробляє еталонну величину, з якою порівнюється фактичне значення керованої величини.

**Сприймаючий (чутливий, вимірювальний) елемент** призначений для отримання інформації про фактичне значення керованої величини об'єкта у вигляді сигналу певної фізичної природи.

**Елемент порівняння** призначений для порівняння заданого і фактичного значення керованої величини.

**Керуючий елемент** формує сигнал керування відповідно до прийнятого алгоритму керування. Оскільки сигнал, який поступає на керуючий елемент, найчастіше має малу потужність, то у більшості випадків він підсилюється до потужності, достатньої для приведення у дію виконавчого механізму. При формуванні складних алгоритмів керування застосовуються мікропроцесорні пристрої та ПЕОМ.

**Виконавчий елемент** перетворює сигнал керування у керуючий вплив на об'єкт керування через регулюючий орган. Якщо регулюючий орган потребує механічного переміщення (заслінки, клапани, реостати тощо), то виконавчий елемент називають виконавчим механізмом.

**Коригувальні елементи** покращують динамічні властивості процесу регулювання і вводяться в автоматичний керуючий пристрій за необхідності.

На функціональних схемах кожний елемент позначають прямокутником, всередині якого записана скорочена його назва, а вхідний і вихідний сигнали позначають стрілками. Елемент порівняння зображується колом із двома входами і одним виходом.

### 8.3. Вимірювальні перетворювачі

Для будь-якої системи автоматичного керування необхідно мати інформацію про стан і хід технологічного процесу, які відбуваються в об'єкті. Її отримують у вигляді значень певних фізичних величин за допомогою вимірювальних перетворювачів.

В Державній системі промислових приладів і засобів автоматизації всі контрольовані величини розбиті на п'ять груп: теплоенергетичні величини (температура, тиск, перепад тиску, рівень, витрата); електроенергетичні величини (постійний і змінний струм та напруга, активна і реактивна потужність, коефіцієнт потужності, частота, опір ізоляції); механічні величини (лінійні та кутові переміщення, деформація, зусилля, крутні моменти, число виробів, твердість матеріалів, вібрація, шум, маса); хімічний склад (концентрація, хімічні властивості, склад); фізичні властивості (вологість, електропровідність, густина, в'язкість, мутність, освітленість тощо). Вимірювальні перетворювачі можуть складатися із одного або декількох первинних перетворювачів (пристроїв, у яких здійснюється однократне перетворення вимірюваної фізичної величини). Первинні перетворювачі з'єднуються, утворюючи такі схеми перетворення: з безпосереднім перетворенням; з послідовним перетворенням, коли вихідна величина попереднього перетворювача є вхідною для наступного; диференціальну, коли зміна вимірюваної величини порівнюється із еталонною величиною; компенсаційну, яка містить зворотний зв'язок, за допомогою якого різниця між виміряним і заданим значенням величини зводиться до нуля.

За вихідним сигналом вимірювальні перетворювачі бувають з природним сигналом і уніфікованим (електричний сигнал постійного і змінного струму, напруги або частоти). Для отримання уніфікованих сигналів із природних застосовують нормувальні перетворювачі.

**Електромеханічні вимірювальні перетворювачі** призначені для перетворення вхідних механічних величин (тиску, зусилля, переміщення тощо) у вихідні електричні величини (напруга, струм, опір, індуктивність тощо). За принципом дії їх поділяють на резистивні (контактні, потенціометричні, тензометричні), електромагнітні (індуктивні, трансформаторні, магнітопружні, індукційні), ємнісні та тахометричні.

У *тензометричних* вимірювальних перетворювачах використовується явище тензоефекту – зміни їх омичного опору при пружних деформаціях. Ця залежність є лінійною. Тензорезистори виконуються із високоомного дроту або фольги, приклеєних до тонкого паперу або ізоляційної плівки (рис. 8.1, *а*). Тензометричні вимірювальні перетворювачі бувають дротяними на паперовій або плівковій основі, фольгові прямокутні або розеткові та напівпровідникові. Найпоширенішими є наклеювані тензометричні перетворювачі, які є еластичними ізоляційними пластинками, усередині яких розміщений тензочутливий елемент.

У *контактних* вимірювальних перетворювачах використовується залежність перехідного опору контактів від зусилля при натисканні. Конструктивно їх виконують у вигляді стовбців, набраних із вугільних дисків, або у вигляді контактних пар (рис. 8.1, *б*).

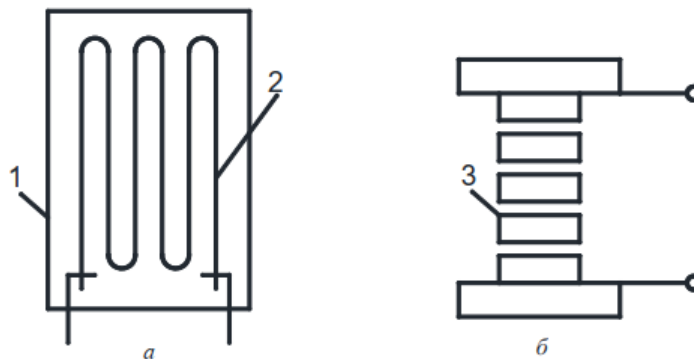


Рис. 8.1 – Вимірювальні перетворювачі опору: *а* – тензометричний; *б* – вугільний;  
1 – плівка; 2 – дрот; 3 – вугільні шайби

*Потенціометричні* вимірювальні перетворювачі є регульованими дровими опорами, які мають лінійну залежність між опором і переміщенням. Вони складаються із пластмасового або металічного каркасу, обмотки із проводу круглого або прямокутного перерізу та ковзного контакту (щітки).

В *індуктивних* вимірювальних перетворювачах використовується залежність індуктивності від переміщення рухомої частини магнітної системи. Вони складаються із феромагнітного осердя з обмоткою і рухомого якоря. При переміщенні якоря змінюється магнітний опір повітряного зазору  $\delta$  і, відповідно, індуктивність обмотки, що обумовлює зміну струму у колі (рис. 8.2).

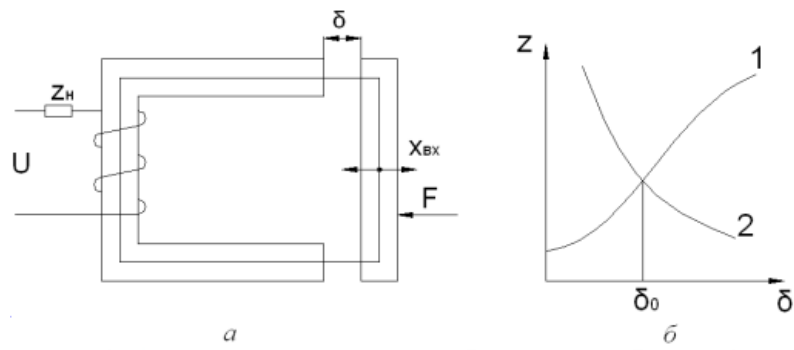


Рис. 8.2 – Конструкція (а) та статична характеристика (б) індуктивного вимірювального перетворювача: 1 – залежність струму від зміни повітряного зазору; 2 – залежність повного опору від зміни повітряного зазору

Ширше застосовуються *трансформаторні* і *дифтрансформаторні* перетворювачі, принцип дії яких полягає у зміні взаємної індуктивності обмоток при переміщенні однієї відносно іншої або при переміщенні якоря.

*Магнітопружні* перетворювачі конструктивно представляють собою осердя різноманітної форми із розміщеними на них обмотками. При пружних деформаціях феромагнітний матеріал осердя змінює магнітну проникливість.

В *індукційних* вимірювальних перетворювачах ЕРС, яка індуктується у котушці, пропорційна швидкості обертання магнітного потоку, зчепленого з котушкою. Тахогенератор є генератором постійного струму незалежного збудження або з постійним магнітом, у якого ЕРС залежить від частоти обертання якоря.

В *ємнісних* вимірювальних перетворювачах використовується залежність електричної ємності від розмірів і взаємного розміщення електродів, а також діелектричних властивостей середовища між ними. Конструктивно в ємнісних вимірювальних перетворювачах можуть змінюватися відстань між електродами, активна площа електродів та властивість середовища між електродами, що викликає зміну ємності (рис. 8.3):

$$C = \varepsilon \frac{S}{\delta},$$

де  $\varepsilon$  – діелектрична проникливість;  $S$  – площа електродів;  $\delta$  – відстань між ними.

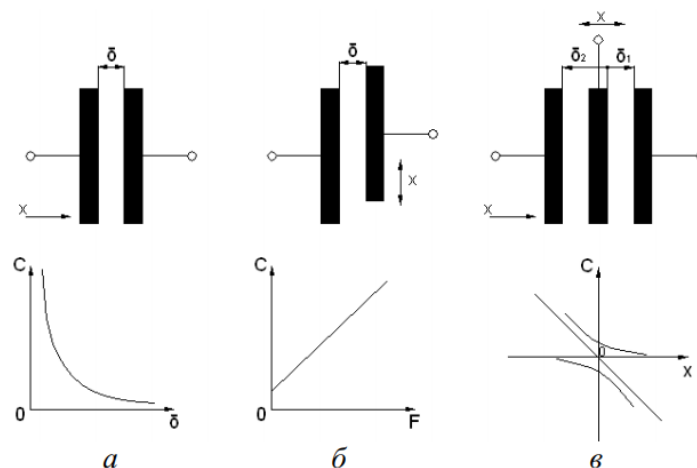


Рис. 8.3 – Ємнісні вимірювальні перетворювачі з плоскими електродами та їх

характеристики:  $a$  – зі змінним зазором;  $b$  – зі змінною площею;  $c$  – із двома змінними зазорами

У *п'єзоелектричних* перетворювачах застосовується п'єзо ефект – поява електричних зарядів на гранях кристалів деяких речовин (кварцю, титанату барію, сегнетової солі тощо) під дією механічного зусилля. Конструктивно п'єзоелемент є пластинкою кристалу зі строго зорієнтованими осями. При прикладенні сили вздовж вісі на гранях кристала виникає електричний заряд, пропорційний силі.

#### **8.4. Виконавчі механізми автоматичного керування**

Виконавчим механізмом називають пристрій, який за допомогою регулюючого органу впливає на об'єкт керування шляхом зміни потоку енергії або потоку матеріалу, які поступають на об'єкт.

До виконавчих механізмів ставляться такі вимоги:

- здатність розвивати необхідне зусилля або момент;
- забезпечувати переміщення регулюючого органа на необхідну величину;
- забезпечувати необхідну швидкість та прискорення переміщення регулюючого органу;
- мати високі техніко – економічні показники.

За видом енергії, яка використовується для живлення двигуна, виконавчі механізми класифікують на електричні, пневматичні, гідравлічні. За видом руху вихідного органа вони бувають поворотні та прямоходові. За типом двигуна їх класифікують на електродвигунні, електромагнітні, поршневі, мембранні, а за швидкістю руху вихідного органа – з постійною швидкістю і швидкістю, пропорційною вихідному сигналу.

Основними характеристиками виконавчого механізму є:

- крутний момент ( $H \cdot m$ ) для поворотних виконавчих механізмів та зусилля на штоці ( $H$ ) для прямоходових;
- кут повороту вала для однооборотних або число обертів вала для багатооборотних;
- час повного ходу вихідного органу від одного крайнього положення до іншого.

Електричні виконавчі механізми діляться на дві групи: електромагнітні та електродвигунні. У сільськогосподарському виробництві застосовується переважно виконавчі механізми з електродвигунами змінного струму, які відносяться до виконавчих механізмів з постійною швидкістю.

**Електромагнітні виконавчі механізми** забезпечують перетворення електричного сигналу у двопозиційне переміщення робочого органу. Конструктивно соленоїдні виконавчі механізми виконуються разом з регулюючим органом. Для керування потоком рідини чи газу застосовують соленоїдні вентиля, електромагнітами яких керують за допомогою електромагнітних пускачів, контакторів або напівпровідникових комутаційних апаратів.

У соленоїдних вентилях при подачі напруги на котушку якор, який знаходиться

всередині неї, переміщується під дією електромагнітної сили і переміщує зв'язаний з ним регулюючий орган (клапан).

Електромагнітні виконавчі механізми виконують або для тривалого (тривале протікання струму через соленоїд), або для короткочасного (тяговий електромагніт із защіпкою) режимів роботи.

На рис. рис. 8.4 показаний електромагнітний виконавчий механізм для двопозиційного керування потоком рідини.

Соленоїдний вентиль складається з нижнього 1 і верхнього 2 корпусів, соленоїда 3; керуючого 5 та виконавчого 8 клапанів, мембрани 7, пружин 4 і 6 та регулюючого штока 9. При вимкненому соленоїді регулюючий клапан 5 під дією пружини 4 закритий. Рідина з входу клапана притискує мембрану зверху, внаслідок чого виконавчий клапан 8 закритий. Якщо через обмотку соленоїда проходить струм, керуючий клапан 5 відкривається і з'єднує камеру над мембраною з вихідним отвором механізму. Тиск на мембрану зменшується, і під дією тиску з вхідного отвору виконавчий клапан 8 піднімається, пропускаючи рідину у вихідний отвір. Регулюючий шток 9 призначений для відкривання клапана вручну.

**Електродвигунний виконавчий механізм** складається з електродвигуна, редуктора, штурвала ручного керування та контрольних елементів, до яких належать:

а) механізм зворотного зв'язку – реостатний датчик, який визначає характеристику регулятора (зворотний зв'язок за положенням) або забезпечує передачу сигналу на дистанційний показчик положення;

б) кінцеві вимикачі, які зупиняють виконавчий механізм у крайніх положеннях;

в) вимірювач крутного моменту на валу виконавчого механізму (муфта крутного моменту) для отримання запірної або захисної дії;

г) гальмівний пристрій для прискорення зупинки швидкохідних двигунів (застосовується електромагнітне гальмо або електричне гальмування).

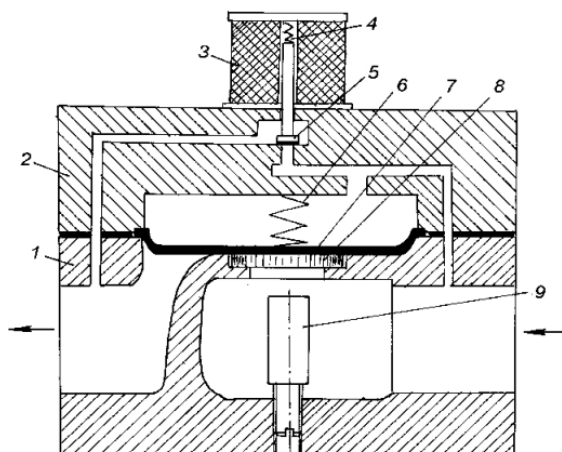


Рис. 8.4 – Електромагнітний виконавчий механізм: 1 – нижній корпус; 2 – верхній корпус; 3 – соленоїд; 4,6 – пружини; 5 – клапан регулюючий; 7 – мембрана; 8 клапан виконавчий; 9 – шток

Конструктивно електродвигунні виконавчі механізми виконуються з обертовим рухом вихідного вала і рідше – з поступальним рухом.

Виконавчі механізми з обертовим рухом бувають однооборотними та

багатооборотними. Однооборотні виконавчі механізми з кутом повороту вихідного вала  $100 - 270^\circ$  застосовують для привода заслінок, кранів, шиберів. Багатооборотні виконавчі механізми здійснюють велику кількість обертів і призначені для привода запірних вентилів, заслінок, фрамуг у теплицях тощо.

В електродвигунних виконавчих механізмах при крутному моменті до 250 Н·м застосовуються однофазні конденсаторні електродвигуни, а інших виконавчих механізмах – трифазні асинхронні електродвигуни. Асинхронний однофазний конденсаторний двигун характеризується малою інерційністю, високою надійністю та здатністю тривало працювати на упор. Режим роботи електродвигуна – повторно-короткочасний,  $TB=25\%$ , допустима частота вмикань за годину – 300. Обертовий момент з електродвигуна через редуктор передається на регулюючий орган, переміщення якого обмежується кінцевими вимикачами. Для захисту механізму від поломки привод обладнано механічною муфтою крутного моменту. Коли при закриванні регулюючого органу зусилля на ньому досягає заданого, муфта пробуксовує і приводить у дію кінцевий вимикач, який вимикає двигун. Величина заданого зусилля регулюється натягом пружини. Для захисту електродвигуна виконавчого механізму можуть застосовуватися реле максимального струму. Реле струму та муфта можуть також застосовуватися для примусового ущільнення запірних органів, при цьому зупинка двигуна здійснюється не кінцевими вимикачами, а контактами муфти крутного моменту або реле струму. У даному випадку захист електродвигуна від перевантажень при заклинюванні робочого органу здійснює тепловий розчіплювач автоматичного вимикача. Гальмівний пристрій має електромагнітний привод у вигляді соленоїда, який вмикається паралельно обмотці двигуна або одній із обмоток трифазного асинхронного електродвигуна.

Основними характеристиками електродвигунного виконавчого механізму є номінальний момент на вихідному валу  $M$  та час повного оберту вихідного вала  $T_v$ . Потужність на валу двигуна,  $P_v$ , визначають за формулою:

$$P_v = \frac{2\pi M}{T_v \eta},$$

де  $\eta$  – ККД редуктора.

Інерційність привода електродвигунного виконавчого механізму залежить від співвідношення між пусковим моментом двигуна, який вибирають у межах  $(2 - 2,5)M_n$ , та моментом інерції привода. Важливою характеристикою виконавчого механізму є також час запізнювання – це час від моменту подання сигналу до початку обертання вихідного вала.

Керування виконавчими механізмами здійснюється від регуляторів через контактний або тиристорний реверсивний пускач. Системи керування електродвигунними виконавчими механізмами повинні відповідати таким вимогам:

а) мати захист від коротких замикань і перевантажень; котушки електромагнітних пускачів повинні приєднуватися до нульового проводу;

б) виключати одночасність подачі командних імпульсів від пристроїв дистанційного та автоматичного (регуляторів) керування, забезпечувати керування виконавчими механізмами із різних пунктів; здійснювати електричне блокування;

в) забезпечувати зупинку виконавчого механізму у будьякому проміжному положенні та його рух в обидва боки;

г) зупинка виконавчого механізму повинна забезпечуватися кінцевими вимикачами



крайнього положення, а для примусового ущільнення при закритті – контактами муфти або реле струму;

д) забезпечувати дистанційне та автоматичне керування.

На рис. 8.5 показана схема керування однооборотним виконавчим механізмом з асинхронним конденсаторним електродвигуном.

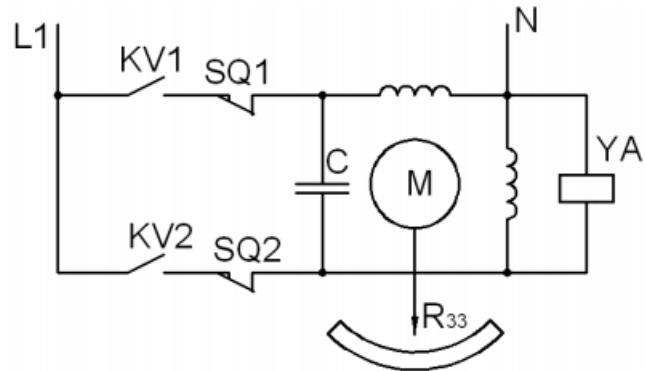


Рис. 8.5 – Принципіальна електрична схема керування однооборотним виконавчим механізмом

Одна із обмоток двигуна вмикається контактами регулятора *KV1* або *KV2* безпосередньо в мережу, а інша – через конденсатор *C*. Двигун через редуктор обертає регулюючий орган, хід вихідного вала якого обмежується кінцевими вимикачами *SQ1* та *SQ2*. З вихідним валом *ВМ* зв'язаний повзунок потенціометра зворотного зв'язку *R33*. Для швидкої зупинки застосовується електромагнітне гальмо, котушка якого *YA* увімкнена паралельно обмотці двигуна.

#### Завдання на самостійне опрацювання та підготовку

1. Самостійно відновити матеріал по основним поняттям та визначенням;
2. Самостійно опрацювати матеріал з опису: Визначення допустимого числа вмикань за годину асинхронних електродвигунів з короткозамкненим ротором.

### ТЕМА №9. СИСТЕМИ АВТОМАТИЧНОГО РЕГУЛЮВАННЯ ШИДКОСТІ ЕЛЕКТРОДВИГУНІВ

Мета: ознайомити здобувачів початкового рівня вищої освіти з описом системи автоматичного регулювання кутової швидкості ДПС незалежного та послідовного збудження, а також розгляд типових структур замкнених систем автоматичного керування електроприводами постійного струму.

#### План лекції

- 9.1. Системи автоматичного регулювання кутової швидкості ДПС незалежного та послідовного збудження;
- 9.2. Типові структури замкнених систем автоматичного керування електроприводами постійного струму.

Хід проведення лекційного заняття

- I. Організація групи;

- II. Мотивація навчальної діяльності. Оголошення теми й мети;
- III. Викладення та обговорення нового матеріалу.
- IV. Оголошення завдання на самостійне опрацювання та підготовку.

### 9.1. Системи автоматичного регулювання кутової швидкості ДПС незалежного та послідовного збудження

Структурна схема замкненої системи автоматичного регулювання кутової швидкості з від'ємним жорстким зв'язком по кутовій швидкості зображена на рис. 9.1.

Сигнал зворотного зв'язку в схемі формується тахогенератором *ТГ*, з'єднаним з валом двигуна *М*. Живлення двигуна — автономне від тиристорного перетворювача напруги *ПН*. На вхід системи подається задаючий сигнал кутової швидкості  $U_z$  та сигнал зворотного зв'язку  $k_{zu}\omega$ .

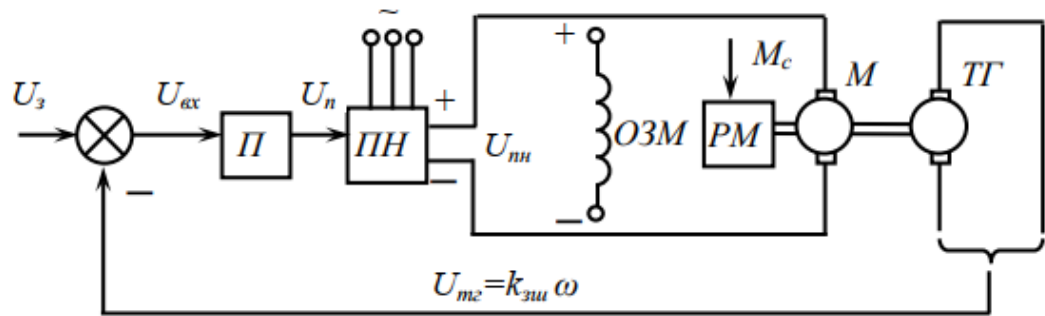


Рис. 9.1 – Структурна схема системи автоматичного регулювання кутової швидкості з жорстким від'ємним зворотним зв'язком за кутовою швидкістю

На вході підсилювача *П* формується різниця згаданих сигналів:

$$U_{\text{вх}} = U_z - k_{zu}\omega,$$

Принцип дії системи зі зворотним від'ємним зв'язком за швидкістю полягає в тому, що при збільшенні навантаження двигуна *М* зменшується кутова швидкість тахогенератора *ТГ* і, як наслідок, зменшується сигнал зворотного зв'язку  $k_{zu}\omega$ . Сигнал на вході і, відповідно, на виході підсилювача *П* зростає, у результаті чого на виході перетворювача *ПН* рис. 9.2.

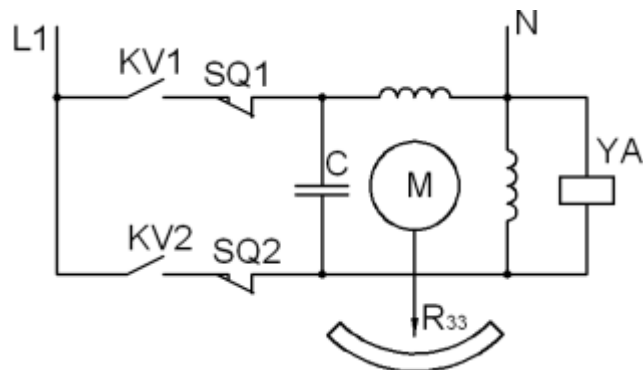


Рис. 9.2 – Принципіальна електрична схема керування однооборотним виконавчим механізмом

Принципіальна електрична схема керування однооборотним виконавчим

механізмом напруга  $U_{nn}$  збільшується. Відбудеться автоматична компенсація зниження кутової швидкості.

У режимі неперервних струмів статична характеристика тиристорного перетворювача напруги близька до лінійної:

$$U_{nn} = k_n U_{ex},$$

де  $k_n = U_{nn}/U_{ex}$  – коефіцієнт передачі перетворювача з підсилювачем.

Рівняння механічної характеристики електродвигуна при  $\Phi = \Phi_{ном}$  має вигляд:

$$M = \beta \delta (\omega_0 - \omega),$$

де  $\beta \delta = c_2 / R_{я\Sigma}$  – жорсткість механічної характеристики електродвигуна;  $R_{я\Sigma}$  – сумарний опір кола якоря. Підставивши у рівняння механічної характеристики електродвигуна вираз для швидкості ідеального холостого ходу,

$$\omega_0 = kn' (U_3 - k_{зи}\omega),$$

де  $k_n' = k_n / c_{ном}$ ;  $\omega_0 = U_n / c_{ном}$ ;  $c_{ном}$  – коефіцієнт ЕРС двигуна при номінальному магнітному потоці.

Отримаємо рівняння статичної механічної характеристики:

$$\omega = \frac{k_n' \cdot U_3}{1 + k_{зи} k_n'} - \frac{1}{\beta \delta (1 + k_{зи} k_n')} M = \omega_{0зи} - \frac{M}{\beta_{зи}},$$

Як впливає із виразу, збільшення коефіцієнта зворотного зв'язку  $k_{зи}$  при однакових інших умовах призводить до зменшення кутової швидкості ідеального холостого ходу та збільшення жорсткості характеристики (рис. 9.3).

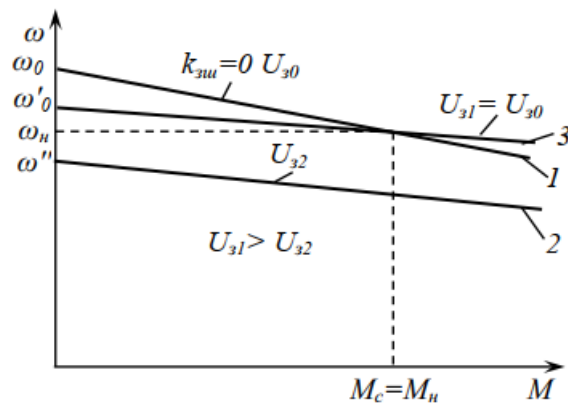


Рис. 9.3 – Механічні характеристики ДПС НЗ замкнутої системи з від'ємним зворотним зв'язком за кутовою швидкістю

Механічна характеристика 1 є природною при відсутності зворотного зв'язку, тобто у розімкненій системі. Задаючий сигнал при цьому  $U_{30}$  такої величини, при якій напруга перетворювача ПН дорівнює номінальній. При введенні сигналу зворотного зв'язку знаменник правої частини виразу збільшується і, як відзначалося, зменшується швидкість ідеального холостого ходу при одночасному збільшенні жорсткості механічної характеристики 3. При досить великому значенні загального коефіцієнта підсилення механічна характеристика наближається до абсолютно жорсткої, що дає можливість збільшити діапазон регулювання до 2000 : 1.

Оскільки  $k_n' \neq \infty$ , то в системі існує статична похибка регулювання, величина якої залежить від коефіцієнта зворотного зв'язку за швидкістю. Тому доцільно вводити

додатний зворотний зв'язок за моментом (струмом якоря). Структурна схема замкненої системи з додатним зворотним зв'язком зображена на рис. 9.4.

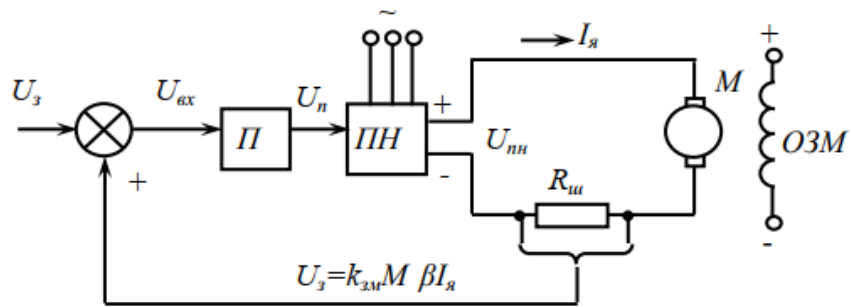


Рис. 9.4 – Структурна схема системи автоматичного регулювання кутової швидкості з жорстким додатним зворотним зв'язком за струмом

Сигнал зворотного зв'язку знімається з резистора – шунта  $R_{ш}$ . Вхідний сигнал на підсилювач  $\Pi$  у схемі з додатним зворотним зв'язком визначається залежністю:

$$U_{вх} = U_3 + k_{3m}M,$$

де  $k_{3m}$  – коефіцієнт зворотного зв'язку за моментом.

Тоді для швидкості ідеального холостого ходу двигуна можна записати:

$$\omega_0 = k_n'(U_3 + k_{3m}M),$$

а статична механічна характеристика має вигляд:

$$\omega = k_n'U_3 - \frac{1 - \beta_0 k_n' k_{3m}}{\beta_0} M,$$

Якщо вважати добуток коефіцієнтів  $\beta_0 k_n' k_{3m}$  незмінним, то залежність рівняння статичної механічної характеристики є лінійною. Змінюючи величину опору  $R_{ш}$ , змінюють величину коефіцієнта зворотного зв'язку. Як додатковий опір  $R_{ш}$  іноді використовують обмотку додаткових полюсів та компенсаційну обмотку електродвигуна.

Стабілізація напруги на виході перетворювача  $\Pi Н$  здійснюється за рахунок подачі на вхід підсилювача узгодженого із задаючим сигналу зворотного зв'язку. При збільшенні навантаження збільшується спад напруги на опорі  $R_{ш}$ , сигнал з якого узгоджено подається на вхід підсилювача. Напруга на виході автоматично зростає. Жорсткість механічних характеристик в цій замкненій системі залежить від величини сигналу зворотного зв'язку. Так, при  $k_{3m}=0$  має місце механічна характеристика  $1$  розімкненої системи (рис. 9.5).

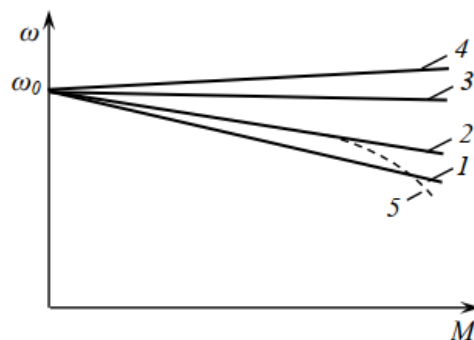


Рис. 9.5 – Механічні характеристики ДПС НЗ в замкненій системі з додатним зворотним зв'язком за струмом: 1 –  $k_{zm}=0$ ; 2 –  $\beta \partial k_n' k_{zm} < 1$ ; 3 –  $\beta \partial k_n' k_{zm} = 1$ ; 4 –  $\beta \partial k_n' k_{zm} > 1$ ; 5 –  $\beta \partial k_n' k_{zm} = \text{var}$

При співвідношенні  $\beta \partial k_n' k_{zm} < 1$  характеристика 2 має більшу жорсткість, ніж характеристика 1. При  $\beta \partial k_n' k_{zm} = 1$  характеристика 3 має нескінченно велику жорсткість (паралельна осі моментів) і нарешті при  $\beta \partial k_n' k_{zm} > 1$  характеристика 4 має додатний коефіцієнт жаркості. Слід відзначити, що реальних замкнених системах з додатним зворотнім зв'язком коефіцієнт передачі  $\beta \partial k_n' k_{zm}$  при певному значенні струму якоря (моменті) зменшується і тому механічні характеристики втрачають лінійність (характеристика 5). Ось чому зворотні додатні зв'язки за струмом використовують у поєднанні з від'ємними зворотними зв'язками за швидкістю.

В комбінованій системі регулювання швидкість ідеального холостого ходу двигуна визначається рівнянням:

$$\omega_0 = k_n'(U_3 - k_{zm}\omega + k_{zm}M),$$

а рівняння статичної механічної характеристики має вигляд:

$$\omega = \frac{k_n' U_3}{1 + k_n' k_{zm}} - \frac{1 - \beta \partial k_n' k_{zm}}{\beta \partial (1 + k_n' k_{zm})} M,$$

Застосування додатного зворотного зв'язку за моментом у комбінованій системі регулювання швидкості дає можливість до нескінченності збільшити модуль жорсткості механічної характеристики шляхом підбору  $k_{zm}$  за умовою  $\beta \partial k_n' k_{zm} = 1$ . Таким чином, виключається статична похибка при збереженні динамічних показників регулювання, які визначаються коефіцієнтом підсилення і зворотного зв'язку за швидкістю.

У системі автоматичного регулювання моменту ДПС НЗ застосовується від'ємний зворотний зв'язок за моментом (струмом якоря). На вході підсилювача  $\Pi$  (рис. 9.4) формується різниця задаючого сигналу  $U_3$  та сигналу зворотного зв'язку  $k_{zm}M$ :

$$U_{ex} = U_3 - k_{zm}M.$$

Для даної системи можна записати:

$$\begin{aligned} \omega_0 &= k_n'(U_3 - k_{zm}M), \\ M &= \beta \partial (\omega_0 - \omega). \end{aligned}$$

Розв'язавши  $(\omega_0)$  і  $(M)$  відносно  $\omega$ , отримуємо рівняння статичної механічної характеристики електродвигуна:

$$\omega = k_n' U_3 - \frac{1 + \beta \partial k_n' k_{zm}}{\beta \partial} M,$$

Як впливає із виразу, збільшення коефіцієнта зворотного зв'язку за моментом  $k_{zm}$  призводить до зменшення жорсткості механічної характеристики (рис. 9.6).

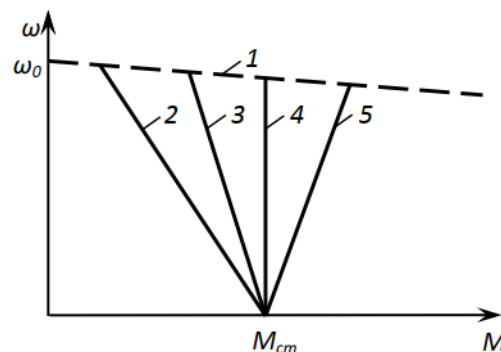


Рис. 9.6 – Механічні характеристики ДПС НЗ: 1 – природна; 2 – з від’ємним зворотним зв’язком за моментом; 3,4,5 – з від’ємним зворотним зв’язком за моментом і додатним зворотним зв’язком за швидкістю при  $kn'k_{зм} < 1$  (3),  $kn'k_{зм} = 1$  (4),  $' > 1 kn'k_{зм}$  (5)

При необмеженому його зростанні жорсткість механічної характеристики наближується до нуля. У даній системі статична точність регулювання моменту обмежена сильним збуренням, викликаним зміною швидкості. Тому для зменшення залежності моменту від швидкості двигуна вводять додатний зворотний зв’язок за швидкістю.

Рівняння статичної механічної характеристики для комбінованої системи регулювання моменту отримують із рівнянь:

$$\begin{aligned} \omega_0 &= kn' (U_3 + k_{зм}\omega - k_{зм}M), \\ \beta_0(\omega_0 - \omega) &= M, \end{aligned}$$

де  $k_{зм}$  – коефіцієнт зворотного зв’язку за швидкістю.

Звідси

$$\omega = \frac{k_n' U_3}{1 - k_n' k_{зм}} - \frac{1 + \beta_0 k_n' k_{зм}}{\beta_0 (1 - k_n' k_{зм})} M$$

Як впливає із , модуль статичної жорсткості механічної характеристики у замкненій системі залежить від коефіцієнта зворотного зв’язку за швидкістю. При зростанні  $k_{зм}$  жорсткість механічної характеристики зменшується і при критичному значенні коефіцієнта додатного зворотного зв’язку за швидкістю  $k_{зм-кр} = 1 / k_n'$  стає рівним нулю. При цьому статична похибка, викликана зміною швидкості, виключається, і система забезпечує регулювання моменту без введення у коло регулювання регуляторів з інтегральною характеристикою. Подальше збільшення коефіцієнта зворотного зв’язку за швидкістю призводить до зміни знаку жорсткості механічної характеристики.

## 9.2. Типові структури замкнених систем автоматичного керування електроприводами постійного струму

Застосування зворотних зв’язків у системі перетворювач – двигун (П – Д) дає можливість отримати не лише жорсткі механічні характеристики двигуна, а і забезпечити бажану якість перехідних процесів при пуску, гальмуванні та реверсуванні двигунів. Найчастіше в системах П – Д до процесів пуску і гальмування ставлять вимоги отримання мінімального часу перехідного процесу. Дана вимога забезпечується тоді, коли момент двигуна підтримується на більшій частині перехідного процесу приблизно постійним, близьким до максимального, а на початку та у кінці перехідного процесу зростання і спадання моменту відбувається плавно, аледосить швидко. Для цього в системах П – Д застосовують: від’ємний зворотний зв’язок за струмом з відсічкою при неперервному від’ємному зворотному зв’язку за швидкістю; від’ємний зворотний зв’язок за струмом з відсічкою і швидкістю з відсічкою; гнучкими зворотними зв’язками; задатчиками інтенсивності.

Найчастіше застосовують задатчик інтенсивності (рис. 9.7), напруга на виході якого змінюється у часі за лінійним законом. При цьому за лінійним законом змінюється швидкість ідеального холостого ходу двигуна.

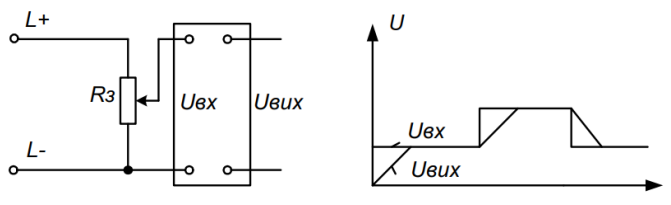


Рис. 9.7 – Задатчик інтенсивності

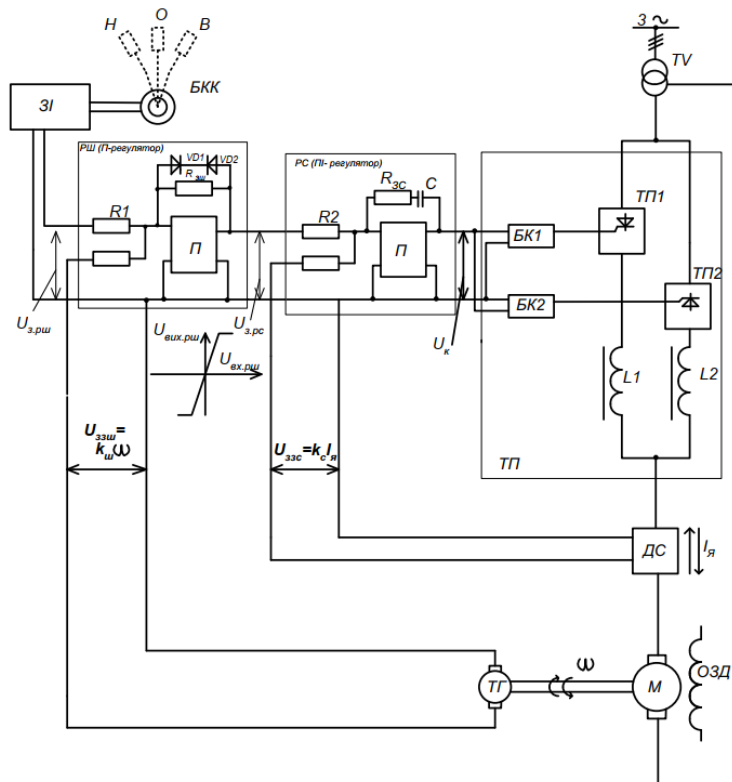


Рис. 9.8 – Принципіальна схема системи ТПН-Д з підлеглим регулюванням

На рис. 9.8 наведена схема системи ТПН – Д з підлеглим регулюванням та послідовною корекцією. Обмотка якоря двигуна отримує живлення від реверсивного тиристорного перетворювача ТП. Тахогенератор ТГ здійснює від’ємний зворотний зв’язок за швидкістю. Задавальний сигнал системи  $U_{зрш}$ , який поступає від безконтактного командоконтролера БКК, порівнюється із сигналом зворотного зв’язку за швидкістю  $U_{ззш} = k_{ш}\omega$ . Результуючий сигнал подається на вхід П-регулятора швидкості РШ, на виході якого формується сигнал, пропорційний вхідному. У схемі також сформований внутрішній замкнений контур регулювання струму якоря двигуна. Для цього сигнал  $U_{зс} = k_{с}I_{я}$ , пропорційний струму якоря, від датчика струму подається на вхід П-регулятора струму РС, де порівнюється із вихідним сигналом регулятора швидкості, який є задаючим сигналом для регулятора струму. На виході регулятора струму формується сигнал керування тиристорним перетворювачем. Для обмеження струму якоря регулятор струму РС виконується з «насиченням», тобто з відповідним обмеженням його вихідного сигналу.

Для пуску двигуна командоконтролер БКК із нейтрального положення переводять у положення «Вперед». Оскільки при пуску двигуна величина сигналу розбалансу велика, то регулятор швидкості входить у зону насичення. Контур регулювання швидкості закривається, а вступає в дію контур регулювання струму. Двигун розганяється при практично постійному струмі якоря. По мірі розгону двигуна зростає сигнал від

тахогенера. При швидкості, близькій до заданої, регулятор швидкості виходить із зони «насичення» і вступає в дію зворотний зв'язок за швидкістю. Двигун переходить працювати в усталений режим роботи при постійній швидкості і струму, які відповідають моменту статичних опорів на валу двигуна  $M_c$ .

Для реверсування двигуна командоконтролер ставлять у положення «Назад». При цьому змінюється полярність задаючого сигналу, і регулятор швидкості входить у зону «насичення». Перетворювач почне працювати в інверторному режимі, а струм якоря, змінивши напрям, стане гальмівним і завдяки регулятору струму буде підтримуватися на рівні стопоріння  $I_{яст}$ . Відбувається рекуперативне гальмування двигуна і подальший його розгін в іншу сторону. При установці командоконтролера в нульове положення відбувається рекуперативне гальмування двигуна до його зупинки.

Рівняння механічної характеристики двигуна на ділянці роботи регулятора швидкості знаходять за умовою:

$$U_{zc} = k_c I_{я} = U_{zpc} = (U_{зрш} - k_{ш} \omega) k_{рш},$$

де  $k_c$  – коефіцієнт зворотного зв'язку за струмом;  $k_{ш}$  – коефіцієнт зворотного зв'язку за швидкістю;  $k_{рш}$  – коефіцієнт передачі регулятора швидкості.

Тоді

$$\omega = \frac{U_{зрш}}{k_{ш}} - I_{я} \frac{k_c}{k_{ш} k_{рш}},$$

Жорсткість механічної характеристики на даній ділянці визначається співвідношенням параметрів  $k_c$ ,  $k_{ш}$ ,  $k_{рш}$  і може бути достатньо високою. На ділянці роботи регулятора струму, як зазначалося раніше,  $I_{я} = I_{яст}$ . Механічна характеристика електродвигуна показана на рис. 9.9.

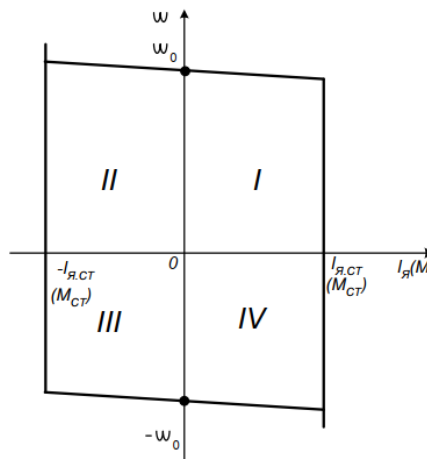


Рис. 9.9 – Статичні характеристики в системі ТПН-Д з підлеглим регулюванням

У замкнених системах керування електроприводами все частіше застосовуються мікроконтролери та мікро-ЕОМ. Мікро-ЕОМ виконує функції регулятора швидкості, керуючи тиристорними перетворювачами напруги у колах якоря і збудження, забезпечує захист двигуна при аварійних режимах, контроль і індикацію стану запобіжників і блоків у колах електропривода.

Функціональна схема типового електропривода з мікропроцесорною системою керування показана на рис. 9.10.



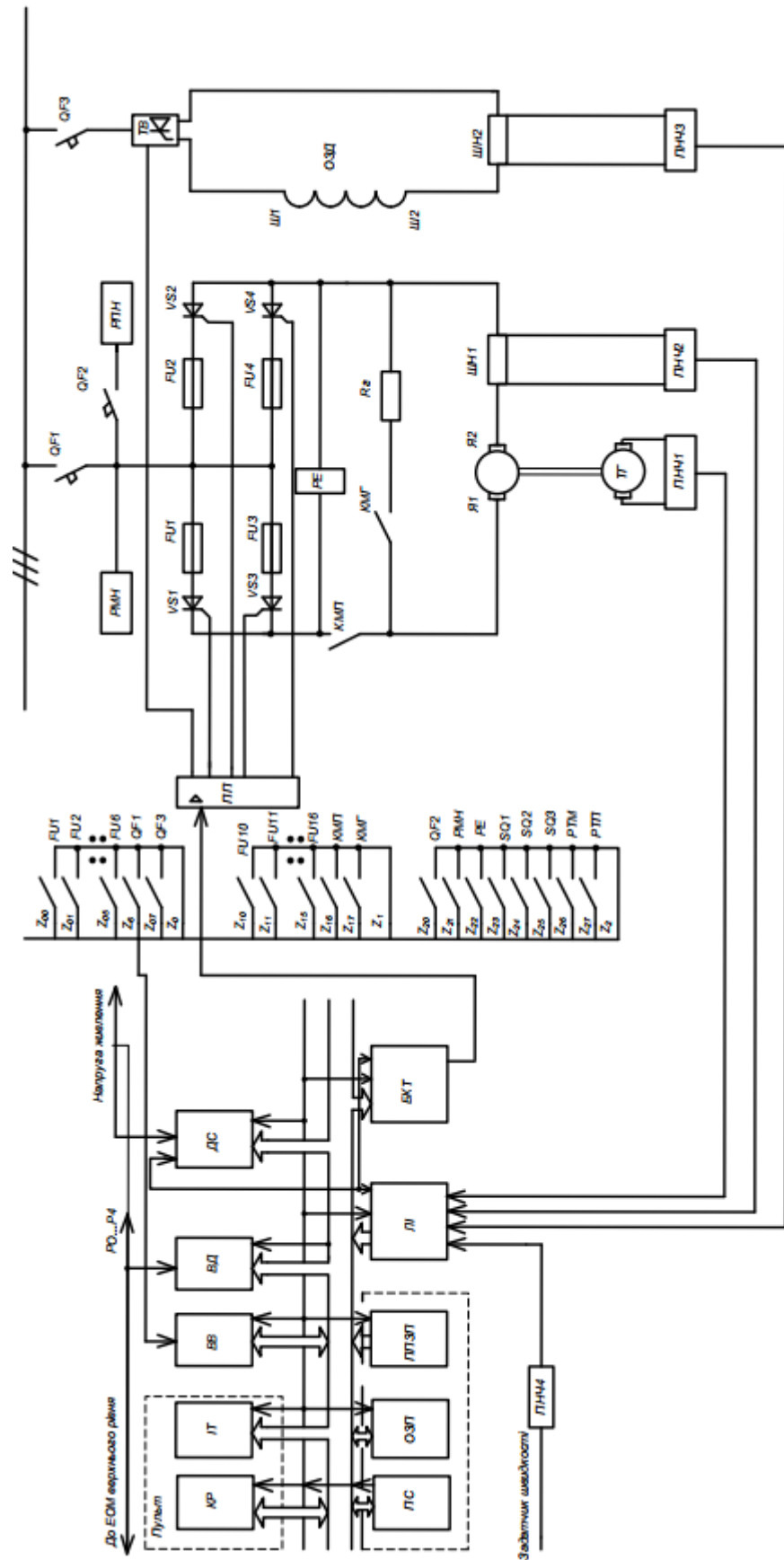


Рис. 9.10 – Структурна схема мікропроцесорної системи ТЕП

Силова частина привода складається із реверсивного тиристорного перетворювача  $VS1-VS4$  та тиристорного збудника  $TZ$ , від якого отримує живлення обмотка збудження.

Напруги з шунтів  $ШН1$  і  $ШН2$  у колах якоря та збудження, тахогенератора  $ТГ$  і задатчика швидкості в  $ПНЧ$  перетворюються в частоту слідування прямокутних імпульсів. Обробка сигналів з перетворювачів  $ПНЧ$  здійснюється у лічильнику імпульсів  $Л$ . Для синхронізації процесів вимірювань і обчислень система обладнана датчиком синхронізації  $ДС$ . Блок керування тиристорами  $БКТ$  через підсилювач потужності  $ПП$  забезпечує відкривання відповідного тиристора.

Пристрій введення сигналів  $ВВ$  забезпечує введення 64 біт інформації групами з восьми сигналів із захисних апаратів (запобіжників  $FU$ , реле мінімальної напруги  $РМН$ , реле зниженого тиску мастила у підшипниках двигуна  $РТМ$ , реле підвищеної температури підшипників двигуна  $РТП$ ), із сигнальних контактів комутаційних апаратів (автоматичних вимикачів силової мережі змінного струму  $QF1$ , у колі захисту від перенапруги  $QF2$ , у силовому колі тиристорного збудника  $QF3$ , контакторів у колі якоря  $КМП$  та динамічного гальмування  $КМГ$ ), із блокувальних апаратів (реле ЕРС  $РЕ$ , кінцевих вимикачів  $SQ1, SQ2$ , обмежуючих переміщення робочого органу, та  $SQ3$ , який фіксує початкове положення робочого органу).

Пристрій виведення даних  $ВД$  видає дискретні сигнали для керування блокуваннями електропривода та цифрового сигналу в послідовному коді до ЕОМ верхнього рівня або в систему керування іншими агрегатами технологічної лінії:  $P0$  – дозвіл на вмикання контактора у колі якоря,  $P1$  – дозвіл вмикання контактора динамічного гальмування,  $P2$  – сигнал «Несправність»,  $P3$  – сигнал «Аварія», які передаються до схеми зовнішньої сигналізації,  $P4$  – сигнал вмикання автоматичних вимикачів  $QF1$  і  $QF3$ .

Пульт керування складається із клавішного регістру  $КР$  та індикаційного табло  $ІТ$ , на якому висвічується вміст оперативного запам'ятовуючого пристрою  $ОЗП$ .

Передбачено можливість перепрограмування постійно запам'ятовуючого пристрою  $ППЗП$  при непрацюючому приводі.

Замкнена система регулювання кутової швидкості асинхронних двигунів зміною напруги на статорі дає можливість одержати якісно нові характеристики електропривода. Якщо в розімкненій системі робота двигуна при ковзанні більше критичного є статично нестійкою, то в замкненій системі при згаданому ковзанні робота двигуна може бути стійкою.

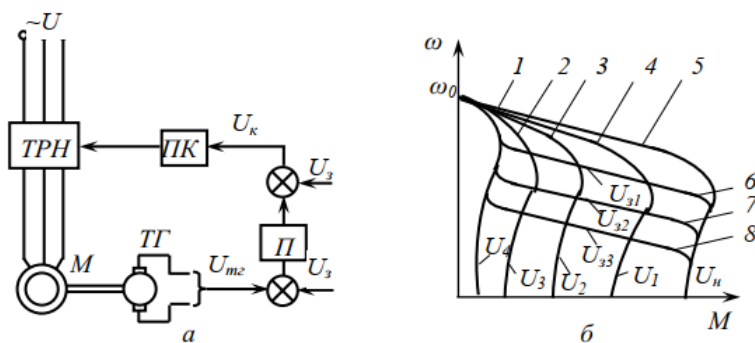


Рис. 9.11 – Регулювання кутової швидкості асинхронного двигуна зміною напруги на статорі у замкненій системі:  $a$  – схема регулювання;  $b$  – механічні характеристики:  $1 - 5$  – у розімкненій системі  $U_n > U_1 > U_2 > U_3 > U_4$ ;  $6 - 8$  – у замкненій системі  $U_{31} > U_{32} > U_{33}$ ;  $П$  – підсилювач;  $ПК$  – пристрій керування

Як випливає з рис. 9.11, б переважувальна здатність двигуна в замкненій системі є високою, жорсткість характеристик стала, плавність регулювання висока, діапазон регулювання має значення до 10. Схема системи регулювання кутової швидкості проста. Але разом з цим у неї є суттєвий недолік. При низьких частотах обертання двигуна зростають значення ковзання і, як наслідок, великі втрати потужності. В тривалому режимі роботи двигун буде перегріватись. Якщо при цьому використовується двигун з фазним ротором і у роторне коло увімкнений додатковий резистор, то двигун не буде перегріватися.

Асинхронні двигуни з короткозамкненим ротором у замкнених системах регулювання кутової швидкості зміною напруги на статорній обмотці використовують в установках, де низькі швидкості відпрацьовуються короткочасно перед зупинкою механізму. У тривалому режимі даний спосіб регулювання не використовується внаслідок перегрівання двигуна при великих значеннях ковзання.

Тиристорні регулятори напруги можуть мати реверсивне виконання, а також здійснювати динамічне гальмування. Напруга на виході тиристорного перетворювача напруги несинусоїдальна, залежить від кута регулювання  $\alpha$  та від кута активно-індуктивного навантаження  $\varphi$ , яким для тиристорного перетворювача напруги є асинхронний двигун при певних ковзаннях. Електромагнітний момент двигуна визначається першою гармонікою напруги, а впливом вищих гармонік можна знехтувати. Статичні характеристики тиристорного перетворювача напруги (рис. 9.12) є нелінійними та неоднозначними у зв'язку із суттєвою залежністю напруги від кута навантаження.

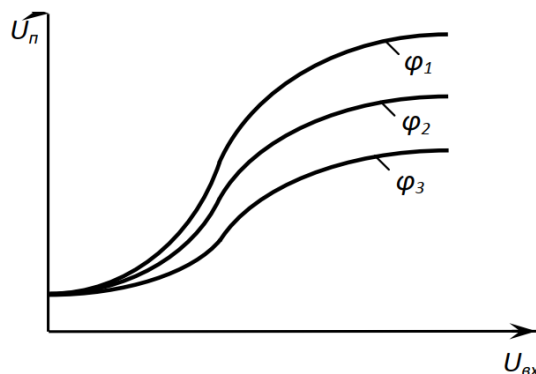


Рис. 9.12 – Статичні характеристики тиристорного перетворювача напруги

При  $s_k < s < 1$  зміни кута  $\varphi$  є несуттєвими і знаходяться у межах 40-60°. Для цієї області статичну характеристику перетворювача можна лінеаризувати:

$$U_n = k_n U_{ox} = k_n (U_3 - k_{zu} \omega),$$

де  $k_n$  – коефіцієнт передачі тиристорного перетворювача напруги,  $k_{zu}$  – коефіцієнт зворотного зв'язку за швидкістю.

Момент асинхронного електродвигуна пропорційний квадрату напруги. Але для режимів малих відхилень від точки статичної рівноваги дану залежність можна лінеаризувати:

$$M = k_M U$$

Підставивши ( $U_n$ ) у ( $M$ ), отримаємо рівняння механічної характеристики електродвигуна:

$$\omega = \frac{U_3}{k_{\omega}} - \frac{M}{k_m k_n k_{\omega}} = \omega_{03} - \frac{M}{\beta_3},$$

Таким чином, при прийнятих допущеннях у замкненій системі формується лінійна механічна характеристика зі швидкістю ідеального холостого ходу і жорсткістю, які визначаються коефіцієнтом зворотного зв'язку за швидкістю  $k_{\omega}$ . При досить великих значеннях  $k_{\omega}$  рівняння ( $\omega$ ) задовільно описує реальну механічну характеристику. Як показано на рис. 9.11, б відмінності виявляються лише у режимі, близькому до холостого ходу, і при значеннях напруги, близьких до номінальної.

Частотно-регульовані приводи мають високі показники: діапазон регулювання, плавність, коефіцієнт жорсткості механічних характеристик. Робота на штучних механічних характеристиках відбувається при ковзаннях, близьких до номінальних. Отже, втрати ковзання в роторі не перевищують номінальних.

У замкненій системі регулювання частотний привод автоматично підтримує перевантажувальну здатність та частоту обертання в заданих межах. Структурна схема замкненої системи автоматичного частотного регулювання зображена на рис. 9.13. У схемі використовується перетворювач частоти з автономним інвертором струму *AIC*, що дає можливість без доповнення схеми переводити двигун *M* в режим рекуперативного гальмування. Схема має від'ємний зворотний зв'язок за кутовою швидкістю (сигнал  $U\omega$ ) та від'ємний зворотний зв'язок за струмом (сигнал  $Ui$ ), що формується датчиком струму *ДС*. Керований випрямляч *KB* та автономний інвертор струму *AIC* мають відповідні системи керування *СКВ* та *СКИ*.

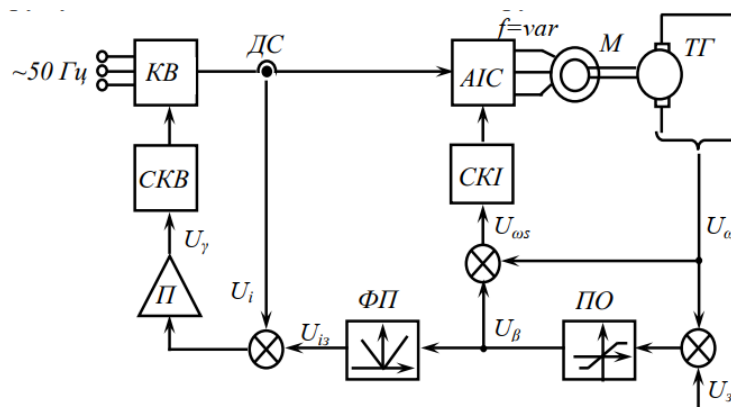


Рис. 9.13 – Спрощена схема замкненої системи частотного регулювання кутової швидкості асинхронного двигуна

Частота струму регулюється задавальним сигналом  $U_3$ . Різниця сигналів  $U_3$  і  $U\omega$  дає сигнал абсолютного ковзання  $U\beta$ , який, пройшовши через пристрій обмеження *ПО*, додається до сигналу  $U\omega$  і у результаті формується сигнал  $U\omega_s$  на вході *СКИ*. Крім того, сигнал  $U\beta$  після функціонального перетворювача *ФП* створює задавальний сигнал за струмом  $Ui_s$ . Останній разом із сигналом зворотного зв'язку за струмом  $Ui$  надходить через підсилювач *П* на вхід системи керування вентилями у вигляді сигналу  $U\gamma$ .

Пристрій обмеження *ПО* формує вихідний сигнал  $U\beta$ , лінійний при певних значеннях задаючого сигналу і сигналу зворотного зв'язку. При різкому зростанні  $U_3$  або перевантаженні двигуна *ПО* обмежує сигнал  $U\beta$ , а значить і  $Ui_s$ . У цьому режимі обмежується момент і характеристика двигуна стає абсолютно м'якою.

При частотному регулюванні швидкості необхідно змінювати напругу для забезпечення незмінною перевантажувальною здатністю двигуна та формування рівномірно прискореного протікання перехідних процесів. Тому система автоматичного регулювання швидкості повинна містити контур регулювання моменту, яке здійснюється за рахунок зміни напруги на статорі. У данному випадку механічна характеристика електродвигуна у замкненій системі регулювання при певних допущеннях описується рівнянням ( $\omega$ ).

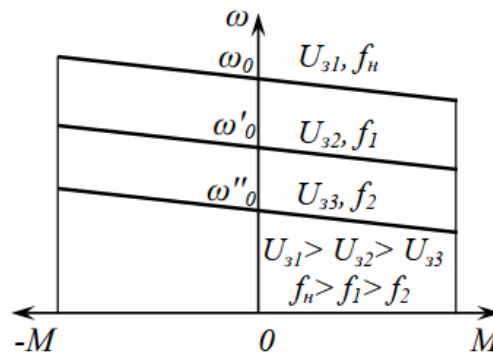


Рис. 9.14 – Механічні характеристики асинхронного двигуна в замкненій системі при частотному регулюванні

Таким чином, у замкненій системі частотного регулювання швидкості формується лінійна механічна характеристика зі швидкістю ідеального холостого ходу і жорсткістю, які визначаються коефіцієнтом зворотного зв'язку за швидкістю  $k_{\omega}$ . Орієнтовні механічні характеристики при частотному регулюванні кутової швидкості зображені на рис. 9.14. Діапазон регулювання становить близько 30:1.

#### Завдання на самостійне опрацювання та підготовку

1. Самостійно відновити матеріал по основним поняттям та визначенням;
2. Самостійно опрацювати матеріал з опису: Апарати захисту електроприводів від аварійних і аномальних режимів.

### ТЕМА №10. ДІАГНОСТИКА, ЗАХИСТ І МОНІТОРИНГ ЕЛЕКТРОМЕХАНІЧНИХ СИСТЕМ

Мета: ознайомити здобувачів початкового рівня вищої освіти з описом основних функцій та апаратура захисту ЕМС із розімкненим керуванням; узгодження функцій апаратури керування та захисту; проблема захисту тиристорних електроприводів постійного струму; захист від аварійних струмів; захист, діагностика та моніторинг частотно-керованих електроприводів змінного струму.

#### План лекції

- 10.1. Основні функції та апаратура захисту ЕМС із розімкненим керуванням;
- 10.2. Узгодження функцій апаратури керування та захисту;
- 10.3. Проблема захисту тиристорних електроприводів постійного струму;
- 10.4. Захист, діагностика та моніторинг частотно-керованих електроприводів змінного струму.

## Хід проведення лекційного заняття

- I. Організація групи;
- II. Мотивація навчальної діяльності. Оголошення теми й мети;
- III. Викладення та обговорення нового матеріалу.
- IV. Оголошення завдання на самостійне опрацювання та підготовку.

### **10.1. Основні функції та апаратура захисту ЕМС із розімкненим керуванням**

При роботі будь-якої електромеханічної системи виникають аварійні ситуації, зумовлені дією різних внутрішніх та зовнішніх чинників. Цілком зрозуміло, що для забезпечення тривалої працездатності електромеханічної системи, а також для попередження тяжких наслідків від розвитку аварійної ситуації система автоматичного керування має виконувати функцію діагностики стану обладнання і в разі появи нештатної або аварійної ситуації виконувати низку дій, зокрема вимикання електрообладнання від мережі живлення.

Технічно грамотно виконана система діагностики стану обладнання та апаратура захисту дають змогу збільшити час між планово-запобіжними ремонтами обладнання та уникнути істотних витрат на усунення наслідків аварії.

У практиці широке застосування мають схеми релейно-контакторного керування електроприводами, де застосовується типова апаратура діагностики та захисту.

Нині на електротехнічному ринку пропонується нова і більш досконала, надійна апаратура, що розширює функціональні можливості для діагностики та захисту електрообладнання.

Особливу увагу слід звернути на організацію захисту замкнених систем автоматичного керування з електроприводами. По-перше, це пояснюється складністю електромеханічної системи та різноманітністю її компонентів, По-друге, широке застосування в електроприводах силових перетворювачів на базі повністю керованих тиристорів GTO і транзисторів IGBT потребує застосування нових принципів та засобів захисту таких напівпровідників. Потрете, ці сучасні системи використовують мікропроцесорні засоби для керування і діагностики обладнання. Потужна мікропроцесорна техніка в поєднанні з принципово новими пристроями для вимірювання дають змогу проводити постійний контроль за станом як силового обладнання, так і пристроїв керування із постачанням необхідної інформації обслуговуючому персоналу.

Такий новий підхід до діагностики стану обладнання дістав назву моніторингу системи. Постійний моніторинг системи дає можливість передбачити виникнення нештатних ситуацій і запобігти розвитку тяжких аварійних ситуацій, а також проводити аналіз статистичних даних, одержаних після аварій і несанкціонованих відмикань електрообладнання від джерела живлення.

Відомо, що під час роботи електропривода можуть виникати аварійні ситуації, причини яких мають механічну або електричну природу.

Аварійні ситуації механічного походження виникають у разі:

- \* блокування ротора електричної машини;
- \* механічного перевантаження (короткочасного або тривалого).

Ці ситуації спричиняють зростання струму двигуна і, як наслідок, небезпечне нагрівання обмоток. Якщо таке перевантаження не ліквідувати, це може призвести врешті-решт до виходу із ладу двигуна, розплаву ізоляції силових провідників, небезпеки

загоряння і пожежі.

Аварійні ситуації електричною походження Виникають у разі наявності:

» перенапруги, низької напруги, нерівномірного навантаження фаз, обриву фази, що спричинюють зростання струму живлення і струму обмоток двигуна;

\* Струмів короткого замикання, що можуть перевищити комутувальну здатність контактів комутувальної апаратури (контакторів). Отже, апаратура захисту від перевантажень та коротких замикань має захистити мережу живлення (кабель або провідники), пристрій комутації двигуна (наприклад, контактор) і сам двигун, забороняючи його роботу протягом тривалого часу зі струмом, що перевищує номінальне значення. У той же час ця апаратура має забезпечити нормальний пуск двигуна, враховуючи наявність пускових струмів під час подачі напруги живлення. Крім того, апаратура захисту має бути спроможною захистити себе (залишатися в працездатному стані після усунення аварійної ситуації), У протилежному випадку її слід поєднати з іншим захисним пристроєм.

В електроприводах із релейно- контакторним керуванням для виконання функцій захисту застосовується така апаратура та пристрої:

\* для захисту від незначних тривалих перевантажень — теплове реле, зонди-термістори (РТС) (останні встановлюються всередині електричної машини для контролю температури нагрівання);

\* для захисту від значних перевантажень — електромагнітні реле;

\* для захисту від коротких замикань — запобіжники;

\* для захисту від обриву фази — диференціальне теплове реле, секціонер із відповідним механізмом і запобіжниками;

\* для захисту від зникнення напруги живлення — контактор з автоживленням або реле мінімальної напруги;

\* для захисту від затяжного пуску або частих пусків — пристрій із термісторами РТС, теплове реле і спеціальна схема його підмикання, що не дає змоги передчасному спрацюванню реле.

Крім цих пристроїв, нині широко використовують апаратуру багатофункціонального призначення. До неї слід віднести насамперед автоматичні вимикачі, що виконують три основні функції:

- секціонування двигуна, тобто його електричне вимикання від мережі, що дає можливість безпечного доступу і роботи з двигуном під час профілактики;

- подачу живлення;

- функціональне керування двигуном (операції «пуск—стоп»).

Пристрій реалізує функцію електричного захисту від перевантажень та коротких замикань: вимикання струмів перенавантаження у функції часу, а також ліквідування в найкоротший час струмів короткого замикання. Крім того, пристрій може забезпечити захисне вимикання, що є обов'язковим у разі виникнення небезпеки для обслуговуючої персоналу (аварійна зупинка або відсутність напруги).

Останнім часом з'явилися автоматичні вимикачі спеціального виконання, які інтегрують у собі всі необхідні функції для керування і захисту двигунів;

- секціонування;

- керування;

- захист від коротких замикань із великими струмами;

- захист від перевантажень, нерівномірних завантажень фаз;

- захист від коротких замикань із малими струмами;
- сигналізація і діалог із засобами автоматизації (промисловими контролерами або комп'ютерами).

Ці вимикачі поєднують у собі найкращі характеристики спеціалізованих апаратів:

- повну видимість електричного розмикання кола;
- високу розривну здатність із властивістю обмеження струму короткого замикання;
- надійність і високу механічну стійкість контактора;
- вдосконаленість і точність спрацьовування сучасного теплового реле захисту.

Прикладами таких автоматичних вимикачів для прямого пуску асинхронних короткозамкнених двигунів слугують пристрої типу PKZ2 виробництва Moeller для двигунів із потужністю до 20 кВт при напрузі живлення 380 В і пристрої серії Integral 18,32,63 (Schneider Electric) для двигунів із потужністю до 33 кВт при напрузі живлення також 380 В.

До класу багатофункціональних пристроїв захисту слід віднести і спеціальні мікропроцесорні реле захисту. Такі реле забезпечують захист від перевантаження двигуна, і асиметрії або випадання фаз. Крім того, при використанні термісторів РТС забезпечується захист двигуна від перегрівання, а при застосуванні спеціального трансформатора, що дає змогу контролювати суму миттєвих фазних струмів, — захист від короткого замикання на землю. Прикладом розглянутого реле є реле ZEV виробництва Moeller на струми 1...800 А.

Схему відімкнення мікропроцесорного реле типу ZEV до схеми керування асинхронним двигуном наведено на рис. 10.1.

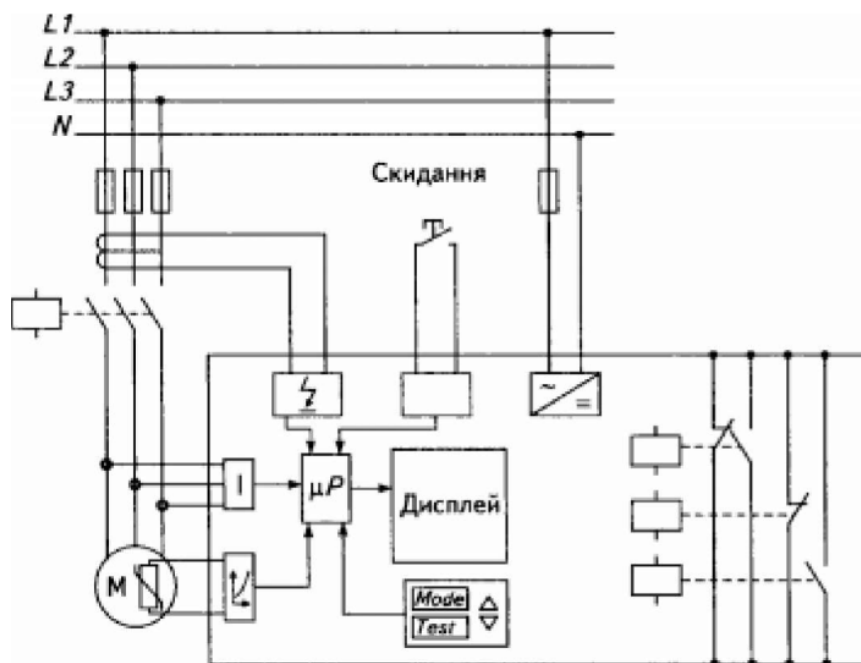


Рис. 10.1 – Схему відімкнення мікропроцесорного реле типу ZEV до схеми керування асинхронним двигуном

Перевагою цього реле є те, що воно дає можливість захистити двигуни з різними умовами пуску шляхом вибору відповідної кривої спрацьовування теплового захисту



(пропонується вісім стандартних класів кривих спрацьовування: клас 5, 10, 15..., 40). Використовуючи дисплей реле, можна за допомогою меню налагодити відповідні параметри. На дисплеї з'являються відображення несправності та причини, що її викликали.

Крім того, за допомогою двох додаткових контактів можна вивести на зовнішнє коло інформацію про перевантаження, замикання на землю, термісторне вимикання, внутрішню несправність приладу.

Іншим прикладом електричного захисту може слугувати багатофункціональне мікропроцесорне реле типу LT6-P (виробництва Schneider Electric) для захисту та керування асинхронним двигуном. Це реле розраховано на напругу 380 - 400 В і струми до 800А (за використання додаткових трансформаторів струму).

Реле LT6-P забезпечує такі додаткові функції захисту, як захист від низької напруги живлення, від роботи двигуна к недонавантаженням, контроль за часом пуску. Реле надає можливість проведення моніторингу напруги живлення, струму фаз статора,  $\cos\phi$ . За його допомогою можна реалізувати керування прямим пуском двигуна, реверсом двигуна, пуском за схемою зірка—трикутник.

За допомогою спеціального програмного забезпечення, використовуючи послідовний порт, можна підімкнути реле до мережі та організувати обмін інформацією з комп'ютером (програмування реле та постійний моніторинг двигуна: контроль за миттєвими значеннями напруги, струму, частоти, тепловим станом двигуна; надання статистики про причини та характер спрацьовування захисту тощо).

## **10.2. Узгодження функцій апаратури керування та захисту**

При реалізації схеми розімкненого керування привідним електродвигуном слід виконати електричне ізолювання або секціонування двигуна від мережі (для захисту обслуговуючого персоналу}, захистити силове коло (двигун і кабель живлення) під перевантажень та короткого замикання й реалізувати керування двигуном (пуск, стоп, реверсування і т. д.).

Функціональні можливості апаратури керування і захисту наведено в табл. 10.1.

Наявні національні й міжнародні норми потребують певної координації в роботі апаратури в разі виникнення режиму короткого замикання. Так, норми країн Європейського Союзу включають три типи координації в роботі комутувальної та захисної апаратури.

Координація типу 1. При коротких замиканнях контактор або автоматичний вимикач не повинен створювати небезпеки для персоналу чи обладнання. Якщо ж ця апаратура спрацювала, то для її відновлення необхідно відремонтувати чи замінити окремі вузли. Після виникнення короткого замикання електричний двигун ізолюється від мережі.

Координація типу 2. Ця координація при виникненні коротких замикань також вимагає, щоб контактор або автоматичний вимикач не створював небезпеки для персоналу чи обладнання. Апаратура має залишатися в працездатному стані. Якщо відбулося зварювання контактів контактора, то для приведення контактора у робочий стан необхідно виконати дії, наведені у відповідній інструкції. Після виникнення короткого замикання двигун відмикається від мережі. Зазначимо, що використання такої апаратури, як запобіжники, секціонер, контактор, теплове реле, дає змогу отримати координацію типу 2. Асоціація таких апаратів, як автоматичний вимикач з електромагнітним і тепловим

розчіплювачем, контактор або автоматичний вимикач з електромагнітним розчіплювачем (контактор—теплове реле забезпечує координацію типу 1 або 2 залежно від величини струму короткого замикання).

Таблиця №10.1

«Функціональні можливості апаратури керування і захисту»

| Функція                        | Пристрій |                           |                            |           |              |   |  |                                       |
|--------------------------------|----------|---------------------------|----------------------------|-----------|--------------|---|--|---------------------------------------|
|                                | Вимикач  | Вимикач під навантаженням | Секційне р з запобіжниками | Контактор | Теплове реле | Автоматичний вимикач з електромагнітним розчіплювачем | Автоматичний вимикач з електромагнітним і тепловим розчіплювачем | Автоматичний вимикач інтегрованої дії |
| Ізолювання                     | +        | +                         | +                          |           |              | +   | +  | +                                     |
| Розмикання під навантаженням   |          | +                         | +                          |           |              | +   | +  | +                                     |
| Захист від короткого замикання |          |                           | +                          |           |              |   | +  | +                                     |
| Захист від перевантажень       |          |                           |                            |           | +            |   | +  | +                                     |
| Керування                      |          |                           |                            | +         |              |   |  | +                                     |

Координація типу 3. Цю координацію забезпечує автоматичний вимикач багатофункціональної дії, котрий поєднує в собі функцію автоматичного вимикача, теплового реле і контактора. Цей пристрій забезпечує миттєву готовність по роботі після усунення причини виникнення короткого замикання.

Як приклад, на рис. 10.2 наведено схему прямого пуску асинхронного двигуна АД з використанням автоматичного вимикача серії Integral 32 типу LD4.

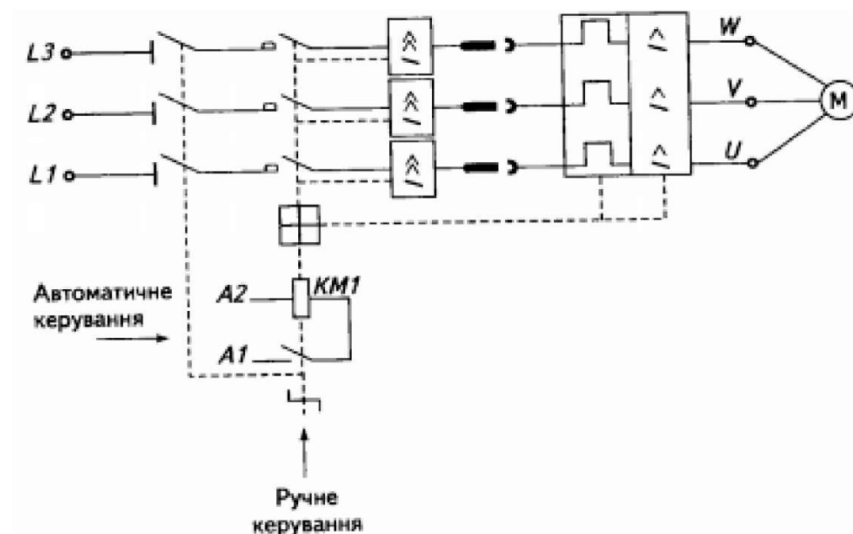


Рис. 10.2 – Схема прямого пуску асинхронного двигуна з використанням автоматичного вимикача

Цей вимикач забезпечує як ручне (за допомогою поворотної ручки, так і автоматичне (за допомогою подачі напруги живлення на котушку контактора КМ1 керування. Автоматичне керування можливе лише тоді, коли контакт А1 замкнений. Апарат захищає двигун від струмів короткого замикання (комутаційна здатність становить 50 кА при напрузі 380 В, а також від незначних тривалих перевантажень, обриву і нерівномірного завантаження фаз двигуна.

### **10.3. Проблема захисту тиристорних електроприводів постійного струму**

Основна проблема захисту тиристорного електропривода постійного струму полягає в захисті тиристорного перетворювача. Це пояснюється тим, що тиристири дуже чутливі до перенапруги та аварійних струмів. Розглянемо причини та чинники, то зумовлюють існування перенапруг та аварійних струмів. Джерела перенапруг і способи захисту від них, Внутрішньою причиною існування так званих комутаційних перенапруг є висока швидкість спаду струму при запиранні вентиля: проблема розсмоктування нагромаджених у р - п-переходах носіїв зарядів. Загальноприйнятим способом захисту під таких перенапруг є застосування R - с- ланок, підімкнених паралельно до тиристора. Є ще зовнішні джерела перенапруг. Це насамперед перенапруги, які виникають у мережі живлення внаслідок спрацьовування комутаційної апаратури, перенапруги від вмикання чи вимикання ненавантаженого трансформатора, і, нарешті, перенапруги, джерелом яких є грозові розряди. Ці перенапруги мають різну потужність імпульсу (тривалість та амплітуду) і для захисту від них використовують поєднання кількох засобів.

Так, для захисту від перенапруг, що породжуються комутацією трансформатора, ефективним є застосування R - С-ланок із електролітичними конденсаторами, ввімкненими на виході мостового діодного випрямляча малої потужності. Для захисту від комутаційних та атмосферних перенапруг найчастіше використовують обмежувачі перенапруг на основі варисторів. Крім того перенапруги виникають на стороні випрямленого струму під час розриву кола навантаженого (якоря або обмотки збудження двигуна). Для захисту від перенапруг якірного кола використовують нагромаджувальні електролітичні конденсатори, або обмежувачі перенапруг на основі варисторів чи дугових розрядників. До вибору засобів захисту від перенапруг слід підходити дуже відповідально, оскільки тиристири чутливі до дії перенапруг. Враховуючи це, для підвищення надійності роботи вибирають клас тиристорів за напругою і великим коефіцієнтом запасу - порядку 1,3...1,5.

**Захист від аварійних струмів.** Причини, що породжують наявність аварійних струмів, різноманітні: зовнішні та внутрішні короткі замикання, перекидання інвертора, поява значних зрівноважувальних струмів у реверсивних перетворювачах із сумісним керуванням, несанкціоноване відпирання тиристора в непрацюючій групі реверсивного перетворювача з роздільним керуванням. Враховуючи різноманітний характер названих вище причин, використовують різні способи захисту. Основна вимога, що висувається до системи захисту, — забезпечити високу швидкодію, оскільки тиристор дуже чутливий до величини та тривалості протікання аварійних струмів, Системи захисту будуються з врахуванням характеру аварійного струму, потужності та призначення перетворювача. Найчастіше поєднують використання електричних та електронних засобів захисту. До електричних засобів зачислюють належать плавкі запобіжники та автоматичні вимикачі.

Плавкі запобіжники вибирають, виходячи з діючого значення першої півхвилі струму короткого замикання та допустимого для тиристора значення  $i$  та  $t$ . Тому для захисту використовують швидкодіючі запобіжники, спеціально розроблені для захисту напівпровідникових вентилів. Зауважимо, що сучасні автоматичні вимикачі мають досить високу швидкодію (час повного вимикання становить порядку 10...20 мс). Електронна система захисту діє на момент формування керуючих імпульсів, зсуваючи його в зону, близьку до інверторного режиму, або взагалі блокує появу імпульсів керування.

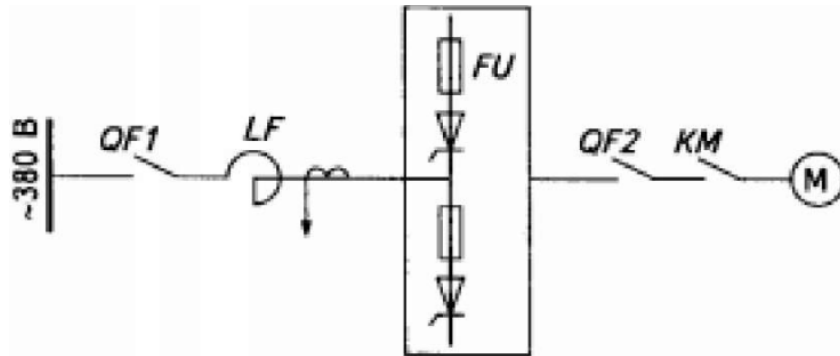


Рис. 10.3.

Для зменшення наслідків дії аварійного струму і переривання аварійного процесу використовують індивідуальні запобіжники в колі кожного тиристора, швидкодіючі автоматичні вимикачі на стороні постійного й змінного струмів та електронну систему захисту. Структура системи захисту, як правило, ускладнюється зі зростанням потужності тиристорного електропривода. Приклад структури організації захисту від аварійних струмів тиристорного електропривода типу КТЕУ з двигуном М на робочий струм до 200 А наведено на рис. 10.3. Тиристорний перетворювач містить два зустрічно-увімкнені тиристорні мости. Тиристори захищені швидкодіючими запобіжниками FU. Перетворювач отримує живлення через автоматичний вимикач QF1. За допомогою трьох трансформаторів струму формується сигнал зворотного зв'язку за струмом, який вводиться в коло системи імпульсного фазового керування (СІФК). Цей сигнал входить до складу електронної системи захисту від аварійного струму. На стороні випрямленого струму захист виконується за допомогою автоматичного вимикача QF2. Контактор KM слугує для частоті комутації двигуна (за необхідності), LF є реактором обмеження струму.

Перетворювач містить також електронні вузли для контролю та індикації стану запобіжників, контролю струму навантаження та напруги живлення.

#### 10.4. Захист, діагностика та моніторинг частотно-керованих електроприводів змінного струму

Сучасні частотно-керовані електроприводи змінного струму є дуже складною електромеханічною системою що містить велику різноманітність електричних та електронних елементів і вузлів. Незважаючи на це, ЕМС характеризуються високою надійністю в роботі, про що свідчить світовий досвід успішної експлуатації таких систем.

Одним із основних чинників, що забезпечує високу надійність, є розвинена система захисту, діагностики та моніторингу системи. Побудувати таку систему вдалося завдяки

застосуванню датчиків нової генерації для вимірювання фізичних величин і використання мікропроцесорної техніки регулювання, вимірювання та діагностики.

Розглянемо типові рішення і принцип реалізації захисту, діагностики та моніторингу таких електроприводів.

**1. Захист двигуна.** Основні чинники, від яких слід захищати двигун, — не механічне перевантаження двигуна, перегрівання двигуна від перекосу або обриву фаз, замикання обмоток двигуна і кабелю живлення на землю. Зауважимо, що при живленні двигуна від перетворювача частоти на статорних обмотках двигуна виникають значні перенапруги, зумовлені так званим явищем довгого кабелю. Ця проблема не належить до проблеми захисту, оскільки є і використовується низка рішень, що обмежують вказані перенапруги на допустимому рівні (обмеження довжини кабелю, використання дроселів і фільтрів на виході перетворювача частоти тощо). Щоб захистити двигун від перегріву, перевантаження та пошкодження ізоляції, використовують багатоступеневий різноманітний захист. Так, нагрівання двигуна контролюється за допомогою теплової математичної моделі двигуна, що міститься в мікропроцесорній системі керування перетворювача частоти. Крім того, передбачена можливість теплового захисту і використанням термісторів РТС, розмішених в обмотках двигуна. Термістори підмикаються до відповідних ввідів перетворювача частоти. Мікропроцесорна система аналізує величину опору термісторів і блокує живлення двигуна, коли опір термісторів перевищує значення що відповідає певному порогу температури нагрівання обмоток машини. Для уникнення перевантаження двигуна (запобігання так званому явищу перекидання асинхронного двигуна) контролюється та обмежується струм статора і величина ковзання. Контроль за пошкодженням ізоляції на землю жил кабелю живлення чи обмоток двигуна реалізується найчастіше за допомогою підсумовувального (диференціального) трансформатора (рис. 10.4).

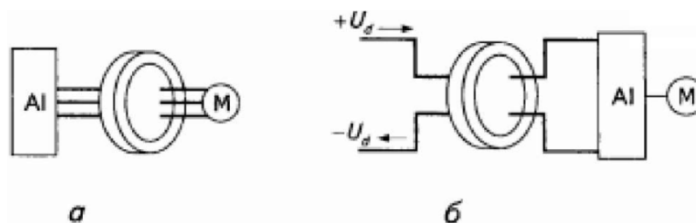


Рис. 10.4.

Трансформатор може бути ввімкнений як на виході перетворювача (рис. 10.4, а), так і в проміжному колі постійного струму (рис. 10.4, б). Він контролює та вимірює суму миттєвих значень струмів. У разі пошкодження ізоляції на землю і, відповідно, появи струму витоку на землю ця сума не дорівнює нулю і на вихідній вимірювальній обмотці трансформатора з'являється сигнал, що обробляється мікропроцесорною системою. Ця система блокує перетворювач і видає інформацію на дисплей.

**2. Захист силового кола перетворювача частоти.** У перетворювачі частоти з проміжною ланкою постійного струму слід захищати силове коло як автономного інвертора, так і вхідного випрямляча. Трифазний інвертор містить, як правило, силові модулі на базі транзисторів IGBT. Захистити транзистори від аварійних струмів звичайними апаратними засобами (запобіжниками, автоматичними вимикачами) неможливо, Транзистори дуже чутливі до перевантаження, мають малу теплову інерцію і

тому потребують надшвидкодіючих засобів захисту від аварійних струмів. Тому виробники для їх захисту пропонують різноманітні рішення з використанням електронних швидкодіючих засобів захисту. Цей захист контролює температуру нагрівання охолоджувальних радіаторів або безпосередню температуру кристала за допомогою напівпровідникового датчика температури. Використовуючи надшвидкодіючі датчики струмів, дія яких ґрунтується на ефекті Холла, або інші принципи вимірювання, контролюють струми транзисторів. При перевищенні допустимої температури транзистора або струму навантаження мікропроцесорна система захисту блокує роботу автономного інвертора. Для інверторів малої потужності використовують так звані інтелектуальні силові модулі IPM, що в одному корпусі об'єднують силове коло, драйвери керування і систему захисту транзисторів. Для забезпечення нормальної роботи перетворювача здійснюється постійний контроль за напругою проміжного кола постійного струму. Якщо ця напруга перевищує допустимий рівень (причиною чого може бути перезарядження буферного конденсатора в режимі гальмування двигуна), то спрацьовує захист від перенапруги, блокуючи інвертор. Контролюється також мінімальна напруга (захист від мінімальної напруги). Якщо автономний інвертор має надійну розвинену систему захисту, то для захисту вхідного випрямляча від вхідних перенапруг, аварійних струмів, що виникають у разі внутрішніх та зовнішніх пошкоджень, можна застосовувати лише традиційні методи і засоби. Для захисту вентилів від перенапруг внутрішнього та зовнішнього походження використовують R-C-ланки, обмежувачі перенапруг на основі варисторів тощо. Для захисту від надструмів при виникненні коротких замикань застосовують швидкодіючі запобіжники та (або) автоматичні вимикачі. Вибір типу та калібру (габариту) захисного апарата є дуже відповідальним завданням. Тому виробники перетворювачів частоти або пропонують комплектні поставки разом із засобом захисту, або дають рекомендації щодо вибору захисного апарата.

**3. Захист кіл керування перетворювачів частоти.** Електронна мікропроцесорна система керування і регулювання дуже чутлива до зовнішніх збурень типу перенапруг або електромагнітних завад. У той же час система керування має численні зв'язки із зовнішніми пристроями через аналогові та дискретні входи і виходи. Крім того, для задавальних і дискретних сигналів керування використовуються внутрішні джерела живлення ( $\pm 10$  В, і  $\pm 24$  В), Тому дія підвищення надійності роботи і захисту електроніки внутрішні джерела живлення захищені від перевантаження та короткого замикання, а всі входи та виходи перетворювача мають комірки для гальванічного розмежування потенціалів зовнішніх кіл і кіл мікропроцесора. Використання мікропроцесорних засобів дає змогу реалізувати розвинену систему тестування та діагностики працездатності вузлів електроніки.

### **Завдання на самостійне опрацювання та підготовку**

1. Самостійно відновити матеріал по основним поняттям та визначенням;
2. Самостійно опрацювати матеріал з опису: Автоматизований електропривод в тваринництві та птахівництві.

## ТЕМА №11. ОСНОВНІ ПОНЯТТЯ І ВИЗНАЧЕННЯ ЕЛЕКТРОТЕХНОЛОГІЇ

Мета: ознайомити здобувачів початкового рівня вищої освіти з описом структур та основних складових технологічних систем. Описати електротехнологічні установки та системи а також класифікація електротехнологій.

### План лекції

- 11.1. Структура та основні складові технологічних систем;
- 11.2. Електротехнологічні установки та системи а також класифікація електротехнологій.

### Хід проведення лекційного заняття

- I. Організація групи;
- II. Мотивація навчальної діяльності. Оголошення теми й мети;
- III. Викладення та обговорення нового матеріалу.
- IV. Оголошення завдання на самостійне опрацювання та підготовку.

### 11.1. Структура та основні складові технологічних систем

Термін *технологія*, який походить від *techne* (з грецької мови – майстерність, уміння) – означає сукупність методів обробки, виготовлення, зміни стану, властивостей, форми сировини, матеріалу чи напівфабрикату, що застосовуються в процесі виробництва для одержання готової продукції.

Технологія як система знань – це наука про способи впливу на сировину, матеріали та напівфабрикати відповідними знаряддями виробництва. Технологія є загальним поняттям як для промислового, сільськогосподарського, так і для будь-якого виробництва готової продукції. Не випадково, наприклад, що один з провідних технічних вищих навчальних закладів світу має назву Массачусетський технологічний інститут.

Основними складовими типового виробництва продукції є:

- матеріальна сфера;
- виробничий (технологічний) процес;
- інформаційне забезпечення;
- система управління (керування).

1.1 До матеріальної сфери відносяться:

- предмет виробництва (об'єкт обробки) – матеріальна субстанція, що перетворюється в процесі виробництва в готову продукцію (або її складову частину);
- знаряддя виробництва, що, в свою чергу, поділяються на дві частини:
  - технологічне обладнання, яке є основним по капітальним витратам, порівняно незмінне у часі (будівлі, магістралі водо-, газо-постачання, система електропостачання, верстати, підйимально-транспортне обладнання);
  - технологічна оснастка – додаткове технологічне обладнання, змінне у часі, незначне по капітальним витратам, яке додається до основного технологічного обладнання для виконання частини технологічного процесу (наприклад, різці, свердла тощо);
- контрольно-вимірвальне обладнання;

– обладнання системи управління (керування) – розглядатиметься далі окремо.

1.2 *Виробничий процес* – повний цикл виготовлення певної продукції, починаючи із закупівлі висхідних матеріалів, деталей, напівфабрикатів та закінчуючи виготовленням та реалізацією цієї продукції.

Технологічний процес – це частина виробничого процесу, яка цілеспрямована на необхідне, передбачене змінювання предмету виробництва та визначення його поточного стану.

Технологічна операція – це окрема частина технологічного процесу, що характеризується одним видом обробки предмету виробництва.

Технологічний контроль передбачає визначення стану предмета виробництва за допомогою контрольно-вимірювального обладнання до-, в ході виконання – та після виконання частини технологічного процесу.

1.3 *Інформаційне забезпечення* (окрім того, що відноситься до системи управління, яка розглядатиметься далі окремо) – призначене для інформування персоналу контролю, розробників та виконавців технологічних процесів про установлені міжнародні, державні та відомчі вимоги до відповідної організації будь-яких виробництв, зокрема це системи стандартів ISO (International Organization for Standardization) і інші документи:

- стандарти серії ISO 9000 «Системи менеджменту якості» (продукції);
- стандарти серії ISO 14000 «Система екологічного менеджменту» (виробництва продукції);
- стандарти Єдиної системи технологічної документації;
- стандарти Єдиної системи технологічної підготовки виробництва;
- технологічна документація – графічні та текстові документи, які визначають технологічні процеси виготовлення продукції. Серед них – технологічні, маршрутні, операційні карти, інструкції, операційні креслення, конструкторська документація на виріб за вимогами Єдиної системи конструкторської документації, відомості замовлення та норми витрати матеріалів.

*Як приклад: технологічна карта* описує процес обробки предмету виробництва, визначає послідовність операцій та їх складові частини, необхідні матеріали, виробниче устаткування, кваліфікацію працівників. Як бачимо, конструювання, конструкторська розробка відповідає на питання: що зробити, виготовити, з якими параметрами? Якою повинна бути продукція?

Технологія ж відповідає на питання: як цю продукцію виготовити з мінімальними витратами? Як забезпечити високу якість продукції, її надійність в експлуатації? Тому останнім часом «досягнення техніки» все більше зміщуються до розвитку передових технологій виготовлення відповідної техніки.

1.4 *Система управління (керування) виробництвом* – сучасні технології обов'язково передбачають автоматизацію – процес розвитку машинного виробництва, при якому функції управління та контролю, які раніше виконувалися людиною, передаються приладам та автоматичним пристроям. Розрізняють часткову автоматизацію виробництва, яку здійснюють в тих випадках, коли безпосереднє керування складними, швидкоплинними процесами стає практично недоступним для людини або коли процес ведеться в умовах, небезпечних для життя.

При комплексній автоматизації виробництва участок (дільниця), цех, завод діють як єдиний взаємопов'язаний автоматичний комплекс. Комплексна автоматизація



виробництва доцільна на основі вдосконалення технологій та прогресивних методів керування із застосуванням надійних засобів автоматизації та виробничого обладнання, що діють за заданою програмою або за програмою, що саморганізується, при загальному контролі усього комплексу з боку людини.

Повна автоматизація виробництва передбачає управління комплексноавтоматизованим виробництвом без участі людини; використовується, коли виробництво є рентабельним, стабільним, його режими відносно незмінні, а також в умовах недоступності або підвищеної небезпеки для життя людини. В сучасних умовах гострої ринкової конкуренції управління виробництвом обов'язково передбачає врахування економічних факторів, використання організаційних методів менеджменту та стратегії маркетингу.

1.5 *Автоматизована система управління технологічним процесом*, підприємством (АСУ ТП) – сукупність адміністративних, організаційних, економічно-математичних методів та технічних засобів контрольно-вимірювальної і обчислювальної техніки, оргтехніки та засобів зв'язку, взаємопов'язаних в єдину людино-машину систему для прийняття управлінських рішень. АСУ ТП містить у своєму складі забезпечуючі та функціональні підсистеми.

До забезпечуючих підсистем відносяться: технологічне, математичне, організаційне та інформаційне забезпечення, яке в автоматизованих системах являє собою наявність єдиної системи класифікації та кодування, уніфікованих масивів інформації та документації. Функціональні підсистеми вирішують завдання обліку, контролю, планування та управління виробничою діяльністю. Головна ланка в АСУ ТП – ЕОМ (або комплекс ЕОМ, об'єднаних у обчислювальний центр), яка пов'язана з усіма іншими ланками системи каналами зв'язку, по яким інформація поступає знизу вгору, а розпорядження, команди та корективи – зверху вниз, частково або повністю автоматизуються процеси збирання, реєстрації, збереження та оброблення інформації.

В залежності від рівня організаційної будови АСУ ТП виробниче підприємство може мати у своєму складі:

- верстати з ЧПУ-числовим програмним управлінням;
- МП-мікропроцесорні підсистеми управління окремими ланками технологічного процесу;
- ГВК-гнучкі виробничі комплекси окремих цехів, які до вищезазначеного обладнання доповнені транспортувально-накопичувальними, контрольними та сигнальними пристроями.

## **11.2. Електротехнологічні установки та системи а також класифікація електротехнологій**

Електротехнологія обов'язково пов'язана з використанням електроенергії, але саме використання електроенергії не є достатньою ознакою електротехнології. Як приклад, обробка на токарному верстаті (хоча відбувається з використанням електроенергії) – не є електротехнологією. Але, якщо замість різця використати струмінь плазми плазмотрона – будемо мати електротехнологічний процес обробки, наприклад, високотемпературного сплаву високої твердості. Отже, електротехнологія – сукупність методів обробки, виготовлення, зміни стану, властивостей, форми сировини, матеріалу чи напівфабрикату,

що ґрунтується на використанні однієї або декількох форм енергії електромагнітного поля та їх перетворенні, безпосередньо, в робочій області впливу та ціленаправленого змінювання предмету виробництва для одержання (у підсумку) готової продукції. До електротехнології, як різновиду технології, відносяться всі загальні поняття і визначення, розглянуті в попередній лекції. Але, разом з тим, існують узагальнені структурні особливості, які розглянемо далі.

1. *Структура електротехнологічного комплексу.* Структура електротехнологічного комплексу представлена на рис. 11.1.

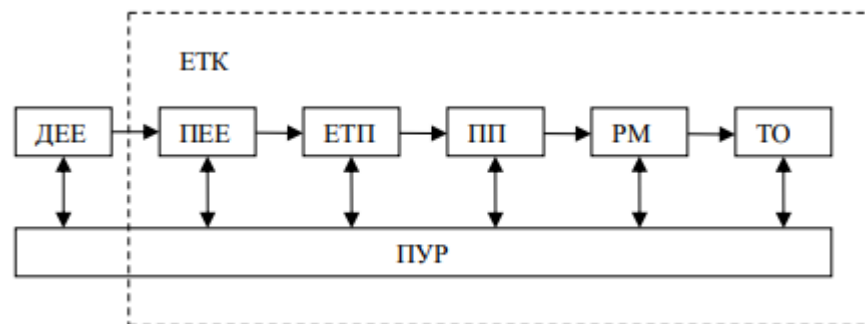


Рис. 11.1 – Структурна схема електротехнологічного комплексу

1) ДЕЕ – джерело електричної енергії, в якості якого може виступати перетворювач будь-якого виду енергії в електричну енергію (автономні джерела електроживлення, вторинні джерела електроживлення, акумуляторні і сонячні батареї, фотоелементи, термопари тощо). Крім цього, ДЕЕ може бути промисловою мережею, енергосистемою, електромережею транспортних засобів і рухомих об’єктів.

2) ПЕЕ – перетворювач електричної енергії, пристрій, що перетворює електричну енергію з одними параметрами в електричну енергію з іншими параметрами (трансформатори, напівпровідникові перетворювачі, високочастотні електричні машини, керовані вентильні перетворювачі з автоматичним регулюванням зовнішньої характеристики тощо), призначений для узгодження параметрів джерела електричної енергії із параметрами електротехнологічного пристрою, а також управління електротехнологічним пристроєм відповідно до сигналів пристрою управління.

3) ЕТП – електротехнологічний пристрій, що перетворює електричну енергію в енергію іншого виду (механічну, теплову, хімічну, гідравлічну, акустичну, світлову), яка називається «технологічною».

4) ПП – перетворювальний пристрій виконує перетворення «технологічної» енергії із одними параметрами в інші (редуктори, мультиплікатори, гідропідсилювачі, пневмопідсилювачі, пристрої каналізації теплової енергії, системи охолодження тощо), призначений для узгодження параметрів електротехнологічного перетворювача енергії із параметрами робочого процесу і управління робочим процесом відповідно до сигналів пристрою управління і регулювання.

5) РМ – робочий механізм. До нього належить частина вищенаведеного електроустаткування, що безпосередньо забезпечує реалізацію необхідних робочих дій у конкретному технологічному процесі (високотемпературні камери для термохімічної обробки виробів із чорних і кольорових металів, вузли, механізми і машини, приведені у рух механічними двигунами).

6) ТО – технологічний об’єкт – це об’єкт, який піддається перетворенням у результаті виконання технологічних операцій, саме для нього створений даний електротехнологічний комплекс.

7) ПУР – пристрій управління. До нього належать інформаційні системи, що забезпечують управління і регулювання параметрів перетворення енергії у ході виконання технологічного процесу.

8) ЕТК – електротехнологічний комплекс, підсистема електротехнологічної системи, що призначений для реалізації певних взаємодій у заданому технологічному процесі.

1.1. *Електротехнологічна система*, яка містить розглянутий електротехнологічний комплекс як підсистему, додатково охоплює ДЕЕ – джерело електричної енергії, пристрої подачі та виведення ТО з ЕТК, а також управління ними, підсистему взаємодії ЕТК з оточуючим середовищем, магістралі газо- та водопостачання ЕТК (в разі необхідності). Що стосується ПУР-пристрою управління в схемі рис. 11.1, то в узагальненому випадку електротехнологічної системи – це, фактично, АСУ ТП, розглянута в попередній лекції.

1.2. *Електротехнологічна установка* – термін в даній дисципліні, описує основну сутність технологічного процесу того або іншого електротехнологічного комплексу з конкретизацією його вхідних та вихідних параметрів. «*Електротехнологічна система*» в даній дисципліні – це поєднання опису технологічного процесу з джерелом електричної енергії, як правило, високої напруги, та його характеристиками.

2. *Класифікація електротехнологій* з урахуванням різноманітності форм електромагнітної енергії та її перетворень, особливих умов по складу діючих речовин, їх фізичному стану, термічним режимам, супроводжуючим фізичним та хімічним перетворенням налічує декілька сотень різновидів електротехнологій. Нижче наводимо перелік основних видів електротехнологій, що вивчаються студентами спеціалізації «Електротехнологічні пристрої та електротехнологічні комплекси»:

2.1 *Електростатична технологія*, заснована на впливі електростатичних полів на оброблювані матеріали. Серед сфери застосування цієї технології:

- *Електрогазоочищення* – виведення з потоків газів твердих або рідких частинок, що містяться в них. Електрофільтри є обов'язковою частиною котелень топок електростанцій, цементних печей, що обертаються, установок з виробництва сірчаної кислоти та ряду інших подібних виробництв. У зв'язку з цим у всьому світі посилено проводяться наукові дослідження з інтенсифікації електрогазоочищення.

- *Електросепарація* – розділення різних сумішей матеріалів (наприклад, цінних компонентів руд і порожньої породи), що використовує відмінність умов зарядження, руху та утримання на електродах компонентів, що розрізняються за своїми електричними властивостями, розмірами, густиною, масою, формою та іншими ознаками.

- *Електропокриття* – нанесення декоративних і захисних покриттів на різні вироби. При цьому для нанесення покриттів можуть використовуватися як рідкі лакофарбові матеріали, так і тверді полімерні порошки. У всіх випадках при цьому має місце суттєве зменшення витрат покривних матеріалів у порівнянні з іншими методами нанесення покриттів і в результаті – істотна економія дорогих матеріалів при одночасному поліпшенні якості покриттів.

- *Електродрук* – отримання багаторазових копій з оригіналу з використанням коронного розряду. Технологічний процес отримання копій включає зарядження пластинки фотопровідника в полі коронного розряду, проявлення її при проекції

зображення оригіналу на платівку, напилення порошкового барвника та перенесення барвника на папір.

2.2 *Електророзрядна технологія, що заснована на взаємодії продуктів коронного розряду з оброблюваними матеріалами*, використовує різні форми нерівноважної низькотемпературної плазми для інтенсифікації хімічних реакцій, промислової генерації озону, конверсії топкових газів, модифікації поверхні матеріалів з метою набуття їх особливих властивостей, електроерозійної обробки металів.

2.3. *Технологія перетворення електроенергії в теплову енергію використовується* в електричних нагрівальних елементах промислових електропечей опору та установках прямого нагріву, в дугових електропечах виплавки сталі, рудовіднолювальних печах, вакуумних дугових печах, установках електрошлакового переплаву, установках індукційного та діелектричного нагріву.

2.4 *Плазмова технологія використовується в плазмових електротермічних установках*, які дозволяють реалізувати мало стадійні та високоентальпійні технологічні процеси з широкими регулюванням термодинамічного режиму у провідних галузях промисловості: металургії, хімії та машинобудуванні. Плазмове технологічне обладнання відрізняється високою продуктивністю, малими габаритними розмірами та високої якості обробки матеріалів, що пояснюється високою концентрацією та направленістю перенесення енергії при плазмовому нагріві.

2.5 *Технологія перетворення електричної енергії в енергію світла використовується* у численних джерелах випромінювання, як видимого, інфрачервоного, так і ультрафіолетового діапазонів. Галузь світлотехніки особливо бурхливо розвивається в останні роки виходячи з рівня зростаючих потреб людства у дизайні світлового середовища.

2.6 *Лазерна технологія* використовує особливий вид резонансно підсиленого концентрованого монохроматичного випромінювання з густиною виділення енергії до  $10^{12}$  Вт/см<sup>2</sup>, що забезпечує різання, зварювання, руйнування любых матеріалів, практично, на відстанях в десятки метрів та кілометрів від джерела енергії.

2.7 *Електронно- та іонно-променева технологія* використовує пучки електронів та іонів, прискорених у вакуумі до високих енергій, для проведення особливо високоякісного зварювання відповідальних конструкцій для атомних електростанцій, авіа- та ракетобудування, створення нових видів матеріалів.

2.8 *Електрогідролічна технологія* використовує вплив імпульсного високовольтного розряду в рідині (технічній воді) для штампування деталей з важкодеформуючих матеріалів або складною конфігурацією, дроблення крихких матеріалів (будівельних матеріалів, геологічних проб, некондиційного бетону, негабаритів і т.д.), очищення лиття від формувальної землі, руйнування каменів в нирках людини без хірургічного втручання, активізації нафтових свердловин та ехолокації водою.

2.9 *Магнітно-імпульсна технологія* дозволяє досягати безконтактним способом швидкості переміщення металевих предметів до 1000 м/с (електромагнітні гармати), що також відкриває широкі можливості для штампування важкооброблюваних звичайними способами матеріалів, їх зварювання тощо.

### **Завдання на самостійне опрацювання та підготовку**

1. Самостійно відновити матеріал по основним поняттям та визначенням;
2. Самостійно опрацювати матеріал з опису: Електрозварювальні установки.

## ТЕМА №12. ОГЛЯД ЕЛЕКТРОТЕХНОЛОГІЧНИХ УСТАНОВОК

Мета: ознайомити здобувачів початкового рівня вищої освіти з коротким оглядом електротехнологічних установок у відповідності до класифікації.

### План лекції

- 12.1. Класифікація електротехнологічних процесів і установок;
- 12.2. Електротермічні установки нагрівання опором;
- 12.3. Установки прямого нагрівання;
- 12.4. Установки електродугового нагрівання;
- 12.5. Електрозварювальні установки;
- 12.6. Електролізні установки;
- 12.7. Електрофізичні установки;
- 12.8. Установки індукційного та діелектричного нагрівання;
- 12.9. Електронно-іонні установки.

### Хід проведення лекційного заняття

- I. Організація групи;
- II. Мотивація навчальної діяльності. Оголошення теми й мети;
- III. Викладення та обговорення нового матеріалу.
- IV. Оголошення завдання на самостійне опрацювання та підготовку.

### 12.1. Класифікація електротехнологічних процесів і установок

Науково-технічний прогрес на рубежі ХХ–ХІ ст. визначається розвитком високих технологій, які забезпечують, з одного боку, отримання нових матеріалів і виробів, а з іншого – зниження енерго- та ресурсовитрат, підвищення екологічних показників виробництва.

Значне місце із-поміж нових технологій займають електротехнології, що обумовлюється з різноманітним електрофізичних, електрохімічних ефектів, які лежать в їхній основі, простотою контролю та керування електротехнологічними процесами, можливістю їх комплексної автоматизації.

До електротехнологічних належать процеси, що засновані на перетворенні, безпосередньо в робочій зоні технологічних установок, енергії електричного струму, електричного та магнітного полів у теплову, хімічну або механічну енергію, за допомогою яких реалізується заданий процес. Традиційно виокремлюють п'ять груп електротехнологічних процесів (рис. 12.1)



Рис. 12.1 – Класифікація електротехнологічних процесів

Отже, електротехнологічними установками далі називаються установки, у яких електрична енергія перетворюється в інші види енергії з одночасним виконанням технологічного процесу. Розширена класифікація ЕТУ наведена на рисунку 12.2.

*Електротермічні установки* – це установки, в яких електрична енергія перетворюється в теплову і слугує для нагрівання матеріалів і виробів. В електротермічних установках перетворення енергії проводиться такими способами: нагрівання опором; індукційним нагрівом; діелектричним нагрівом; дуговим нагрівом; електронно та іонно-променевим нагрівом; плазмовим нагрівом; лазерним нагрівом.

В електрохімічних та електрофізичних установках використовується електрохімічна дія струму. До таких установок належать: електролізні; електрохімічні; електроерозійні; електрохіміко-механічні установки.



Рис. 12.2 – Класифікація електротехнологічних установок

В електромеханічних установках дія електричного струму призводить до деяким механічним зусиллям. До них належать: магнітно-імпульсні; електромагнітні; електрогідравлічні; ультразвукові.

*Електрокінетичні установки* – установки, в яких використовується електронноіонна технологія, що включає в себе: електризацію речовини, формування руху зарядів в електричному полі тощо. Розвиток одержали такі види установок. *Електрогазоочищення* – виділення з газового (повітряного) потоку твердих тіл або рідких частинок.

*Електросепарація* – розділення багатокомпонентних систем на складники.

*Електрозабарвлення* – нанесення твердих або рідких покриттів на вироби тощо.

## 12.2. Електротермічні установки нагрівання опором

До електротермічних установок нагрівання опором належать різноманітні печі, що використовуються для обробки металів (рис. 12.3). Нагрівання опором відбувається внаслідок виділення теплоти в матеріалі під час протікання по ним електричного струму. Цей вид нагріву заснований на законі Джоуля-Ленца. Виділяється в провіднику теплова

енергія ( $Q$ , ккал), яка пропорційна до квадрату сили струму ( $I$ , А), опору провідника ( $R$ , Ом) і часу протікання струму ( $t$ , с):

$$Q = 0,00024 \cdot I^2 \cdot R \cdot t$$



Рис. 12.3 – Електротермічні установки нагрівання опором

Активна потужність ( $P$ , Вт), що виділяється під час протікання струму в провіднику:

$$P = U^2 R = \frac{U^2 S}{\rho \cdot l},$$

де  $U$  – напруга, В;  $S$  – площа перерізу провідника,  $m^2$ ;  $\rho$  – питомий опір провідника, Ом·м;  $l$  – довжина провідника, м.

Теплова енергія, що виділяється в провіднику, може бути використана безпосередньо для нагрівання самого провідника, який у цьому разі є тілом, що нагрівається (принцип прямого нагрівання).

У разі непрямого нагрівання теплова енергія передається за допомогою спеціальних провідників (нагрівачів), по яких проходить електричний струм до інших виробів, які підлягають нагріванню шляхом конвекції та випромінювання теплової енергії. В обох випадках об'єктах, що нагрівається, може бути в твердому, рідкому або газоподібному станах.

Нагрівання провідників або виробів шляхом опору здійснюється в електричних печах опором (ЕПО), які застосовуються в машинобудуванні, металургії, легкої та хімічної промисловості, на транспорті, будівництві, комунальному та сільському господарстві тощо.

За призначенням ЕПО поділяються на такі:

- нагрівальні, які використовуються для обробки матеріалів (нагрівання, термічної, хіміко-термічної та вакуумної обробки, а також випалювання, сушіння, спікання різних металевих і керамічних матеріалів);
- плавильні, призначені для плавлення металів.

Переваги електропечей опором:

- можливість отримання в пічній камері температур до 3 000 °С;

- досить рівномірне нагрівання виробу шляхом відповідного розташування нагрівачів по стінках пічної камери або застосування примусової котельної циркуляції пічного повітря;
- легкість автоматичного керування потужністю, а отже, і температурним режимом печі;
- зручність механізації та автоматизації печей;
- компактність.

### 12.3. Установки прямого нагріву

Установки прямого нагрівання призначені для нагрівання заготовок під кування, відпалу труб, дроту, пружинного дроту під навивку. Установки не мають меж щодо досягнення температур, володіють високою швидкістю, пропорційним введенням потужності, мають високий ККД. Принципова схема прямого нагрівання зображена на рисунку 12.4.

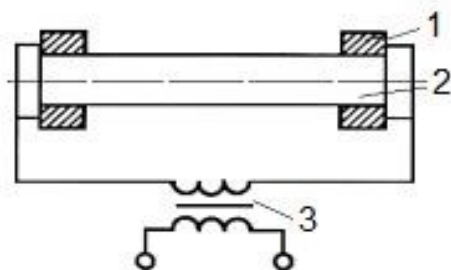


Рис. 12.4 – Установка прямого нагрівання: 1 – водоохолоджувальні затиски; 2 – виріб, що нагрівається; 3 – пічний трансформатор

Існують печі прямого нагрівання періодичної дії для спікання прутків і штабиків із порошків рідких і тугоплавких металів при температурі до 3 000 К у захисній атмосфері. Установки прямого нагрівання складаються з таких головних вузлів:

- знижувальний трансформатор, що монтується в кожусі установки з обмоткою, яка охолоджується за допомогою води. Трансформатор має кілька ступенів напруги в діапазоні 5–25 для нагрівання тіл, що мають різний опір;
- струмопровід від виводів обмотки низької напруги трансформатора до водоохолоджуваних затискачів;
- затискачі, які забезпечують кріплення виробів, що нагріваються, та необхідний тиск у контактах підведення живлення;
- привід контактної системи;
- прилади контролю та автоматичного регулювання процесу нагрівання.

В установках безперервної дії для нагрівання дроту, труб, прутків застосовуються тверді роликові або рідинні контакти.

Печі прямого нагрівання (рис. 11.5) використовуються також для графітизації вугільних виробів, отримання карборунда тощо.





Рис. 12.5 – Загальний вигляд печі опору з висувним подом для гартування деталей

Графітізовані печі виконують однофазними прямокутної форми з роз'ємними стінками. Під час їхньої роботи досягається температура 2 600– 3 100 °С у вакуумі або нейтральній атмосфері.

Діапазон регулювання вторинної напруги становить 100–250 В, споживана потужність 5–15 тис. кВт. ККД установок прямого нагрівання залежить від опору навантаження в ланцюзі живлення і становить 70–80 %, коефіцієнт потужності – 0,8.

#### ***Вакуумні печі опору та сушильні шафи***

Вакуумні печі опору (рис. 11.6) призначені для термообробки, паяння, спікання різних матеріалів і сплавів, сушіння.



Рис. 12.6 – Конструкції вакуумних печей

У печах є можливість здійснювати технологічні процеси при температурах до 2 000–2 500 °С як у вакуумі до  $10^{-5}$  мм рт. ст., так і в середовищі нейтральних газів (аргон, азот підвищеної чистоти) при тисках до атмосферного. У наш час випускаються камерні й шахтні вакуумні печі опору. Параметри найважливіших технологічних процесів для вакуумних печей опору наведені в таблиці 12.1. Для сушіння матеріалів застосовуються сушильні шафи (рис.12.7) із температурою 200–250 °С.

***Плавильні електропечі опору*** призначені для виплавлення олова, свинцю, цинку та різних сплавів на їхній основі, а також інших металів, що мають температуру плавлення 600–800 К.

Печі для плавлення алюмінію та його сплавів дають змогу досягти високої міри очищення металу. Печі мають просту конструкцію. За конструктивним виконанням розрізняють тигельні й камерні (або ванні) печі.

***Тигельні печі*** (рис. 12.8) становлять металевий посуд-тигель (із чавуну з внутрішньої обмазкою оксидами), поміщений у циліндричний корпус із вогнетривкого

матеріалу (5) і покритий зовні металевим кожухом (6). Між тиглем і футеровкою розміщені електричні нагрівачі (4).

Пічь обладнана механічним дозатором. Дозування металу у проміжний ківш робота-маніпулятора або ливарну форму здійснюється за допомогою механічних, пневматичних або електромагнітних пристроїв.

Таблиця 12.1

**«Технологічні процеси у вакуумних печах»**

| Технологічні процеси     | Параметри технологічних процесів вакуумних печей опору<br>(без урахування середи) |                 |                                    |
|--------------------------|---|-----------------|------------------------------------|
|                          | Матеріал  | Температура, °С | Тиск, Па                           |
| Термічна обробка         | Титан і його сплави, високолеговані сталі, пермалой, сплави на основі нікелю      | 900–1 300       | -1 -<br>2 10 –10                   |
|                          | Молибден, ніобій, вольфрам та їхні сплави   | 1 800–2 200     | -2 -5<br>10 –10                    |
|                          | Лейкосапфір і фіаніти   | 1 200–1 800     | -1 -2<br>10 –10                    |
| Термообробка та спікання | Тугоплавкі матеріали  | 1 600–2 200     | -1 -2<br>10 –10                    |
| Спікання                 | Високолеговані сталі та швидкорізальні  | 1 100–1 300     | -1 -2<br>10 –10                    |
|                          | Титан, цирконій і сплави на їхній основі  | 900–1 200       | -2 -3<br>10 –10                    |
|                          | Уран і його сплави  | 1 000–1 300     | -2 -3<br>10 –10                    |
|                          | Магнітні матеріали систем ЮНДК  | 1 000–1 300     | -2 -3<br>10 –10                    |
| Спікання                 | Рідкісні й рідкоземельні метали та їхні сплави (скандій, ітрій, неодим, самарій)  | 1 000–1 300     | -2 -3<br>10 –10                    |
|                          | Оксидна кераміка  | 1 600–2 300     | -1<br>-2 10 –<br>10<br>-5<br>Ar-10 |
|                          | Ніобій, тантал і їхні сплави  | 1 800–2 200     | -2 -5<br>10 –10                    |
|                          | Молибден, вольфрам і їхні сплави  | 1 900–2 500     | -1 -<br>2 10 –10                   |



Рис. 12.7 – Конструкції промислових сушильних шаф

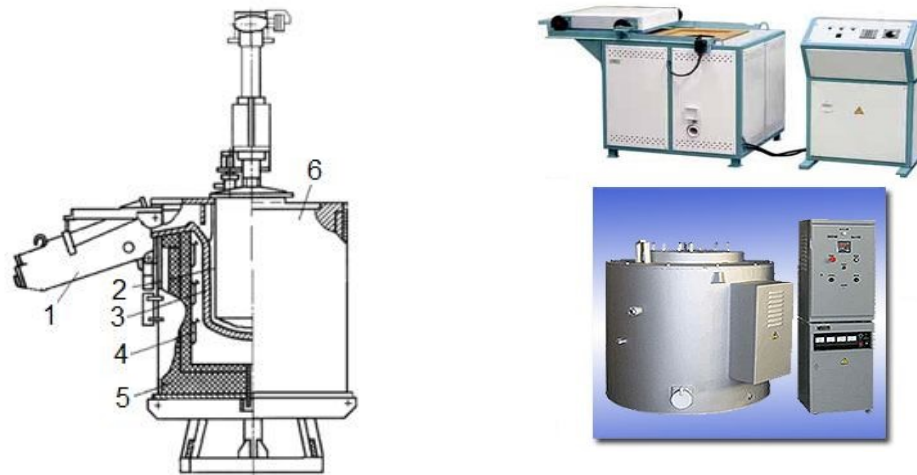


Рис. 12.8 – Конструкції тигельних електричних печей опору: 1 – жолоб; 2 – механічний насос; 3 – тигель; 4 – нагрівач; 5 – футерівка; 6 – корпус

Механічний насос (2) розміщений на каретці, що рухається вгору і вниз по напрямній колонці. Після розплавлення металу та доведення його температури до необхідного рівня витискувач опускається в тигель і витісняє порцію металу, яка по обігрівальному жолобу надходить у ливарну машину. Тигельні ЕПО інших конструкцій мають механізм нахилу, що дає змогу нахилити піч і зливати розплавлений метал. Питома витрата електроенергії у процесі плавлення алюмінію становить 700–750 кВт·год/кг, а ККД печі – 50–55 %.

*Камерні печі* за обсягом більше тигельних і застосовуються для переплавлення алюмінію на злитки. Питома витрата електроенергії під час роботи ЕПО ванного типу становить 600–650 кВт·год/кг, а ККД – 60–65 %. У всіх типах ЕПО можливі два способи обігрівання – внутрішній і зовнішній. Під час внутрішнього обігрівання нагрівачі розміщені в розплавленому металі та працюють при температурі не вище 800–850 К. У разі зовнішнього розташування відкриті високотемпературні НЕ дають змогу отримати температури 1 100–1 200 К у робочому просторі печі.

#### 12.4. Установки електродугового нагрівання

Установками електродугового нагрівання називають такі, в яких електрична енергія перетворюється у теплову в основному в електричній дузі, яка вільно горить в атмосфері повітря, газовому середовищі, середовищі парів металу або у вакуумі.

Електричною дугою називають самостійний електричний розряд, який характеризується високими густиною струму і температурою, а також великою швидкістю перетворення електричної енергії в теплову. Розрізняють електричні дуги у газах і в парах металу. Залежно від джерела живлення електрична дуга буває постійного і змінного струму.

Установки електродугового нагрівання широко використовуються для плавлення матеріалів, а також для проведення високотемпературних хімічних реакцій в рідинній або газовій фазі, нагріванні газів тощо.

Установки електродугового нагрівання класифікуються за такими ознаками: за родом струму: постійного та змінного струму; за призначенням: сталеплавильні, рудно-термічні, для електрошлакового переплавлення; за способом нагрівання: прямої, непрямої та змішаної дії.

Дугові сталеплавильні печі (ДСП) є електродуговими установками прямої дії і призначені для плавлення сталі із металевого брухту (скрапу). У таких печах в основному отримують високолеговані сорти сталі, які потребують старанного очищення металу від шкідливих домішок, видалення неметалевих домішок та знегажування і які не можуть бути отриманими в конверторах або мартенівських печах.

ДСП характеризують такими основними параметрами: номінальною місткістю (ємністю), що вимірюється в тонах. За цим параметром вони класифікуються на малі (0,5; 1,5; 3,0; 6,0; 12,0 т), середні (25 та 50 т) і великі (100 та 200 т); номінальною електричною потужністю, що вимірюється у МВА або кВА і досягає в деяких сучасних зразка 125 МВА; питомими витратами електроенергії, які становлять 450 - 1000 кВА·год на тонну готового продукту.

Поряд з ДСП змінного струму все ширше у промисловості використовуються дугові печі постійного струму плавлення сталі (ДСПТ) і чавуну (ДЧПТ), які є потужними електроприймачами, а тому живлення їх, як правило, відбувається від окремої трансформаторної підстанції. Електропостачання печей малої місткості, як правило, здійснюється на напрузі 6-10 кВ, середньої - 35 кВ, а великої - 110-220 кВ.

Режими роботи ДСП як приймача електричної енергії залежать від головних операцій, пов'язаних з плавленням сталі. До таких операцій відносять: розплавлення скрапу, розкислення металу, поновлення (введення до складу необхідних легуючих домішок).

До рудно-термічних печей відносять велику кількість установок електродугового нагрівання, різних за призначенням, конструктивним виконанням, особливостями технологічного процесу, виду джерела живлення тощо. Ці установки залежно від виду процесів, що в них відбуваються, поділяються на дві великі групи - рудоплавильні та рудовідновлювальні печі. У рудоплавильних печах відбувається нагрівання руди, яке супроводжується лише її розплавленням без проведення хімічних реакцій.

Залежно від виду електричного режиму роботи руднотермічні печі класифікують: з дуговим режимом роботи (із відкритою дугою); з бездуговим режимом роботи (із закритою дугою); зі змішаним режимом роботи.

Вакуумні дугові печі (ВДП) призначені для отримання чистих металів та їх сплавів з певними високими властивостями. Прикладами їх використання є: отримання зливків із

хімічно-активних і тугоплавких матеріалів (вольфрам, титан, цирконій, тантал, ніобій, молібден тощо) та сплавів на їх основі; отримання сталей і сплавів спеціального призначення (нержавіючих, жаростійких, підшипникових тощо); вторинне переплавлення металу з метою кращого очищення від домішок і газів.

Принцип дії ВДП базується на перетворенні електричної енергії у теплову в електричній дузі, яка горить при зниженому тиску у вакуумній камері.

Виходячи з вищезазначеного, можна дійти висновку, що на цей час використовується велика кількість різноманітних за призначенням і конструктивним виконанням установок електродугового нагрівання. Ці установки мають ознаки, які є загальними для усіх видів або для переважної їх більшості, але є і такі, які суттєво відрізняють один вид від іншого як приймачів електричної енергії.

Загальними ознаками установок електродугового нагрівання як приймачів електричної енергії є такі: наявність суттєвої реактивної складової потужності, тому, як правило, для її компенсації необхідно передбачувати індивідуальні засоби; установки є генераторами високих гармонік, серед яких переважають третя, п'ята, сьома та дев'ята; наявність високочастотних коливань від сотень герц до десятків кілогерц і амплітудою до 40-50% від номінального значення лінійної напруги; оскільки установки є потужними приймачами електричної енергії, то вони є хорошими регуляторами величини навантаження як для підприємства, так і для енергосистеми; установки є джерелами різних видів електромагнітних перешкод, пов'язаних із запалюванням, горінням та згасанням електричної дуги.

## **12.5. Електрозварювальні установки**

Електрозварювальні установки призначені для забезпечення технологічного процесу отримання нерознімних з'єднань окремих деталей з допомогою місцевого розплавлення матеріалів, доведення їх до пластичного стану або сумісного пластичного деформування, внаслідок чого виникають міцні зв'язки між з'єднаними деталями на атомному (молекулярному) рівні. У більшості із цих установок використовується явище перетворення електричної енергії в теплову, що виникає під час електричного дугового розряду або ж при проходженні електричного струму в місці з'єднання деталей.

Комплекс обладнання, пристосованого для забезпечення електротехнологічних процесів електрозварювання, і робочого місця зварювальника називають зварювальним постом.

Електрозварювальні установки класифікуються за такими ознаками: за родом струму: постійного та змінного; за способом перетворення електричної енергії: дугові, контактні, електрошлакові, високочастотні, електронно-променеві, плазмові, лазерні; залежно від виду джерела живлення: автономні, які мають індивідуальний двигун внутрішнього згоряння (бензиновий або дизельний), і такі, що отримують живлення від електричних мереж, у тому числі й ті, що підключаються до пересувних електростанцій; за способом установлення: стаціонарні та пересувні; за ступенем автоматизації: ручного, напівавтоматичного та автоматичного керування.

На цей час основними режимами дугового електрозварювання є:

-режим дугового зварювання покритим електродом, що плавиться; режим зварювання електродним дротом в середовищі газу або газової суміші; режим зварювання під шаром флюсу; режим аргонодугового зварювання електродом, що не плавиться.

В електрозварювальних установках розрізняють такі види дуг:

-за характером середовища, в якому відбувається дуговий розряд: відкрита - та, яка горить в повітрі з домішками парів матеріалів електрода та деталей, що зварюються; замкнута - та, що горить під шаром захисного флюсу без доступу повітря в парах матеріалів електрода, зварюваних деталей і флюсу; захищена - та, що горить в середовищі захисних газів: аргон, вуглекислий газ, гелій, азот, водень та ін.;

-залежно від матеріалу і фізичного стану електрода у процесі горіння: з металевим електродом, що плавиться; з електродом, що не плавиться (вугільним, вольфрамовим, керамічним тощо); за характером дії дуги на деталі, що зварюються: прямої та непрямої.

Основною характеристикою зварювальних дуг є статична вольтамперна характеристика - трьох видів: падаюча при струмах від одиниць ампер до 80 А; жорстка при струмах від 80 до 350 А; зростаюча при зварюванні в середовищі вуглеводу при струмах понад 350 А.

В електрозварювальних установках джерелами живлення зварювальної дуги можуть бути: трансформатори, випрямлячі та генератори.

Залежно від роду струму джерела живлення бувають: змінного та постійного. За способом установки джерела живлення класифікують: стаціонарні та пересувні. За призначенням джерела живлення бувають: спеціальні та універсальні. Залежно від потужності джерела живлення поділяють на малої, середньої та великої потужності. За кількістю постів зварювання джерела живлення класифікують: одно- та багатопостові.

До основних параметрів джерел живлення електрозварювальних установок відносять: напругу мережі живлення, частоту мережі живлення, коефіцієнт потужності, номінальний зварювальний струм, діапазон регулювання зварювального струму, напругу неробочого ходу, номінальну робочу напругу, кількість ступенів регулювання, тривалість вмикання.

Зварювальні трансформатори є одними із поширених джерел живлення для електрозварювальних установок при зварюванні на змінному струмові. Це пояснюється, в першу чергу, простотою їх конструкції та обслуговування і надійністю в роботі. Залежно від способу отримання крутопадаючої характеристики та способу регулювання зварювального струму зварювальні трансформатори поділяють на дві групи: трансформатори з нормальним магнітним розсіюванням і окремим дроселем та трансформатори з підвищеним магнітним розсіюванням: трансформатори з вбудованим дроселем; трансформатори з рухомою вторинною обмоткою; трансформатори з магнітними шунтами.

Зварювальні випрямлячі є джерелами постійного струму для електрозварювальних установок. Зварювальні випрямлячі, що використовуються на практиці, на цей час є дуже різноманітними за конструкцією, електричними схемами та призначенням. Зварювальні випрямлячі класифікуються за такими основними показниками: за кількістю фаз: однофазні та трифазні; за можливістю керування: з некерованими (кремнієві та селенові діоди) та керованими (тиристри) вентилями; за видом зовнішньої характеристики: з падаючою, пологою та жорсткою характеристикою. У загальному випадку зварювальні випрямлячі мають такі головні складові частини: понижувальний трансформатор; випрямний блок; блок пускорегулювання та захисту; система примусового охолодження.

Зварювальні генератори постійного струму являють собою електричну машину постійного струму, в якій відбувається перетворення механічної енергії, що підводиться від приводного двигуна, в електричну енергію на відносно невеликій напрузі.

Зварювальні генератори постійного струму класифікуються за такими основними показниками: за видом приводного двигуна: зварювальні перетворювачі, приводним двигуном яких є трифазні асинхронні двигуни з короткозамкненим ротором, та зварювальні агрегати, приводним двигуном в яких є двигуни внутрішнього згорання (бензинові або дизельні); за видом зовнішньої характеристики: з крутопадаючою, пологою і жорсткою характеристикою та універсальні; за кількістю постів зварювання: одно- та багатопостові; залежно від способу збудження: з незалежним збудженням і послідовною обмоткою розмагнічування (підмагнічування), з паралельним збудженням і послідовною обмоткою розмагнічування, з розчепленими полюсами, з поперечним полем.

В контактних електрозварювальних установках принцип дії полягає у тому, що ділянки деталей, які зварюються, приводять в контактування одна з одною, нагрівають до пластичного або розплавленого стану струмом, який проходить безпосередньо через місця зварювання; після вимкнення електричного струму і подальшого механічного стискання деталей відбувається охолодження місць зварювання і утворення нерознімного з'єднання між деталями.

До основних видів контактного зварювання відносять: точкове - деталі, що зварюються, розміщують між електродами, які закріплюються в електродотримачах; рельєфне є різновидом точкового зварювання, при якому одна із деталей має виступи, через які відбувається початкове контактування з іншою деталлю, а потім у процесі зварювання ці виступи плавляться і забезпечують створення точкового зварювального стику; роликіве - деталі розміщують між роликами, які з допомогою натискного механізму стискають їх з певним зусиллям (напрямок стискання показаний на рисунку стрілками); стикове - можливі два різновиди: зварювання опором та зварювання оплавленням.

Обов'язковими складовими частинами електрозварювальної установки для контактного зварювання є зварювальний трансформатор та пусковий пристрій (ПП). Зварювальні трансформатори класифікуються за такими ознаками: за виконанням первинних обмоток - з циліндричними та дисковими котушками; за виконанням вторинних обмоток - з гнучким рухомим вторинним витком та з жорстким нерухомим вторинним витком; за взаємним розміщенням первинних і вторинних обмоток - із симетричним і несиметричним розміщенням обмоток; за розміщенням первинних обмоток на стрижнях магнітопроводу - на одному та на двох стрижнях; за виконанням магнітопроводу - стрижневі, броневі та кільцеві.

Типовими електричними схемами електрозварювальних установок для контактного зварювання є такі: для контактного зварювання на змінному струмі промислової частоти; для контактного зварювання на змінному струмі зниженої частоти; конденсаторна електрична схема; для зварювання на постійному струмі; електрична схема з випрямлячем струму у вторинному контурі.

Електрозварювальні установки для спеціальних видів зварювання використовуються для зварювання деталей великої товщини із кольорових металів та сплавів, нержавіючих сталей тощо. Основними видами таких установок є: електрозварювальні установки для електрошлакового зварювання; електрозварювальні установки для високочастотного зварювання; електрозварювальні установки для плазмового зварювання/різання; електрозварювальні установки для лазерного зварювання/різання; електрозварювальні установки для електронно-променевого зварювання.

Електрозварювальні установки як приймачі електричної енергії: Режим роботи переважної більшості електрозварювальних установок повторно-короткочасний і лише для частини з них – тривалий; діапазон потужностей електрозварювальних установок дуже широкий і становить від одиниць до десятків тисяч кВА; здебільшого електрозварювальні установки являють собою однофазні приймачі електричної енергії, що підключаються до мережі на фазну 220 В або на лінійну 380 В напругу; характерним для більшості установок є низькі значення коефіцієнта потужності  $\cos\varphi$ ; робота електрозварювальних установок супроводжується провалами напруги, зумовленими імпульсним характером їх навантаження; зварювальні випрямлячі є генераторами високих гармонік; електрозварювальні установки створюють перешкоди випромінювання в області частот 750 кГц, 3 і 30 МГц; робота установок супроводжується стрибками струму, що можуть досягати двократних значень від максимального робочого.

## 12.6. Електролізні установки

В основу принципу дії таких електролізних установок покладене явище електролізу.

Суть явища електролізу полягає у виділенні із електроліту, під час проходження через нього струму, частин речовини й осідання їх на електродах (такий процес називається електроекстракцією) або в перенесенні речовин з одного електрода через електроліт на інший (електролітичне рафінування). Електролітами називають речовини, розчини і розплави яких можуть проводити електричний струм, носіями якого є іони, що утворюються в результаті електролітичної дисоціації. Електролітичною дисоціацією називається процес розпаду речовини на рівномірно заряджені іони під час її розчинення або розплавлення. Згідно з цією самою теорією поряд із процесом дисоціації також відбувається зворотний процес молекуляризації - об'єднання окремих іонів у молекули.

За певних сталих умов при одночасному перебігу цих двох процесів у розчині встановлюється рухома рівновага між іонами, що утворюються, та іонами, що сполучаються.

Якщо в електроліт помістити металевий електрод, матеріал якого має іони тієї самої речовини, то при певній різниці потенціалів між металом і розчином не буде відбуватися ні розчинення матеріалу електрода, ні осідання на ньому речовини із розчину. Тобто на межі метал-розчин зовнішній струм буде відсутнім. Таку різницю потенціалів називають нормальним електродним потенціалом речовини.

Якщо на електрод подати більш додатний потенціал, ніж нормальний електродний потенціал для цього матеріалу, то відбудеться розчинення електрода, і такий процес називається анодним. Якщо ж реальний потенціал електрода буде більш від'ємний, то на електроді відбудуватиметься виділення речовини, і такий процес називається катодним.

Проходження іонного струму через електроліт супроводжується перенесенням маси речовини, числове значення якої визначається двома законами Фарадея.

В електролізних установках для отримання чистих металів із водних розчинів отримують такі метали: нікель, цинк, мідь кадмій, кобальт, хром, марганець, залізо, срібло, золото тощо. Всі ці метали мають нормальний електродний потенціал вище за - 1.

В установках для електролізу розплавлених сполук солей металів отримують такі метали, як алюміній, кальцій, натрій, магній, берилій, фтор, рідкоземельні метали тощо. Всі ці речовини мають нормальний потенціал нижче за - 1.



Електролізні установки для отримання чистих газів використовують для отримання великих об'ємів таких газів, як кисень, водень, хлор тощо. Найбільш широке використання в промисловості отримали електролізні установки для отримання водню і кисню шляхом розкладання води.

До джерел живлення електролізних установок для отримання чистих металів і газів ставляться такі основні вимоги: забезпечення високої стабільності сили струму; можливість плавного регулювання напруги; забезпечення високої надійності електропостачання, яка б відповідала вимогам електропостачання приймачів I категорії.

З урахуванням вище перелічених вимог живлення електролізних установок можливе від генераторів постійного струму, діодних або тиристорних випрямних агрегатів.

Генератори постійного струму, незважаючи на ряд їх переваг (можливість плавного регулювання напруги на виході в широкому діапазоні без погіршення коефіцієнта потужності в мережі змінного струму та незалежність її величини від коливань напруги в мережі живлення змінного струму) на цей час майже не використовуються. Це пояснюється їх основними недоліками: наявність обертових частин з великими інерційними моментами, що потребує масивних фундаментів для їх установлення; порівняно низька надійність та високі вартість і експлуатаційні витрати, низький ККД. Завдяки високому ККД (97-99%) та відсутності рухомих частин діодні випрямні агрегати є більш поширеними джерелами живлення для електролізних установок недоліки в яких вдається уникнути в тиристорних випрямних агрегатах.

Гальванотехнікою називають область прикладної електрохімії, в якій використовуються процеси електролітичного осадження металів на поверхню металевих та неметалевих виробів. Гальванотехніка поділяється на гальваностегію і гальванопластику.

Гальваностегією називають процес електролітичного нанесення покриттів на поверхні металевих та неметалевих виробів з метою підвищення їх механічної міцності, корозостійкості та покращання декоративних якостей. Суть процесу гальваностегії в більшості випадків базується на перенесенні металу анода на катод. При цьому анод є розчинним в електроліті і його виготовляють у вигляді прутка або пластини із матеріалу, шаром якого повинен бути покритий виріб. Функцію катода виконує виріб, на який необхідно нанести покриття.

Електроліт - це водний розчин солей того металу, що наноситься на виріб. Для покращання струмопровідних властивостей, як правило, електроліт має кислотний або лужний характер, для чого до його складу вводять нормовану кількість лугу або кислоти.

Перед тим як безпосередньо приступити до процесу гальваностегії поверхню виробу ретельно обробляють з метою вилучення слідів бруду, окислів, жиру тощо. Для цього виконують такі операції: знежирення - обробка в гарячих розчинах лугів або в таких органічних розчинниках, як гас або бензин; травлення - обробка в розчинах сірчаної або соляної кислоти; механічна обробка з метою отримання гладких поверхонь - шліфування, полірування.

Залежно від вимог, які ставляться до функціональних характеристик виробів, що підлягають гальваностегії, покриття класифікують на такі: захисні - забезпечують антикорозійний захист поверхні виробу; декоративні - надають поверхні виробу певний декоративний вигляд; захисно-декоративні - забезпечують виконання двох попередніх

функцій; спеціальні - надають поверхні виробу спеціальні властивості (покращання міцності, зносостійкості тощо).

Прикладами гальваностегії є: цинкування - один із найбільш поширених захисних видів гальванічних покриттів; анодування - процес отримання оксидних плівок на поверхні виробів із алюмінію, магнію, титану та їх сплавів; нікелювання - процес нанесення шару нікелю або його сплавів на поверхню виробу; хромування - процес нанесення шару хрому або його сплавів на поверхню виробу; обміднення застосовують і в декоративних цілях, але в основному його використовують для нанесення попереднього шару покриття на сталеві вироби з подальшим нанесенням шару нікелю або хрому; сріблення та позолочення виконують у першу чергу з метою надання виробу кращих декоративних якостей, але при цьому також поліпшуються і антикорозійні властивості.

Гальванопластикою називають процес електролітичного нанесення металевих покриттів на шаблони (форми) з метою отримання точних копій з оригіналу.

Використовують процеси гальванопластики в тих випадках, коли виріб має дуже складний профіль і виготовлення його литтям або з використанням механічних способів обробки є дорогим, трудомістким або просто неможливим. З використанням гальванопластики виготовляють копії статуй, предметів інтер'єру, складних штампів, друкарських кліше, грампластинок, металевих труб, стрічок тощо.

Процес отримання гальванокопій передбачає такі операції: виготовлення матриці (форми) - відтиску, що має дзеркальне відображення оригіналу; нанесення струмопровідного (якщо матеріал є діелектриком) або роздільного (якщо матеріал є провідником) шару на оригінал; зарядження матриці; завантаження матриці у ванну і виконання безпосередньо гальванопластики.

Джерелами живлення для електролізних установок гальванотехніки є випрямні агрегати, що підключаються до мережі 220/380 В 50 Гц. На цей час у промисловості знайшли найбільше поширення тиристорні та інверторні агрегати. Тиристорні випрямні агрегати виготовляються нереверсивними (серії ТЕ, ТВ) та реверсивними (серії ТЕР, ТВР), з повітряним (серії ТЕ, ТЕР) та водяним (серії ТВ, ТВР) охолодженням. Інверторні випрямні агрегати є наступним кроком на шляху розвитку джерел живлення для електролізних установок гальванотехніки. Принцип дії таких агрегатів базується на високочастотному перетворенні електричної енергії.

Електролізні установки як приймачі електричної енергії: для переважної є тривалий режим роботи і лише для частини з них - повторно – короткочасний; електролізні установки для отримання чистих металів і газів належать до приймачів I категорії надійності електропостачання; для гальванотехніки є приймачами II категорії; електролізні установки є енергоємними; графік навантаження більшості електролізних установок, за умови належного контролю за перебігом технологічного процесу, є рівномірним; установки мають підвищені вимоги до точності підтримання напруги джерела живлення та/або густини струму, оскільки їх потужність прямо пропорційна квадрату струму/напруги живлення, а від потужності, у свою чергу, залежать продуктивність та якість; оскільки до складу переважної більшості електролізних установок входять випрямні агрегати, то вони вносять у мережу вищі гармоніки; ККД установок коливається від 0,7 до 0,97; коефіцієнт потужності електролізних установок  $\cos\phi = 0,60,94$ ; окремо взяті ванни є низьковольтними приймачами електричної енергії з великими значеннями сили струму. Об'єднання ванн у серії з декількох десятків, а то і

сотень послідовно з'єднаних ванн зумовлює підвищення напруги на серії до декількох сотень вольтів.

## 12.7. Електрофізичні установки

До електрофізичних установок належить велика кількість різних за принципом дії, схемним та конструктивним рішенням установок, загальним для яких є використання електричної енергії або специфічних фізичних явищ, що створюються цією енергією, з метою зміни стану поверхні, форми та розмірів виробу, впливу на хід процесів, що відбуваються в рослинах, організмі тварини або людини.

Усі установки можна поділити на три групи: електророзрядні

(електроерозійні, електроконтактні, абразивно-ерозійні), променеві (лазерні, електронно-променеві, плазмові) та імпульсні (ультразвукові, електрогідроімпульсні, магнітоімпульсні). Крім того, існує велика кількість комбінованих установок, робота яких базується на принципі дії двох-трьох перелічених вище груп.

Характерною ознакою в роботі електророзрядних установок є наявність електричного розряду в середовищі діелектрика (газу або рідини) між електродом-інструментом і електродом-виробом. У деяких установках у процесі роботи електричний розряд відбувається між електродами, що між собою не контактують, а в деяких - при короткочасному їх контактуванні. Під час проходження електричного розряду відбувається видалення частин матеріалу виробу і його формоутворення.

Електророзрядні установки використовують для обробки виробів із струмопровідних матеріалів, які важко обробляються звичайними методами: обробка порожнин штампів, прес-форм, ливарних форм, отримання криволінійних щілин та пазів, отворів малого діаметра та складної конфігурації, прямолінійне та контурне різання, клеймування тощо.

В установках для електроерозійної обробки формування електричних імпульсів, що підводяться до електродів, здійснюється з допомогою генераторів імпульсів. Велика різноманітність видів обробки, вимог до продуктивності та якості, діелектричного середовища та інші фактори зумовили розроблення та використання великої кількості різноманітних методів генерування імпульсів та схемних рішень.

Генератори імпульсів класифікують за такими ознаками: за впливом електричних характеристик міжелектродного зазору на формування імпульсів поділяють на залежні та незалежні; за кількістю ступенів перетворення енергії на одно-, дво- та триступеневі; за методами генерування імпульсів: ті, що безпосередньо генерують уніполярні або знакозмінні імпульси шляхом перетворення механічної енергії в електричну з подальшим випрямленням знакозмінних імпульсів; ті, що забезпечують перетворення постійного або змінного струму в імпульсний за допомогою тиристорів або транзисторів; ті, що забезпечують переривання постійного або змінного струму; ті, в яких забезпечується переривання безперервного змінного струму в імпульсний змінний струм з допомогою нелінійних пристроїв з подальшим випрямленням; ті, в яких відбувається підсумовування декількох напруг змінної частоти та напруги постійного струму з подальшим випрямленням; за діапазоном частоти імпульсів генератори поділяють на: низькочастотні (до 300 Гц), середньочастотні (400-1000

Гц), підвищеної частоти (1000-20 000 Гц), високочастотні (вище ніж 20 000 Гц) та широкодіапазонні; за основними конструктивними і схемними ознаками генератори

поділяють на релаксаційні, широкодіапазонні, тиристорні, машинні, магнітонасичені тощо.

Під час електроерозійної обробки формоутворення виробу можливе такими способами: копіюванням форми профільованого електрода-інструмента або його перерізу; взаємним переміщенням непрофільованого електрода-інструмента і заготовки; комбінацією двох попередніх способів.

Найбільш поширеними технологічними операціями, що виконуються на електроерозійних установках є: прошивання отворів, прошивання зовнішніх поверхонь, електроерозійного маркування, нанесення фасонних поглиблень, електроерозійне шліфування, різання та фрезерування.

Основною вимогою до приводу установки для будь-якого виду електроерозійної обробки є забезпечення оптимального міжелектродного зазору перед початком кожного циклу електричного розряду. Виконання такої вимоги є запорукою забезпечення оптимального режиму іскроутворення і, як наслідок, досягнення найвищої продуктивності і якості обробки при найменшому зношенні електрода-інструмента. У сучасних зразках установок для електроерозійної обробки найбільше поширення отримали електромеханічні приводи з кульково-гвинтовою передачею (КГП) та лінійні електроприводи.

Електроконтактні установки є різновидом електроерозійних установок, принцип дії яких також базується на електричній ерозії металу виробу в середовищі рідинного (наприклад, вода) або газового (наприклад, повітря) діелектрика. Але на відміну від електроерозійних у контактних установках обов'язково має місце контакт (безперервний або короткочасний) між електродом-виробом і електродомінструментом. Обов'язковою умовою електроконтактною обробки є також безперервний рух (найчастіше обертовий) лише електродаінструмента, або електрода-інструмента і електрода-виробу.

Залежно від характеру процесів, що відбуваються у зоні обробки, розрізняють такі три різновиди електроконтактною обробки: електрод-інструмент і електрод-виріб у процесі взаємного переміщення мають постійний контакт; електрод-інструмент і електрод-виріб перебувають у такому взаємному положенні, що механічний тиск між ними практично відсутній; електрод-інструмент і електрод-виріб перебувають у такому взаємному положенні, що струм проходить у місцях контактування електрода-інструмента з мікроступами на поверхні електрода-виробу

До головних переваг установок для електроконтактною обробки відносять: можливість досягнення значно вищої продуктивності, ніж на електроерозійних установках (до 200 000 мм<sup>3</sup>/хв); використання дешевого і нескладного інструмента у вигляді диска або стрічки; можливість істотної зміни характеру проходження процесу і результату обробки зміною електричних параметрів; малі значення питомого тиску інструмента на виріб (0,3- 0,5 кгс/см<sup>2</sup>); можливість роботи як на постійному, так і змінному струмах при безпечних для обслуговуючого персоналу напругах; можливість у більшості випадків обробки як у середовищі рідинного, так і газового діелектрика. До головних недоліків установок для контактної обробки відносять: низькі чистоту та точність поверхні виробу після обробки; істотні термічні навантаження на виріб, що можуть призвести до зміни структури поверхні металу; підвищений рівень шуму під час роботи установки.

В установках для абразивно-ерозійної обробки функцію робочого інструмента виконують спеціальні абразивні струмо-провідні круги (наприклад, ельборові, алмазні тощо), які виготовляють із суміші абразивних зерен з металевим порошком

(металоабразивний) або графітом (графітоабразивний). Металева або графітова домішка забезпечує струмопровідними властивостями абразивний круг, а з допомогою абразивних зерен виконується механічне видалення з поверхні виробу продуктів електричної ерозії, що з'являються в зоні обробки. При використанні як абразив алмазу обробку ще називають алмазно-ерозійною обробкою.

До переваг абразивно-ерозійних установок належить: висока продуктивність; можливість використання неагресивних рідинних діелектриків; можливість використання як спеціальних, так і звичайних шліфувальних станків після нескладної їх модернізації; низькі питомі тиски круга на виріб; робота на безпечних напругах. До недоліків установок для абразивно-ерозійної обробки відносять: необхідність використання спеціальних значно дорожчих кругів замість традиційних; істотне зношення струмопровідного круга; округлення гострих кромek деталей після обробки.

Робота променевих установок для електрофізичної обробки базується на процесах розмірного видалення матеріалу заготовки плавленням і випаровуванням у зоні обробки під дією енергії променевих потоків або високоенергетичних струменів. Променеві установки залежно від способу отримання променевого потоку або високоенергетичного струменя класифікуються на електроннопроменеві, плазмові та лазерні (світлопроменеві).

Принцип дії електронно-променевих установок базується на використанні кінетичної енергії електронів, що летять з великою швидкістю у вигляді сфокусованого променя (пучка), яка перетворюється на теплову енергію при різкому гальмуванні електронів у момент їх попадання на поверхню виробу.

Типовими технологічними процесами обробки на електроннопроменевих установках є: прошивання мікроотворів з великим відношенням глибини до діаметра, отримання фасонних щілин і пазів у виробках із важкооброблювальних матеріалів (наприклад, отворів у фільтрах для отримання об'ємного синтетичного волокна), вирізання елементів із напівпровідникових матеріалів, розмірна обробка матеріалів, які легко окислюються в повітрі; зварювання та лютування різних виробів, у тому числі із неметалевих та тугоплавких матеріалів, тих, що мають велику різницю в товщині та габаритах; напилювання тонких плівок тощо.

Перевагами установок для електронно-променевої обробки є: можливість порівняно легкого фокусування електронного пучка на малих площах і безінерційного його переміщення у будь-яку точку поверхні, яка обробляється; виконання багатьох операцій, наприклад, різання, без створення дефектного шару, практично без відходів і з високою продуктивністю; легке модулювання за потужністю. Недоліками установок для електронно-променевої обробки є: складність і висока вартість; необхідність виконання обробки в середовищі вакууму.

Принцип дії плазмових установок базується на використанні певним чином сформованого струменя іонізованого газу - плазми. Стан речовини у вигляді плазми є четвертим станом поряд з твердим, рідинним та газоподібним. Такий стан є властивим для всіх речовин, нагрітих до високої температури. Якщо речовину в твердому стані нагрівати, то у міру її нагрівання вона переходить у рідинний, газоподібний, а потім у плазмовий стан. У плазмовому стані відбувається порушення енергетичних зв'язків уже на рівні електронів та ядер. У такому стані речовина являє собою суміш нейтральних атомів, вільних від'ємно заряджених електронів і додатно заряджених іонів.

Головною складовою частиною плазмових установок є плазмотрон - пристрій, у якому в результаті взаємодії електричної дуги з робочим газом створюється плазма, а

потім формується плазмовий струмінь. Залежно від способу створення електричної дуги плазмотрони бувають двох видів: з дугою прямої дії та непрямої дії. Для забезпечення стабільності роботи плазмотрона, підвищення довговічності сопла та температури струменя плазми використовують різні способи стабілізації (стискання) плазмової дуги: вихровий; стабілізації газом шаром; стабілізації стінками сопла.

Типовими технологічними процесами, які проводять на плазмових установках, є: різання; зварювання; наплавлення; напилення; інтенсифікація металургійних та високотемпературних хімічних процесів; буріння гірських порід тощо.

Принцип дії лазерних (світлопроменевих) установок базується на використанні тепла, яке генерується у сфокусованому світловому промені, характерними ознаками якого є високомонохромність (надзвичайно вузький інтервал хвиль) і когерентність (фаза й амплітуда електромагнітних коливань однакові або різниця між ними стала). У точці фокусування лазерного променя на поверхні виробу відбувається перетворення світлової енергії в теплову і, як наслідок, інтенсивна теплова дія в зоні обробки, яка зумовлює такі явища, як миттєве розплавлення, випаровування, руйнування часток матеріалу виробу або зміну його структури.

Головною складовою частиною лазерних установок є оптичний квантовий генератор (ОКГ) - лазер. Залежно від робочої речовини, в якій проходять процеси, що зумовлюють виникнення когерентного світлового променя, ОКГ класифікують на: твердотільні; газові; рідинні; напівпровідникові.

Перевагами лазерних електротехнологічних установок є: забезпечення високої концентрації енергії, що підводиться, і локальність її дії; висока технологічність лазерного променя; легкість автоматизації процесів обробки і можливість швидкого переналагодження; відсутність поняття «зношення інструмента»; висока швидкість різання; висока якість розрізу та мала його ширина; можливість обробки в середовищі повітря без використання спеціальних рідинних або газових середовищ; відсутність механічної дії на виріб. Недоліками лазерних електротехнологічних установок є: обмеження за глибиною обробки; низький коефіцієнт корисної дії (для твердотільних - 1,5%; для газових - 10-20%) складність стабілізації параметрів випромінювання; створення напливу розтопленої фази на поверхні деталі; осідання виділених продуктів світлової ерозії на поверхнях.

Імпульсні установки для електрофізичної обробки поділяють на три групи: ультразвукові, електрогідроімпульсні та магнітноімпульсні. Принцип дії кожної із груп установок базується на різних фізичних явищах, але характерною загальною ознакою для всіх їх є імпульсний характер силової дії на об'єкт обробки.

Для перетворення електричної енергії в механічну енергію ультразвукових коливань використовують спеціальні перетворювачі (вібратори). На практиці найбільш широке використання отримали два види ультразвукових перетворювачів: магніострикційні та п'єзоелектричні. У магніострикційних перетворювачах ви-

користується явище поздовжньої магніострикції, що полягає у зміні довжини металевих тіл, які виготовлені із феромагнітних матеріалів (залізо, нікель, кобальт, пермендюр - сплав 49% заліза, 49% кобальта і 2% ванадію; альфер - сплав 87% заліза і 13% алюмінію) під дією магнітного поля. У п'єзоелектричних перетворювачах використовується явище п'єзоефекту, який полягає у зміні геометричних розмірів п'єзоелектричних матеріалів в електричному полі.

Джерела живлення ультразвукових установок призначені для перетворення електричної енергії промислової частоти в електричну енергію ультразвукової частоти з

метою збудження ультразвукових перетворювачів. Цю функцію в ультразвукових установках виконують ультразвукові генератори як універсальні, так і спеціалізовані. Універсальні високочастотні генератори можуть застосовуватися у різних технологічних процесах з використанням різних ультразвукових перетворювачів, а спеціалізовані призначені для роботи лише з одним або невеликою кількістю ультразвукових перетворювачів з певними характеристиками і призначені для використання в певних технологічних процесах.

Типові процеси та операції, що виконуються на ультразвукових установках:

-процеси та операції розмірної обробки матеріалів: прошивання глухих та наскрізних отворів і порожнин у твердих і крихких матеріалах, вирізання складних за профілем виробів, обробка непрофільованим інструментом, віброобробка поверхні виробу, видалення задирок, облою, рубчиків, ґрату з дрібних деталей, гравіювання; процеси та операції з'єднання матеріалів: зварювання металів, зварювання термопластичних матеріалів, комбіноване зварювання, мікрозварювання, покриття металами із розплавів (металізація), металізація неметалів, лютування, склеювання, спікання металевих порошків, спікання полімерних порошків; хіміко-технологічні процеси та операції: травлення, очищення поверхні виробу від забруднень, знежирення, інтенсифікація процесів гальванічного нанесення металопокриттів, сушіння, просочення пористо-капілярних матеріалів рідиною, піногасіння, прискорення процесу тужавіння будівельних розчинів; диспергування та коагуляція: ультразвукове розпилення рідин ультразвукове емульгування, запобігання створенню накипу, диспергування твердих матеріалів, очищення забруднених газових викидів; металургійні процеси та операції: видалення неметалевих забруднень із рідкого металу, дегазація розплавленого металу, зонне плавлення металів для очищення, модифікування та легування металевих розплавів, покращання заповнення ливарних форм, отримання композитних матеріалів.

-термічні та термохімічні процеси: загартування, рекристалізаційний відпал, відпускання металевих виробів та заготовок, інтенсифікація дисперсійного твердіння, термохімічна обробка виробів із металів у рідинному середовищі, термохімічна обробка виробів із металів у газовому і твердому середовищах; процеси ультразвукового контролю.

Електрогідроімпульсними установками називають такі електротехнологічні установки, в яких електрична енергія перетворюється в механічну під час високовольтного імпульсного розряду в рідинному середовищі. Принцип дії таких установок базується на електрогідролічному ефекті - виникнення надвисокого тиску (до  $300 \text{ МН/м}^2$ ) в зоні проходження електричного високовольтного розряду і поширення навколо каналу розряду в рідинному середовищі імпульсної ударної хвилі.

Електрогідроімпульсні установки використовуються при поведенні великої кількості різних технологічних процесів і операцій, головними видами яких є:

-деформаційна обробка пластичних матеріалів: операції обробки тиском і формоутворення виробів із листових матеріалів: штампування, витяжка, вигинання, відборткування тощо; розвальцювання труб і запресування їх у трубних решітках; калібрування трубчастих деталей; імпульсне формоутворення об'ємних деталей з використанням процесів кування, карбування тощо; наклепування поверхні металевих деталей і виробів.

-диспергування твердих і крихких матеріалів: очищення виробів від ливарного пригару; подрібнення та кришіння різних матеріалів: мінералів, гірських порід, скла, алмазів тощо; отримання суспензій і колоїдних розчинів.

-гідродинамічна дія технологічного призначення: створення імпульсно-ударних струменевих установок для різання, очищення тощо; приведення в дію гідравлічних установок; розпилення або імпульсно-струменеве викидання рідини.

Перевагами таких електродіодіміпульсних установок є: забезпечення високої хімічної чистоти подрібненого матеріалу; отримання необхідної крупності подрібненого матеріалу з необхідними гранулометричними характеристиками (розміром і формою зерен) для повторного використання (наприклад, для виготовлення керамічних виробів із вторинної сировини); можливість повної механізації і автоматизації процесу; значне покращання екології виробництва. Сферами використання таких установок є: підприємства гірничодобувної, хімічної, будівельної, вогнетривкої, радіоелектронної, паливно-енергетичної та інших галузей примисло- вості.

Магнітно-імпульсними установками називають такі електротехнологічні установки, в яких електрична енергія, що накопичується в генераторі імпульсів, під час електричного розряду перетворюється в енергію імпульсного магнітного поля, яке зумовлює появу імпульсних електромагнітних сил, під дією яких відбувається пластична деформація струмопровідного матеріалу заготовки.

Магнітно-імпульсні установки використовуються при проведенні великої кількості різних технологічних процесів і операцій, головними видами яких є: формозміна листових заготовок, формозміна або деформування трубчастих заготовок, отримання нерознімних з'єднань, розділювальні операції.

Враховуючи істотну відмінність у принципі дії кожної із трьох груп (електророзрядні, променеві та імпульсні) електрофізичних установок, велику кількість для кожної із груп різних за призначенням видів таких установок, а також велику різноманітність конструктивного і схемного виконання окремих типів установок, можна стверджувати, що загальні ознаки для всіх без винятку електрофізичних установок як приймачів електричної енергії відсутні.

Специфічними ознаками електрофізичних установок як приймачів електричної енергії є такі:

- для електророзрядних установок: з точки зору надійності електропостачання установки до належить до II і лише частина до III категорії приймачів електричної енергії; діапазон потужностей таких установок широкий і становить від десятків вольт-ампер до десятків кіловольт-ампер; для них є характерним тривалий або повторно-короткочасний режими роботи; діапазон робочих частот установок коливається від сотень герц до сотень кілогерц; для електронно-променевих установок: з точки зору надійності електропостачання установки відносять до I і II категорії приймачів електричної енергії; діапазон потужностей установок широкий і коливається від одиниць кіловат до десятків мегават; для них є характерним тривалий або повторно-короткочасний режими

- роботи; для плазмових установок: з точки зору надійності електропостачання установки відносять до I і II категорії приймачів електричної енергії; потужність установок становить від одиниць до десятків тисяч кіловат; для таких установок характерним є тривалий режим роботи зі слабо змінним циклічним характером навантаження; частина установок є високовольтними приймачами електричної енергії, що живиться від мережі 6-10 кВ; установки постійного струму з тиристорними випрямними



блоками є джерелами вищих гармонік; для лазерних установок: з точки зору надійності електропостачання установки відносять до II категорії приймачів електричної енергії; діапазон потужностей таких установок становить від десятків ват до десятків кіловат; установки є низьковольтними приймачами електричної енергії, що живляться від мережі 220/380 В, 50 Гц; для них є характерним повторнокороткочасний та тривалий режими роботи; для ультразвукових установок: з точки зору надійності електропостачання установки відносять до II категорії приймачів електричної енергії; діапазон потужностей таких установок становить від десятків ват до десятків кіловат; установки є низьковольтними приймачами електричної енергії, що живляться від мережі 220/380 В, 50 Гц або від акумуляторного блока; для них є характерним повторно-короткочасний та тривалий режими роботи; для електрогідроімпульсних установок: з точки зору надійності електропостачання установки відносять до II категорії приймачів електричної енергії; діапазон потужностей таких установок становить від одиниць до сотень кіловольт-ампер, енергія накопичення може сягати 160 кДж; живлення установок здійснюється від мережі 220/380 В або 380/660 В, 50 Гц, а робоча напруга може сягати 50 кВ; для них є характерним короткочасний і повторно-короткочасний режими

- роботи; для магнітно-імпульсних установок: з точки зору надійності електропостачання установки відносять до II категорії приймачів електричної енергії; діапазон потужностей таких установок становить від одиниць до сотень кіловольт-ампер, енергія накопичення може сягати 100 кДж; живлення установок здійснюється від мережі 220/380 В або 380/660 В, 50 Гц, а робоча напруга може сягати 50 кВ; для них є характерним короткочасний і повторно-короткочасний режими роботи.

## **12.8. Установки індукційного та діелектричного нагрівання**

Характерною загальною ознакою як для установок індукційного, так і діелектричного нагрівання є те, що в них електрична енергія перетворюється в теплову безпосередньо в тілі нагрівання. Відмінність таких установок полягає в принципі їх дії. Принцип дії установок індукційного нагрівання базується на поглинанні електромагнітної енергії металевим тілом нагрівання, яке знаходиться в змінному електромагнітному полі індуктора, і перетворенні її в теплову енергію. Принцип дії установок діелектричного нагрівання базується на перетворенні електричної енергії в теплову в тілі нагрівання, що виготовлене із діелектрика або напівпровідникового матеріалу і знаходиться в змінному електричному полі конденсатора.

Установки індукційного нагрівання набули широкого використання під час проведення різних технологічних процесів і операцій: плавлення чорних і кольорових металів, отримання напівпровідників, термічна обробка, крапельна та зонна переплавка, вирощування монокристалів, зварювання, нагрівання заготовок перед пластичною деформацією (штампування, пресування, кування, вальцювання), лютування тощо.

Установки індукційного нагрівання класифікують за такими ознаками: за частотою струму - промислової частоти 50 Гц та високочастотні понад 10 кГц; за призначенням - плавильні печі; за тривалістю роботи - безперервної, напівперервної та періодичної дії; за конструктивним виконанням - плавильні печі: каналні, тигельні та спеціальні; нагрівальні установки: садочні, методичні шагові та методичні послідовні.

Залежно від особливостей конструктивного виконання та принципу дії індукційні плавильні печі поділяють на каналні, тигельні та спеціальні.

Канальні печі належать до індукційних установок з осердям. Назва цих печей пов'язана з наявністю у їх конструкції каналу з розплавленим металом. Під час роботи печі спостерігається інтенсивне природне перемішування розплавленого металу завдяки проявам таких головних ефектів: відцентровий, він проявляється у відштовхуванні рідкого металу від внутрішньої поверхні каналу до зовнішньої і зумовлений взаємодією магнітного потоку зі струмом у каналі індукційної одиниці; тепловий, цей ефект зумовлений різницею миттєвих значень температури розплавленого металу по довжині каналу і особливо різницею температур металу в каналі і суміші розплавленого металу з шихтою в надканальному просторі ванни; вихровий, він проявляється в циркуляції рідкого металу вздовж усього каналу і зумовлений взаємодією струму різної густини в каналі, у зв'язку з його змінним значенням, з магнітним полем; стискаючий, цей ефект зумовлений взаємодією струму в каналі з магнітним потоком і проявляється в стискаючому зусиллі, що діє на рідкий метал.

До переваг каналних печей відносять: високий електричний ККД (0,93-0,97), низькі питомі витрати електроенергії (300-350 кВт·год/т); можливість порівняно простого отримання однорідного хімічного складу вихідного продукту; малі втрати на угар металу. До недоліків каналних печей відносять: порівняно велику частку (25-30 % від повного об'єму печі) «болота»; необхідність безперервної цілодобової роботи печі для уникнення «заморожування печі»; необхідність частої заміни футерівки каналу; необхідність плавлення в одній печі металу або сплаву лише одного складу.

Індукційні каналні печі знайшли широке використання для плавлення чавуну і кольорових металів (алюмінію, міді, цинку) та сплавів на їх основі. Також ці печі використовуються як спеціалізовані міксери для витримки і перегрівання рідкого чавуну, кольорових металів і сплавів перед розливанням у ливарні форми.

Індукційна тигельна піч має дві головні складові частини - індуктор і тигель. В тигельних печах використовують два види тиглів: неелектропровідні тиглі, які виготовляються із кварцитових, магнезитових або цирконієвих мас. Електропровідні тиглі, які виготовляються із жаротривкої сталі, легованого чавуну або графіту.

До переваг тигельних печей відносять: компактність, простоту і зручність обслуговування; можливість роботи печі в періодичному режимі; наявність природного інтенсивного перемішування рідкого металу без використання допоміжних пристроїв; можливість досягнення високої концентрації енергії в матеріалі; малі окислення та втрати на угар металу; можливість створення в печі будь-якої атмосфери (окисної, поновлювальної або нейтральної) при будь-якому тиску (включаючи плавлення у вакуумі); забезпечення високої гігієнічності процесу плавлення і малого забруднення навколишнього середовища; порівняно високий термін служби футерівки печі завдяки відсутності її перегрівання. До недоліків тигельних печей належать: необхідність використання для печей малої і середньої місткості джерел живлення середніх і високих частот; порівняно низька температура шару жужелиці на поверхні дзеркала розплавленого металу; значно нижчі порівняно з каналними печами значення електричного ККД (0,6-0,8); суттєве випинання поверхні рідкого металу, яке зумовлене дією великих електродинамічних сил, що діють у розплаві.

Тигельні печі переважно використовуються для плавлення високоякісних сталей і чавунів під фасонне литво при безперервному та періодичному режимах роботи. Також їх використовують при плавленні кольорових металів і сплавів (наприклад, бронз, які згубно впливають на футерівку каналних печей).

До основних видів індукційних спеціальних печей відносять такі: печі для струминного плавлення; для гарнісажного плавлення; для плавлення в електромагнітному тиглі; для безтигельного зонного плавлення.

Залежно від режиму роботи індукційні нагрівальні установки класифікують на установки періодичної та безперервної дії. Залежно від глибини прогрівання індукційні нагрівальні установки класифікують на такі: для наскрізного нагрівання; для глибинного нагрівання, в таких установках виділення тепла відбувається в поверхневому шарі тіла нагрівання порівняно великої товщини (з приблизно однаковою температурою всього шару), з різким спаданням температури поза цим шаром; для поверхневого нагрівання, в таких установках виділення тепла відбувається в порівняно тонкому поверхневому шарі тіла нагрівання.

До переваг установок індукційного нагрівання належать: висока продуктивність; можливість нагрівання як всього тіла нагрівання, так і його окремих частин; можливість нагрівання на необхідну глибину; значно менший угар металу; можливість забезпечення поточного процесу виробництва з широким упровадженням механізації та автоматизації; компактність та можливість виготовлення різноманітної конструкції індуктора; забезпечення високої гігієнічності процесу. До недоліків установок індукційного нагрівання відносять: для нагрівання деталей з діаметром менше 100 мм уже необхідне використання середніх частот; порівняно низький коефіцієнт потужності, що зумовлює використання засобів для компенсації реактивної енергії.

До найбільш поширених процесів і операцій, що виконуються з використанням індукційних нагрівальних установок, належать: індукційне нагрівання перед пластичною деформацією; індукційне поверхнєве гартування; індукційне нагрівання перед лютуванням

індукційне зварювання; індукційне нагрівання перед з'єднанням/роз'єднанням спражених деталей; індукційне прогрівання залізобетону.

В установках діелектричного нагрівання принцип дії базується на перетворенні електричної енергії в теплову безпосередньо в тілі нагрівання, що виготовлене із діелектрика або напівпровідника і знаходиться в змінному електричному полі конденсатора.

Установки діелектричного нагрівання отримали широке використання під час проведення різних технологічних процесів і операцій. За технологічними ознаками установки діелектричного нагрівання можна розділити на чотири групи: перша група - це установки, що використовуються для проведення технологічних процесів і операцій промислової обробки великих виробів, які потребують швидкого нагрівання; друга група - це установки, що використовуються для нагрівання протяжних плоских виробів; третя група - це установки, що використовуються для нагрівання, як правило, неоднорідних тіл та об'ємів з порівняно невеликою швидкістю; четверта група - це установки, що використовуються для місцевого розігрівання з метою зварювання, лютування та склеювання виробів. Залежно від робочої частоти установки діелектричного нагрівання класифікують: середньохвильового діапазону робочий діапазон частот яких становить 0,3 - 3 МГц; короткохвильового діапазону 3 - 30 МГц; ультракороткохвильового (метрового) діапазону 30 - 300 МГц; надвисокочастотного нагрівання (НВЧ - нагрівання) 1000 МГц і вище.

Для частини каналних і тигельних печей та індукційних установок наскрізного нагрівання робочою частотою є частота 50 Гц, а тому для них джерелом живлення є

електрична мережа напругою 220/380, 380/660 В або 6-10 кВ. Такі установки, як правило, створюють одно- або двофазне навантаження на електричну мережу. Живлення установок діелектричного нагрівання, а також значної частини установок індукційного нагрівання здійснюється від спеціальних джерел живлення підвищеної частоти, функції яких можуть виконувати: машинні генератори, тиристорні перетворювачі частоти, лампові генератори, транзисторні генератори та магнетрони.

Для установок індукційного та діелектричного нагрівання як приймачів електричної енергії: характерним є тривалий режим роботи і лише для частини з них - повторно-короткочасний; установки належать до I і II категорій приймачів електричної енергії; діапазон потужностей таких установок широкий і становить від одиниць до тисяч кіловатів; низький природний коефіцієнт потужності, який становить  $\cos\varphi = 0.1 - 0.4$ ; створення однофазного або двофазного навантаження, яке зумовлює асиметрію напруг у мережі живлення; використання статичних перетворювальних агрегатів, які зумовлюють появу в мережі живлення вищих гармонік; робочі частоти установок діелектричного нагрівання і деякої частини індукційних нагрівальних установок належать до діапазону радіочастот, тому конструкція таких установок повинна передбачати захист від радіоперешкод; Установки діелектричного нагрівання і частина установок індукційного нагрівання, в яких використовуються генератори високих частот, можуть створювати шкідливий вплив на обслуговуючий персонал і навколишнє середовище.

## 12.9. Електронно-іонні установки

Електронно-іонними (електростатичними) установками називаються такі електротехнологічні установки, в яких використовується дія електростатичного поля високої напруженості на речовину, яка знаходиться у твердому, рідинному або газоподібному стані, з метою зміни її фізичних та/або хімічних властивостей, що досягається в основному за рахунок цілеспрямованого розподілу її складових частин.

Під час проходження всіх цих явищ під дією електростатичного поля відбувається переміщення не окремих іонів, а мікрочастинок речовини, які становляться із порівняно великої кількості молекул.

Робота електронно-іонних технологічних установок базується на використанні таких явищ, як: електрофорез - рух частинок, що знаходяться в завислому стані в рідинному або газовому середовищі, під дією електростатичного поля; електросепарація (електростатичне збагачення) - відокремлення від суміші необхідних компонентів у результаті дії сильного електростатичного поля на електрично заряджену дисперговану суміш; електроосмос - рух рідини через капіляри і пористі діафрагми під дією електростатичного поля.

Електронно-іонними установками газоочищення, або електрофільтрами, називають високовольтні електротехнологічні установки, в яких використовується коронний розряд для зарядження завислих у газовому середовищі частинок, що знаходяться в твердому або рідинному стані, та їх уловлювання в електростатичному полі. Ці установки знайшли широке використання в чорній та кольоровій металургії, енергетиці, хімічній та гірничорудній промисловості, промисловості будівельних матеріалів та інших і призначені для високоефективного очищення технологічних газів та аспіраційного повітря від твердих і туманоподібних забруднень (пилу, туману), що виділяються під час

проходження різних технологічних процесів (сушінні, вапалі, агломерації, спалюванні тощо).

Електросепарацією сипких сумішей називається процес розділення сипких дрібнозернистих або здрібнених матеріалів (зерен рослин, гірських порід, промислових відходів тощо) в електричному полі сепаратора.

Робота електронно-іонних установок для електрофарбування базується на використанні електростатичних сил для роздрібнення, перемішування, перенесення та осадження частин лакофарбового матеріалу на поверхню виробу, що підлягає фарбуванню.

Принцип роботи електронно-іонних установок для електродруку базується на створенні потоку монодисперсних крапель рідини, наданні кожній із них електричного заряду і керуванні рухом зарядженої краплі до моменту потрапляння її на поверхню друку.

Найбільш поширеними зразками таких установок є електродрукуючі пристрої (принтери), що призначені для нанесення різної інформації (літерно-цифрової, рисунка тощо) на поверхню виробу.

Електронно-іонні установки як приймачі електричної енергії: для переважної більшості електронно-іонних установок характерним є тривалий режим роботи; електронно-іонні установки належать до приймачів II категорії електропостачання; графік навантаження більшості установок є рівномірним; діапазон потужностей таких установок становить від десятків ватів до сотень кіловатів; електронно-іонні установки в переважній більшості - це однофазні приймачі електричної енергії, що підключаються до мережі на фазну 220 В або на лінійну 380 В напругу; для більшості установок використовуються джерела постійного струму високої напруги (від 40 до 150 кВ), які повинні забезпечувати стабільність випрямленої напруги, можливість плавного регулювання в певному діапазоні і мати високі надійність, економічність і безпеку в роботі; оскільки до складу переважної більшості таких установок входять статичні випрямні агрегати, то вони вносять в мережу вищі гармоніки; коефіцієнт потужності установок становить  $\cos\varphi=0,7-0,95$ .

#### **Завдання на самостійне опрацювання та підготовку**

1. Самостійно відновити матеріал по основним поняттям та визначенням;
2. Самостійно опрацювати матеріал з опису: Установки для електрохімічної обробки металів.

### **ТЕМА №13. ДОСЛІДЖЕННЯ ЕЛЕКТРОУСТАНОВОК ІНДУКЦІЙНОГО НАГРІВАННЯ**

Мета: ознайомити здобувачів початкового рівня вищої освіти з загальними принципами індукційного нагрівання, індукційної плавильної печі, індукційної нагрівальної установки та установки діелектричного нагрівання.

#### **План лекції**

- 13.1. Загальні принципи індукційного нагрівання;
- 13.2. Індукційні плавильні печі;
- 13.3. Індукційні нагрівальні установки;

## 13.4. Установки діелектричного нагрівання.

Хід проведення лекційного заняття

- I. Організація групи;
- II. Мотивація навчальної діяльності. Оголошення теми й мети;
- III. Викладення та обговорення нового матеріалу.
- IV. Оголошення завдання на самостійне опрацювання та підготовку.

### 13.1. Загальні принципи індукційного нагрівання

Індукційне нагрівання (далі ІН) застосовується для такого:

- плавлення металів і неметалів;
- поверхневого гарту;
- нагрівання виробів для пластичної деформації;
- зварювання та паяння;
- зонного очищення металів і напівпровідників;
- отримання монокристалів із тугоплавких оксидів;
- отримання плазми.

У процесі індукційного нагрівання в тілах, що нагріваються під дією електромагнітної енергії, виникають вихрові струми, які нагрівають тіло за законом Джоуля – Ленца. Індукційне нагрівання застосовується в установках прямої та непрямої дії. Принципова схема ІН зображена на рисунку 13.1.

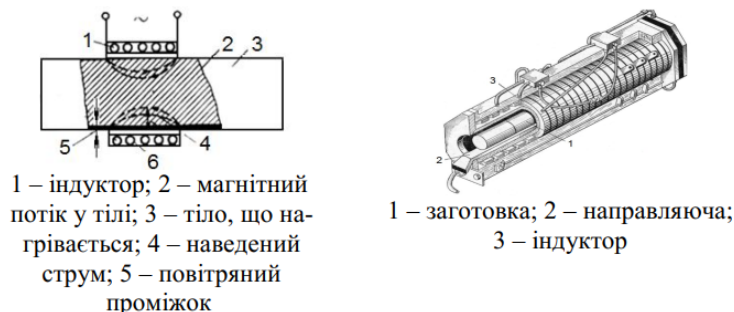


Рис. 13.1 – Принципіальна схема індукційного нагріву та індукційний нагрівач

Індуктор створює змінний магнітний потік і працює як первинна обмотка силового трансформатора. Тіло поміщається всередині індуктора у такий спосіб, щоб між індуктором і тілом залишався зазор. У такому положенні воно нагрівається та виконує роль вторинної обмотки трансформатора з одним к.з. витком.

ЕРС, яка виникає в тілі, що нагрівається, пропорційна магнітному потоку та забезпечує виникнення струму в тілі:

$$E = 4,44 \cdot \Phi \cdot \omega \cdot f ,$$

де  $E$  – ЕРС, що виникає в тілі;  $\Phi$  – магнітний потік, що виробляється індуктором, Вб;  $\omega$  – кількість витків індуктора;  $f$  – частота напруги живлення мережі, Гц.

Потужність, що виділяється в нагрітому тілі, пропорційна до квадрату струму й опору тіла, що нагрівається:

$$P = I^2 R$$

де  $I$  – вихровий струм, що виникає в тілі, А;  $R$  – активний опір тіла, що нагрівається, Ом.

Перевагами електроустановок індукційного нагріву є такі:

- висока швидкість нагрівання, яка пропорційна до введеної потужності;
- найкращі санітарно-гігієнічні умови праці;
- можливість регулювання зони дії вихрових струмів у просторі (ширина і глибина прогрівання);
- простота автоматизації технологічного процесу;
- необмежений рівень температур, що досягаються, достатніх для нагрівання металів, плавлення металів і неметалів, перегрівання, розплавлення, випаровування матеріалів і отримання плазми.

Недоліки:

- використання складних джерел живлення;
- підвищена питома витрата ЕЕ на технологічні операції.

Серед особливостей індукційного нагрівання можна виокремити можливість регулювання просторового розташування зони протікання вихрових струмів.

Ефективність передачі енергії від індуктора до тіла, що нагрівається залежить від величини повітряного зазору між ними та підвищується у разі його зменшення. Глибина нагрівання тіла збільшується зі зростанням його питомого опору і знижується зі збільшенням частоти струму. Струм індукторів становить від сотень до декількох тисяч ампер при середній щільності струму  $20 \text{ А/мм}^2$ . Втрати потужності в індукторі можуть досягати 20–30 % від корисної потужності.

Індукційні електротехнологічні установки поділяються на плавильні, нагрівальні й гартівні. Печі можуть працювати на промисловій частоті 50 Гц, середньої частоті 0,5–10 кГц і високої частоті: сотні-тисячі кГц.

### 13.2. Індукційні плавильні печі

Індукційні плавильні печі (далі ІКП) застосовуються для плавлення чорних і кольорових металів: алюмінію, чавуну, міді, сталі, а також для виробництва фасонного лиття з чорних і кольорових металів. На сьогодні в чавунно-ливарному виробництві застосовуються: 76 % вагранок, 23 % індукційних плавильних печей і 1 % електродугових печей. Спостерігається стійка тенденція до збільшення обсягів використання індукційних плавильних печей.

За конструкцією плавильні печі поділяються на індукційні каналні печі (далі ІКП) та індукційні тигельні печі (далі ІТП). Канальні печі мають осердя, тигельні виконуються з осердям або без нього.

Робочому процесу печей властивий: електродинамічний і тепловий рух рідкого металу у ванні або тиглі, що сприяє отриманню однорідного за складом металу та рівномірному прогріванню його по всьому об'єму; Робочі температури печей:

- 750 °С – для виплавлення алюмінію;
- 1 200 °С – для виплавлення міді;
- 200–1 400 °С – для виплавлення чавуну; – 1 600 °С – для виплавлення сталі.

Індукційні каналні печі застосовуються для плавлення кольорових металів, високоякісних сплавів і чавуну. Печі працюють тільки на промисловій частоті.

Переваги ІКП:

1. Високий ККД печей.
2. Висока надійність печі під час використання новітніх футеровок, високе напруження на відмову ванни печі – не менше трьох років.
3. У печі відбувається інтенсивне перемішування металу без розриву оксидної плівки, що забезпечує: однаковий хімічний склад та однакову температуру по всьому об'єму печі; є можливість підшихтовки легуючими елементами.
4. Висока точність підтримки температури розплаву в наслідок використання вбудованого блоку контролю температури розплаву, що забезпечує зменшення ливарного браку, чаду через відсутності перегрівання металу, збільшення терміну служби футеровки.
5. Низькі енерговитрати на розплавлення металу.
6. Низька витрата охолоджувальної води.
7. Зниження викидів шкідливих речовин в атмосферу.
8. Не потрібен фундамент печі та кріплення його до підлоги у процесі монтажу; не потрібна висока кваліфікація обслуговчого персоналу.

Класифікація печей:

- за кількістю фаз: одно-, дво- і трифазні;
- за конструктивним виконанням каналу: із відкритим або закритим каналом.

На практиці зазвичай використовуються печі з закритим каналом;

- за кількістю каналів на фазу: одно-, дво- і триканалні;
- за розташуванням каналів: із вертикальним; горизонтальним; похилим; – за формою каналу: із круглим; прямокутним; трикутним.

Серед головних вузлів ІКП виокремлюють плавильну футеровану ванну й індукційну одиницю, в яку входять подовий камінь із закритим каналом, магнітне осердя та індуктор (рис. 13.2).

Ванна печі являє собою кожух із заліза, усередині якого міститься футеровка. На бічній поверхні кожуха розташований зливний отвір.

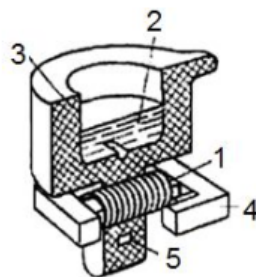


Рис. 13.2 – Індукційна канална плавильна піч: 1 – індуктор; 2 – розплавлений метал; 3 – ванна (шахта або тигель); 4 – магнітне осердя; 5 – подовий камінь з каналом тепловиділення



Індукційна піч (див. рис. 13.2) складається з індуктора, шихтованого магнітопроводу і подового каменя, що охоплюють індуктор плавильними каналами.

*Індуктор* фактично є первинною обмоткою трансформатора, виконується з міді круглого, прямокутного перерізу або з мідної трубки, усередині якої циркулює вода (водяне охолодження).

*Магнітопровід* становить осердя, що зібрано з листової трансформаторної сталі осердя броньового або стрижневого типу.

*Подовий камінь* виконується з бронзи або немагнітної сталі, має один або кілька каналів тепловиділення. Канал із розплавленим металом (1) є короткозамкненим витком вторинної обмотки трансформатора. Для з'єднання ванни з подовими каменем у піддоні є отвір. У момент плавлення відбувається циркуляція розплавленого металу з каналу у ванну й навпаки.

Заміщення більш нагрітого металу більш холодним відбувається весь час, поки існує різниця температур у каналі й шахті печі. Через недостатню циркуляцію металу його температура в каналі може на 100–200 °С перевершувати температуру у ванні. Ця обставина здебільшого визначає питому потужність ІКП, їхню продуктивність, а також термін служби футеровки каналу.

Канал тепловиділення повинен бути постійно заповнений електропровідним тілом. Для первинного пуску каналних печей у їхній канал заливають розплавлений метал або вставляють шаблон із матеріалу, який буде плавитися в печі. Під час завершення плавки метал з печі зливають не повністю, залишаючи так зване «болото», яке забезпечує заповнення каналу тепловиділення для подальшого пуску. Індукційні печі бувають одинарні та здвоєні, з одним або двома каналами на один індуктор (рис. 13.3).

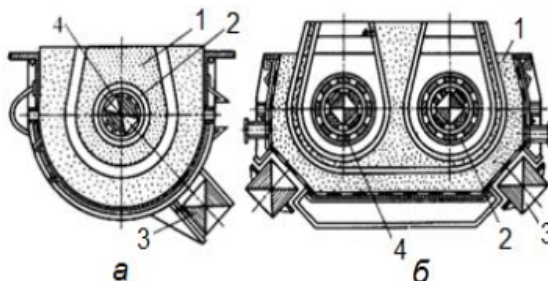


Рис. 13.3 – Конструкція індукційних одиниць каналних печей: *а* – одинарна; *б* – здвоєна; 1 – футеровка; 2 – водоохолоджуваний кожух;

Футеровку каналу виконують з набивних мас різного складу залежно від виплавленого металу або сплаву.

Для зливу металу (рис. 13.4) піч нахилиється за допомогою гідро- або електроприводу. Завантаження печі ведуть зверху через отвір, закритий під час плавки футерованою кришкою (5). Підйом кришки здійснюється гідро- або електроприводу. Подовий камінь (10) охолоджується повітрям, який через зазор вводиться по гнучким кабелям за допомогою вентилятора (9).

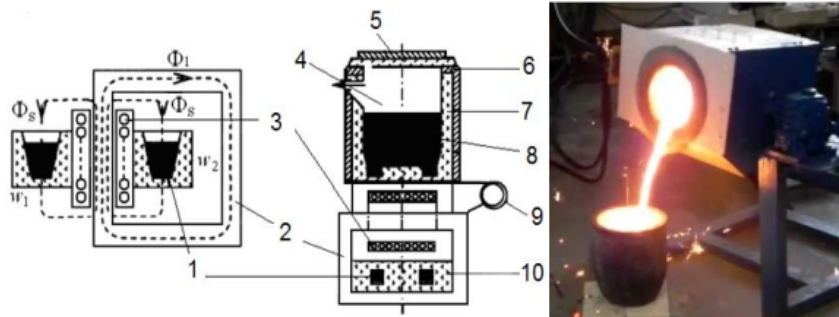


Рис. 13.4 – Схема і конструкція ІКП: 1 – канал із розплавленим металом; 2 – шихтований магнітопровід; 3 – обмотка магнітопровода; 4 – зливний носок; 5 – кришка; 6 – прокладка; 7 – футерована ванна; 8 – метал; 9 – вентилятор; 10 – подовий камінь.

**Принцип роботи печі.** Індукційна піч становить своєрідний трансформатор, первинною обмоткою якого є індуктор, а вторинна обмотка та навантаження – замкнений канал із розплавленим металом. Працює такий трансформатор у режимі КЗ, при якому вся енергія, що підводиться, витрачається на нагрівання металу.

У разі включення індуктора в мережу змінний струм (що виникає в індуктор) створює навколо нього змінне магнітне поле, яке замикається через сталь осердя. Зі свого боку, змінний магнітний потік індукує в металі каналу ЕРС, унаслідок чого в металі каналу з'являється струм. Наведений у замкнутому ланцюгу каналу струм буде виділяти в каналі тепло.

Головні різновиди каналних печей зображені на рисунку 13.5.

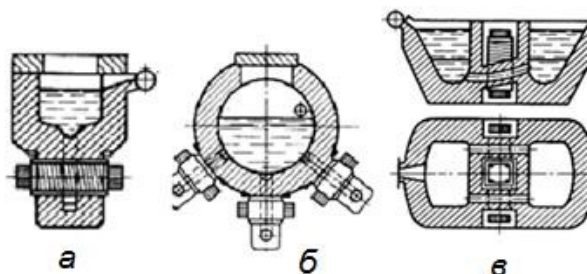


Рис. 13.5 – Основні типи конструкцій індукційних каналних печей: а – шахтна; б – барабанна; в – двокамерна

В індукційній каналній печі *шахтного типу* плавильна камера має форму вертикального циліндра, до донної частини якого приєднана плавильна одиниця (рис. 13.5, а).

Під час розливання металу піч нахилиється за допомогою гідравлічного пристрою.

В ІКП *барабанного типу* плавильна камера виконана у вигляді горизонтально розташованого циліндра. Вона встановлена на цапфах або ковзанках з різними приводами механізму нахилу. Піч має декілька індукційних одиниць, які встановлені в її нижній частині (рис. 13.5, б).

Двокамерні каналні печі виконані з похилими або горизонтально розташованими каналами, що з'єднують між собою дві ванни. До того ж одна з них використовується як плавильна, а інша як роздавальна (рис. 13.5, в).

Технічні характеристики індукційних печей. У процесі плавлення вторинних ресурсів (дані щодо латунних сплавів) безповоротні втрати становлять 6–8 %, продуктивність на місяць – 70–90 т.

Коефіцієнт потужності індукційних печей  $\cos\varphi = 0,2-0,8$ . Менші значення коефіцієнта потужності відповідають ІКП для плавлення металів із низьким питомим опором (мідь, алюміній), а великі значення – із високим (сталь, чавун).

Живлення печей здійснюється від мереж напругу 380 В і вище залежно від потужності. Печі з осердям випускаються одно-, дво- і трифазними потужністю до 2 000 кВт. На рисунку 13.6 наведена схема живлення ІКП промислової частоти від пічного трансформатора напругою 10/0,4 кВ. Паралельно індуктору підключена батарея конденсаторів, що складається з постійно включеним секції З і N керованих секцій  $C_1-C_N$ .

В основі роботи печей без осердя також лежить трансформаторний принцип передачі енергії індукцією від первинної до вторинної обмотки ланцюга. Електрична енергія змінного струму, що підводиться до печі, перетворюється в електромагнітну, яка у вторинній обмотки ланцюга перетворюється в електричну, а потім у теплову.

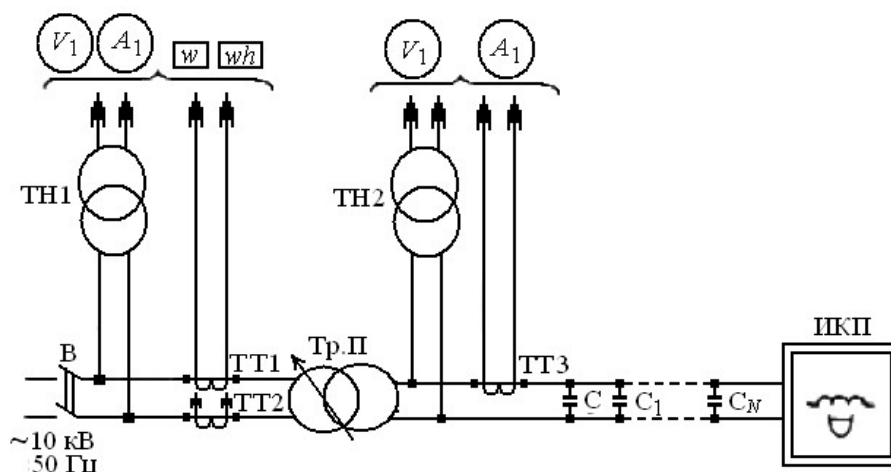


Рис. 13.6 – Принципова електрична схема живлення індукційної каналної печі промислової частоти

Первинною обмоткою слугує індуктор, вторинною обмоткою та навантаженням – розплавлений метал, який завантажений у тигель і поміщений усередині індуктора. Магнітний потік проходить по самій шихті, тому велике значення мають магнітні властивості, а також розміри та форма завантаженої шихти.

Магнітна проникність для феромагнітних матеріалів досить висока і до температури 740–770 °С вона постійна за величиною. У цьому разі шихта одночасно грає роль незамкнутого осердя. Після того як температура матеріалу, що розплавляється, перевищує допустимі значення, робота печі стає аналогічною роботі трансформатора без осердя. Величина ЕРС у кожному витку пропорційна до частоти й величини магнітного потоку. За відсутності осердя провідність для магнітних силових ліній знижується, тому збільшують частоту змінного струму.

На рисунку 13.7 зображена ІТП без осердя, яка складається з індуктора 1, що підключається до джерела живлення змінного струму. У розплавлених печах великої ємності передбачається зовнішній магнітопровід (рис. 13.8). У тигель можна завантажувати будь-яку шихту: відходи ливарного виробництва, чушки, дрібну стружку тощо.

Індуктори виготовляють із мідної трубки (круглого або квадратного перетину), охолоджуваній водою, що накладається в один шар. Обмотка складається з декількох котушок, що мають роздільне водяне охолодження. Печі можуть працювати з залишенням сплаву (25–30 % ємності тигля) або без нього.

В ІТП великої ємності застосовуються джерела живлення промислової частоти, середньої та малої місткості – підвищеної та високої частоти.

*Не електропровідні тиглі* виготовляють з кварцитовий, магнезитових, цирконієвих матеріалів. Вони розміщуються всередині індуктора, не поглинають енергію магнітного поля і одночасно є теплоізоляторами між розплавленим металом і охолоджуваними стінками індуктора. Конструкції тигельних печей показано на рисунках 13.8–13.10.

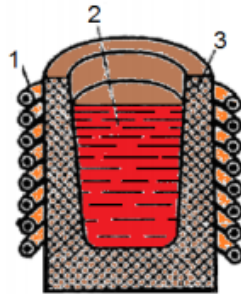


Рис. 13.7 – Індукційна тигельна піч: 1 – індуктор; 2 – розплавлений метал; 3 – тигель

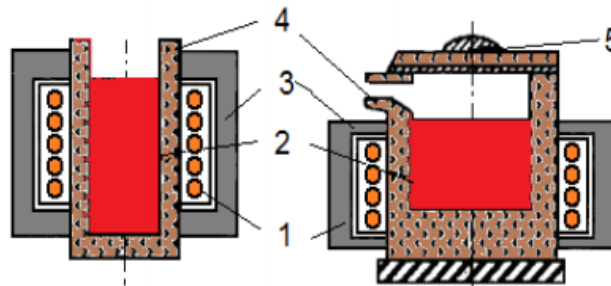


Рис. 13.8 – Схема і конструкція індукційної тигельної печі: 1 – індуктор; 2 – розплавлений метал; 3 – магнітопровід; 4 – вогнетривкий тигель; 5 – кришка підйому

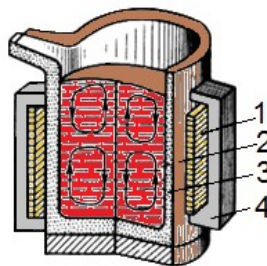


Рис. 13.9 – Напрямок струмів у розплавленому металі: 1 – індуктор; 2 – сталевий тигель; 3 – футеровка; 4 – магнітопровід

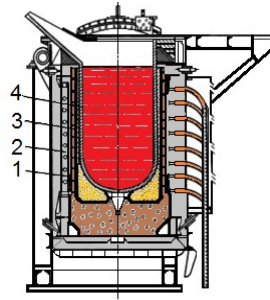


Рис. 13.10 – Індукційна тигельна піч для плавлення магнію: 1 – індуктор; 2 – магнітопровід; 3 – набивна футеровка; 4 – сталевий тигель

*Електропровідні тиглі* виготовляють із жаротривких сталей, легованих чавунів і графітів. Вони поглинають найбільшу частину енергії змінного електромагнітного поля. Нагрівання до розплавлення металів відбувається випромінюванням: (для шихти роздробленою з малим коефіцієнтом заповнення), а після – контактним шляхом. Зовнішні стінки таких тиглів повинні бути ізольовані від внутрішніх стінок індуктора.

Технічні характеристики печі.

Загальний ККД тигельної печі 0,48–0,68. Коефіцієнт потужності ІТП  $\cos\varphi=0,05 - 0,3$ .

Для компенсації реактивної потужності потрібна установка конденсаторів. Потужність ІТП може досягати 4 500 кВт.

Усі плавильні печі належать до електроприймачів II категорії за ступенем надійності електропостачання.

Живлення установок підвищеної та високої частоти здійснюється від тиристорних або машинних перетворювачів індукторного типу.

**Індукційні тигельні печі середньої частоти нового покоління.** На сьогодні розроблено низку індукційних тигельних печей середньої частоти (далі ІПСЧ) для швидкісних плавлень чорних і кольорових металів, що відповідають сучасним вимогам металургійного та ливарного виробництва. Найкращі показники ефективності ІПСЧ здебільшого в чому визначаються шляхом оптимального вибору геометричних параметрів індуктора, частоти струму збудження та питомої активної потужності для плавлення певного металу, а також за допомогою фізичних характеристик і товщини футеровки.

Для плавлення чорних металів заводом виробляються тигельні печі серії ІПП ємністю від 60 до 400 кг, що працюють на частоті 2 400 Гц. Технічні характеристики цих печей наведено у таблиці 13.1.

Таблиця №13.1

**«Технічні характеристики печей»**

| Тип обладнання | Ємність тигля, т | Частота, Гц | Номінальна потужність, кВт | Час плавлення чугуна, хв | Питома витрата ел. електроенергії, кВт·ч/т |
|----------------|------------------|-------------|----------------------------|--------------------------|--|
| ІПП-0,06–2,4   | 0,06             | 2 400       | 100                        | 45                       | 540  |

|              |      |       |     |    |     |
|--------------|------|-------|-----|----|-----|
| ІПП-0,16–2,4 | 0,16 | 2 400 | 160 | 55 | 550 |
| ІПП-0,25–2,4 | 0,25 | 2 400 | 250 | 55 | 550 |
| ІПП-0,40–2,4 | 0,40 | 2 400 | 320 | 75 | 560 |

У разі високих питомих потужностей 800–1000 кВт/т забезпечується висока швидкість підйому температури металу (оптимальні її значення 30–35 °С/хв), що дає змогу скоротити цикли плавлення чавуну до 45 хвилин при питомій витраті електроенергії приблизно 560 кВт·год/т.

Печі цієї серії мають міцну конструкцію, каркас якої виконаний із неіржавої сталі. Індуктор виготовляється з прямокутної мідної трубки. Товщина стінки трубки обрана відповідно до умов міцності й мінімізації електротехнічних втрат. Витки індуктора фіксуються на вертикальних ізоляційних стійках. Ізоляція індуктора виконана у такий спосіб, щоб забезпечувався вихід вологи назовні під час просушування вологих футеровок. Подова частина печі виконується з литого армованого жаростійкого бетону. Розташування індуктора щодо тигля обрано так, щоб максимально зменшити зношення футеровки у верхній зоні за умови збереження гарантованого перемішування металу.

Для цих обсягів і робочої частоти в конструкції печей не передбачене установлення магнітопроводів, тому для зменшення нагрівання магнітними полями розсіювання корпусні елементи виконані з немагнітних металів.

Індукційні печі серії ІППМ розраховані на обсяги плавлення чорних металів від 1т до 10т. Печі цієї серії працюють на частотах 200–1000 Гц, їхні технічні характеристики наведено в таблиці 13.2.

Таблиця 13.2

#### «Технічні характеристики печей»

| Тип обладнання | Ємність тигля, т | Частота, Гц | Номінальна потужність, кВт | Час плавлення чугуна, хв | Питома витрата електроенергії, кВт·ч/т |
|----------------|------------------|-------------|----------------------------|--------------------------|--|
| ІППМ-1,0–1,0   | 1,0              | 1 000       | 750                        | 60                       | 540                                    |
| ІППМ-2,5–0,5   | 2,5              | 500         | 1 100                      | 80                       | 560                                    |
| ІППМ-6,0–0,25  | 6,0              | 250         | 7 000                      | 60                       | 530                                    |

На зовнішній стороні індуктора встановлюються магнітопроводи, що дають змогу підвищити напруженість магнітного поля в зоні розплавлення металу і збільшити ККД печі і, як наслідок, знизити витрати електроенергії до 500–520 кВт·год/т. Для зниження тепловтрат у печах цієї серії над тиглем встановлена кришка з гідравлічним механізмом повороту.

### 13.3. Індукційні нагрівальні установки

Індукційні нагрівальні установки (далі ІНУ) широко застосовуються в різних технологічних процесах у машинобудівній та інших галузях промисловості. Їх підрозділяють на два головних типи: установки наскрізного та поверхневого нагрівання.

Установки для загартування та наскрізного нагрівання діляться залежно від призначення. Живлення установок підвищених та високих частот відбувається від тиристорних або машинних перетворювачів. Установки належать до електроприймачів II категорії за ступенем надійності електропостачання.

Порівняно з іншими видами нагрівання (у полум'яних печах і печах резисторного нагрівання) індукційне нагрівання має мале вигорання металу та менший брак через попадання окалини в оброблюваний виріб. Індукційні установки наскрізного нагрівання застосовуються для нагрівання заготовок під подальшу пластичну деформацію: кування, штампування, пресування, вальцювання тощо.

Залежно від геометричних параметрів нагрітих деталей і їхнього матеріалу джерела живлення індукційних установок виконуються на частоту 50–10 000 Гц. Для установок наскрізного нагрівання вибір робочої частоти роблять так, щоб виділення теплоти відбувалося в шарі деталі достатньої товщини за перерізом за відсутності великого градієнта температури між поверхнею та шаром певної товщини. Де також буде менше перегрівання поверхні заготовки та вище ККД установки.

За режимом роботи установки наскрізного нагрівання поділяють на установки періодичної та безперервної дії.

В установках періодичної дії нагрівається тільки одна заготовка або її частина. Під час нагрівання заготовок із магнітного матеріалу відбувається зміна споживаної потужності, тобто спочатку вона зростає, а потім із досягненням точки Кюрі знижується до 60–70 % від початкової. Під час нагрівання заготовок із кольорових металів потужність у кінці нагрівання збільшується в наслідок зростання питомого електричного опору.

В установках безперервної дії (рис. 13.12) одночасно міститься декілька заготовок, розташованих у поздовжньому або поперечному магнітному полі.

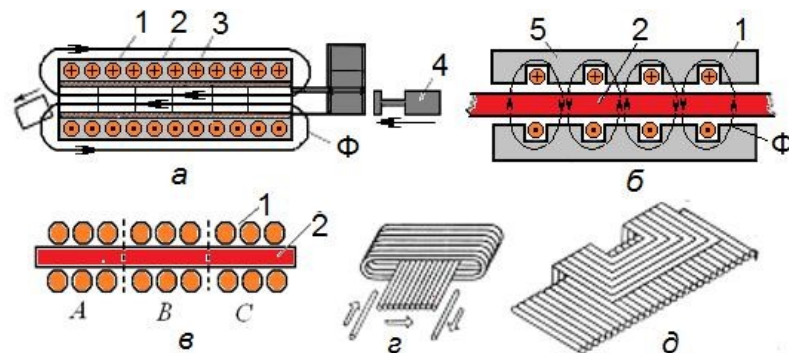


Рис. 13.12 – Схеми індукційних нагрівальних установок безперервної дії в поперечному (а, б, в) і поздовжньому магнітному полі (г, д): 1 – індуктор; 2 – тіло, що нагрівається; 3 – теплоізоляція; 4 – штовхач; 5 – магнітопровід

У процесі нагрівання вони переміщуються за довжиною індуктора, нагріваючись до заданої температури (рис. 13.12, а; б). У нагрівачах безперервної дії повніше використовується потужність джерела живлення, оскільки середня потужність, що споживана від джерела живлення, вище, ніж середня потужність, споживана нагрівачем періодичної дії.

Індукційні нагрівачі безперервної дії мають більш високий ККД джерела живлення. Продуктивність вище, ніж у установках періодичної дії. Можливо живлення декількох

нагрівачів від одного джерела, а також підключення декількох генераторів до одного нагрівача, що складається з декількох секцій (рис. 13.12, в).

Конструкція індуктора для наскрізного нагрівання залежить від форми та розмірів деталей. Індуктори виконують круглого, овального, квадратного або прямокутного перерізу. Для нагрівання решт заготовок індуктори виконують за допомогою щілинних або петльових (рис. 13.12 з, д).

*Індукційний поверхневий нагрів* супроводжується проявом поверхневого ефекту й ефекту близькості. Унаслідок поверхневого ефекту струм у виробі, що нагрівається, розподіляється нерівномірно. Найбільша щільність струму спостерігається в поверхневих шарах виробів.

У разі використання високої частоти в поверхневих шарах можна отримати великі густини струму, що забезпечують швидке нагрівання металу.

Індукційні установки поверхневого нагрівання застосовуються для нагріву деталей під подальшу термохімічну обробку (гартування, цементація, азотування тощо).

*Індукційне загартування* полягає в швидкому нагріванні поверхні виробу з подальшим швидким охолодженням на повітрі, у воді або маслі. До того ж поверхня набуває високу твердість і здатна добре працювати на тертя, а «сире» (м'яке) осердя забезпечує високу опірність ударним навантаженням. У процесі такого нагрівання вдається у багато разів зменшити обсяг металу, що нагрівається (порівняно з наскрізним нагріванням) і значно скоротити витрату електроенергії. Необхідність підтримання високого електричного і теплового ККД системи індуктор – тіло, що нагрівається, визначає винятково велику кількість форм та розмірів індукторів. Схеми деяких індукторів для поверхневого нагріву наведені на рисунку 13.13.

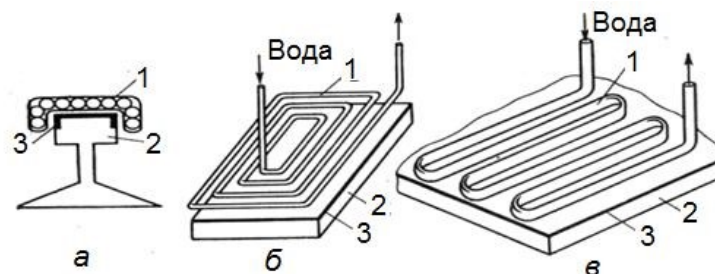


Рис. 13.13 – Технологічні схеми поверхневого індукційного нагрівання: 1 – індуктор; 2 – виріб, що нагрівається; 3 – нагрітий шар виробу

Між індуктором і вогнетривким циліндром прокладений шар теплоізоляційного матеріалу, що знижує теплові втрати та захищає електричну ізоляцію індуктора.

Індукційні установки зазвичай мають низький коефіцієнт потужності, до того ж його значення змінюються в досить широких межах залежно від частоти струму, зазору між індуктором та виробом, магнітної проникності, питомого опору і розмірів нагрітих виробів. Залежність коефіцієнта потужності від частоти струму та діаметра нагрітих виробів дає змогу правильно вибрати компенсуючу реактивну потужність конденсаторної батареї, керуючись не тільки мінімальною витратою електроенергії, але і зниженням вартості установки та скороченням необхідних виробничих площ.

#### 13.4. Установки діелектричного нагрівання



В установках для нагрівання діелектриків матеріал, що нагрівається, поміщається в електричне поле конденсатора і нагрівання відбувається за допомогою струмів зміщення. Ця група установок широко застосовується для клеєння та сушіння деревини, нагрівання прес-порошків, паяння та зварювання пластиків, стерилізації продуктів тощо (рис. 13.14). Живлення установок здійснюється за допомогою змінного струму з частотою у 20–40 МГц і вище. Установки належать до електроприймачів II категорії за ступенем надійності електропостачання.



Рис. 13.14 – Установки діелектричного нагріву

Використання електричного струму, що проходить через діелектрики та напівпровідники в змінному електричному полі, є основою діелектричного нагрівання, який має переваги перед іншими способами нагрівання. Це швидкість, рівномірність і висока продуктивність. З енергетичної позиції таке нагрівання є найефективнішим, оскільки у процесі його здійснення вся енергія, що вноситься в масу матеріалу, нагрівається.

За технологічними ознаками установки височастотного нагрівання під-поділяються на три види.

*Установки першого виду* використовуються в процесах промислової обробки великих виробів, що потребують швидкого нагрівання в однорідному електричному полі: сушіння волокон вовни або бавовни, целюлози та лісоматеріалів, випал великих електроізоляторів та фарфорових виробів, виробництво звуко- і теплоізоляційних матеріалів, зварювання пластмас і полімерних плівок.

*Установки другого виду* застосовуються для нагрівання протяжних плоских виробів. У них відбуваються процеси сушіння текстильного волокна, рисуноків на тканинах, паперу, фотоплівки, хімічних і фармацевтичних препаратів, полімеризація клеїв, нагрівання каучуку, пастеризація тощо.

В *установках третього виду* проводяться процеси, що не вимагають швидкого й однорідного нагрівання, а саме: розморожування продуктів, розігрівання та швидке приготування страв, випалення простих керамічних виробів, сушіння грибів, чаю тощо.

Використання високоякісного нагріву дає змогу підвищити якість продукції, прискорити технологічні процеси й отримати при масовому виробництві велику економію, незважаючи на високу вартість обладнання.

### **Завдання на самостійне опрацювання та підготовку**

1. Самостійно відновити матеріал по основним поняттям та визначенням;

2. Самостійно опрацювати матеріал з опису: Установки нагрівання опором рідинних середовищ.

## **ТЕМА №14. ЕЛЕКТРОЗВАРЮВАЛЬНІ УСТАНОВКИ**

Мета: ознайомити здобувачів початкового рівня вищої освіти з класифікацією електрозварювальних установок, зварювальних дуг та їхніх характеристик.

### План лекції

14.1. Класифікація електрозварювальних установок, зварювальних дуг та їхні характеристики.

14.2. Джерела живлення зварювальної дуги.

14.3. Зварювальні трансформатори, зварювальні випрямлячі, генератори постійного струму.

14.4. Контактні електрозварювальні установки.

14.5. Електрозварювальні установки для спеціальних видів зварювання.

14.6. Електрозварювальні установки як приймачі електричної енергії.

### Хід проведення лекційного заняття

I. Організація групи;

II. Мотивація навчальної діяльності. Оголошення теми й мети;

III. Викладення та обговорення нового матеріалу.

IV. Оголошення завдання на самостійне опрацювання та підготовку.

### **14.1. Класифікація електрозварювальних установок, зварювальних дуг та їхні характеристики**

Електрозварювальні установки, призначені для забезпечення технологічного процесу одержання нероз'ємних з'єднань окремих деталей за допомогою місцевого розплавлення матеріалів, доведення їх до пластичного стану або спільного деформування, що сприяє міцним зв'язкам між сполуками на молекулярному рівні. Більшість таких установок використовують явище перетворення електричної дуги в теплову енергію у місці з'єднання деталей. У деяких установках (наприклад ультразвукових) нероз'ємне з'єднання досягається шляхом пластичного деформування внаслідок перетворення електричної енергії в механічну. Деякі установки, крім головних функцій, також можуть виконувати операції різання, напилення, наплавлення.

Електрозварювальні установкизагалом складаються зі спеціальних електрозварювальних елементів, а також мають елементи загального призначення у вигляді електротехнічних, механічних, пневматичних і гідравлічних пристроїв, кабельних ліній тощо.

Комплекс обладнання, пристосованого для забезпечення електротехнологічних процесів електрозварювання та робочого місця зварника називається зварювальним постом. Від одного джерела струму може оживлятися як один зварювальний пост, так і декілька постів.

Електрозварювальні установки класифікуються за такими ознаками:

- за родом струму: постійний, змінний;
- за способом перетворення електроенергії: дугові, контактні, електрошлакові, високочастотні, електронно-променеві, плазмові, лазерні;
- за джерелом живлення: автономні, які мають індивідуальний двигун внутрішнього згоряння (бензиновий або дизельний); установки, що одержують живлення від електричних мереж і пересувних електростанцій;
- за способом установа: стаціонарні й пересувні;
- за ступенем автоматизації: ручного, напівавтоматичного й автоматичного керування.

Перші електрозварювальні установки з'явилися у 1882 р. за допомогою російського винахідника Н. Н. Бернадоса (рис. 14.1), який теоретично обґрунтував і експериментально досліджував процеси електрозварювання металів за допомогою вугільного електроду. У 1888 р. російський інженер Н. Р. Славянов (рис. 14.2) запропонував електрозварювальну установку з металевим електродом.



Н. Н. Бернадос  
(1842–1905 рр.)

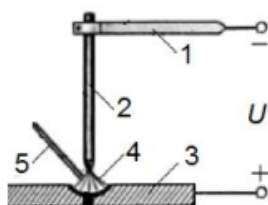


Рис. 14.1 – Установка з вуглевим електродом: 1 – тримач електроду; 2 – вуглевий електрод; 3 – деталі зварені; 4 – електрична дуга; 5–присадний матеріал



Н. Г. Славянов  
(1854–1897рр.)

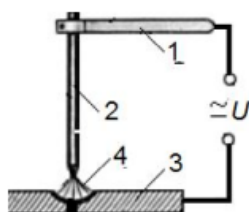


Рис. 14.2 – Установка з металевим електродом: 1 – тримач електроду; 2 – вуглевий електрод; 3 – деталі зварені; 4 – електрична дуга; 5–присадний матеріал

За час створення електрозварювальних установок відбулися істотні зміни. На сьогодні головними режимами дугового електрозварювання деталей є такі:

– *режим дугового зварювання покритим електродом, що плавиться.* У цьому режимі зварний шов створюється шляхом розплавлення дугового електрода і матеріалу деталей, що зварюються. У процесі зварювання електродне покриття плавиться і створює шлак, який захищає розплавлений метал від дії кисню та азоту навколишнього середовища, а також сприяє видаленню з розплавлених металів шкідливих домішок;

– *режим зварювання електродним дротом у середовищі газу або газової суміші.* У процесі такого зварювання електродний дріт надходить у зону горіння електричної дуги механізованим способом, плавиться і створює зварювальний шов. Також у зону горіння дуги подається вуглекислий газ або суміш газів, що сприяє захисту розплавленого матеріалу від дії атмосферного повітря, окислювання й азотування;

– *режим зварювання під шаром флюсу.* Під час такого зварювання електрична дуга горить між електродом, що плавиться, і металом деталей, що зварюються. Після затвердіння металу створюється якісний зварний шов.

- *режим аргонодугового зварювання електродом, який не плавиться.* При такому режимі між електродом і металом деталей, які зварюються, виникає електрична дуга. До того ж цьому утворюється ванна розплавленого металу. У зону горіння дуги надходить аргон, струмінь якого обтікає дугу та розплавлену ванну, захищає її від атмосферного повітря, окислювання й азотування.

В електротехнічних установках розрізняють такі види дуг:

*а) за особливостями навколишнього середовища, в якій відбувається дуго-вий розряд:*

– *відкрита* – горить на повітрі з сумішшю парів металу електрода та деталей, які зварюються, а також матеріалу покриття електрода. Застосовується переважно під час ручного зварювання;

– *закрита* – яка горить під шаром захисного флюсу без доступу повітря в парах металу електроду, зварювальних деталей і флюсу. Застосовується здебільшого під час напівавтоматичного й автоматичного зварювання деталей.

– *захищена* – яка горить у середовищі захисних газів: аргону, вуглекислого газу, гелію, азоту, водню тощо. Застосовується як під час ручного зварювання, так і під час автоматичного, а також з електродом, що плавиться та не плавиться.

*б) залежно від матеріалу та фізичного стану електрода в процесі горіння:* з металевим електродом, що плавиться; з електродом, який не плавиться (вугільний, вольфрамовий, керамічний тощо);

*в) за характером дії дуги на деталі, які зварюються:* прямий і непрямий.

Головною характеристикою зварювальних дуг, від яких залежить вибір джерела живлення та забезпечення умов надійного горіння дуги, є вольтамперна характеристика – залежність дуги від сили струму при постійному значенні довжини дуги (рис. 14.3).

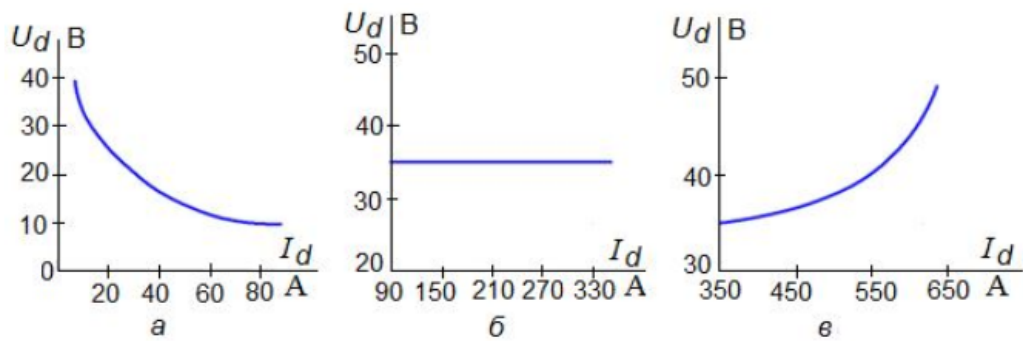


Рис. 14.3 – Статичні вольтамперні характеристики дуги: *а*) – що спадає (до 80 А);  
*б*) – жорстка (80–350 А), *в*) – зростаюча (від 350 А)

Статичні вольтамперні характеристики дуги визначають вигляд і спрямованість процесу, що відбувається в залежності від навколишнього середовища та фізичного складу матеріалу електрода.

## 14.2. Джерела живлення зварювальної дуги

В електрозварювальних установках джерелами живлення дуги можуть бути трансформатори, випрямлячі, генератори.

Залежно від роду струму джерела живлення розрізняють: змінного струму (зварювальні трансформатори, електромашинні генератори) і постійного струму (зварювальні випрямлячі й електромашинні генератори).

За способом встановлення джерел живлення розрізняють: стаціонарні і переміщуванні.

За призначенням: спеціальні й універсальні.

Залежно від потужності: малої, середньої, великої потужності.

Залежно від постів зварювання: одно- та багатопостові.

До головних параметрів джерел живлення установок належать: напруга мережі живлення; частота, коефіцієнт потужності, номінальний зварювальний струм, діапазон регулювання зварювального струму, напруга неробочого ходу (далі НР), кількість ступенів регулювання, тривалість включення.

До джерел живлення висуваються такі вимоги:

1. Напруга НХ повинна бути безпечною для обслуговчого персоналу, а з іншого боку – достатньою для надійного загоряння електричної дуги.
2. Після виникнення дуги напруга повинна зменшуватись до значення, що забезпечує надійне горіння дуги.
3. Джерело живлення повинне забезпечувати можливість регулювання зварювального струму.
4. У разі виникнення КЗ струм не повинен перевищувати робочі значення струму більше ніж на 20–40 %.
5. Усі елементи джерела живлення повинні мати хороші динамічні властивості.
6. У разі зміни довжини дуги в певному діапазоні не повинні виникати значні зміни сили зварювального струму.
7. Коефіцієнт корисної дії повинен бути високим.

Головною характеристикою джерела живлення є його зовнішня характеристика (рис. 14.4) – залежність напруги на виході від сили струму при незмінній напрузі на вході або при постійній частоті обертання вала зварювального генератора.

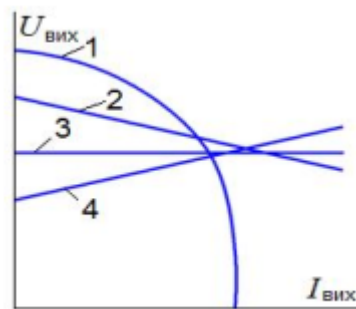


Рис. 14.4 – Зовнішня характеристика джерела живлення електрозварювальних установок:  
1 – що круто падає; 2 – полого; 3 – жорстка, 4 – зростаюча

Вибір зовнішньої характеристики джерела живлення істотно залежить від виду характеристики дуги та умов її саморегулювання.

Характеристика, що круто спадає, найпоширенішою в електрозварювальних установках для ручного зварювання. Це пояснюється тим, що такому зварюванню властива постійна істотна зміна довжини дуги.

За умови збільшення довжини дуги струм зазвичай зменшується, а за умови зменшення – навпаки, збільшується.

Джерела живлення для напівавтоматичних і автоматичних електрозварювальних установок мають зазвичай полого і жорсткі зовнішні характеристики. Це пояснюється тим, що в таких установках довжина дуги та умови її горіння підтримуються автоматично.

Для електрозварювальних установок, де зварювання виконують у середовищі захисних газів (аргону, гелію), використовуються вольфрамові електроди, які не плавляться. До того ж зміна довжини дуги істотно не впливає на зміну сили струму та режим зварювання. Для таких установок використовують джерела живлення, які мають зовнішню характеристику, що круто падає.

Жорсткі та зростаючі зовнішні характеристики мають джерела живлення електроустановок для зварювання електродом, що плавиться, у середовищі аргону або гелію. Приклади таких електрозварювальних установок приведені на рисунку 14.5.



Рис. 14.5 – Електрозварювальні установки

Вони призначені для виконання таких робіт:

– аргонодугового зварювання на постійному струмі електродом, який не плавиться, для всіх видів металів і сплавів, крім алюмінію та його сплавів, а також для ручного дугового зварювання на постійному струмі покритими електродами для виробів із мало- і низьковуглецевої сталі;

Технічні характеристики установок для аргонодугового зварювання наведені в таблиці 14.1.

Таблиця 14.1

**«Технічні характеристики установок для аргонодугового зварювання»**

| Параметри                         | Типи установок дугового зварювання |             |                     |             |
|-----------------------------------|------------------------------------|-------------|---------------------|-------------|
|                                   | УДГ – 180                          | УДГ – 161   | УДГУ – 251<br>АС/DC | УДГУ – 251  |
| $U_m$ , В                         | 220                                | 220         | 380                 | 380         |
| $f$ , Гц                          | 50                                 | 50          | 50                  | 50          |
| $I_n$ , А (при ТВ, %)             | 170 (20 %)                         | 150 (35 %)  | 275 (35 %)          | 250(35 %)   |
| $\Delta I$ , А                    | 40–70                              | 5–150       | 3–275               | 10–250      |
| $U_0$ , В                         | 65                                 | 25/44       | 80/100              | 80/100      |
| $S$ , кВА                         | 13                                 | 8           | 21                  | 21          |
| $D$ , мм                          | 0,8–4; 2–4                         | 0,8–3; 2–4  | 0,8–5; 2–5          | 0,8–5; 2–5  |
| $D \times \text{Ш} \times B$ , мм | 360×360×940                        | 360×360×940 | 750×390×770         | 840×410×680 |
| $M$ , кг                          | 60                                 | 60          | 110                 | 120         |

У таблиці надано такі позначення: де  $U_m$  – номінальна напруга ланцюга живлення, В;  $f$  – частота мережі живлення, Гц;  $I_n$  – номінальний зварювальний струм, А;  $\Delta I$  – межі регулювання зварювального струму, А;  $U_0$  – напруга холостого ходу, В;  $S$  – повна потужність, кВА; ККД;  $D$  – діаметр електрода, мм;  $D \times \text{Ш} \times B$  – габаритні розміри, мм;  $M$  – маса випрямляча, кг);

– аргонодугового зварювання на змінному струмі електродом, який не плавиться, для виробів з алюмінію та його сплавів, а також для ручного дугового зварювання на змінному струмі покритими електродами для виробів з мало- і низьковуглецевої сталі;

– аргонодугового зварювання електродом на змінному та постійному струмі, який не плавиться, а також для ручного зварювання покритими електродами для виробів з усіх видів металів і сплавів.

**14.3. Зварювальні трансформатори, зварювальні випрямлячі, генератори постійного струму**

Зварювальні трансформатори (рис. 14.6) є одним із поширених джерел живлення для електрозварювальних установок у процесі зварювання на змінному струмі. Це пояснюється простотою їхньої конструкції та надійністю в роботі.

Зварювальним трансформаторам властива крутоспадна зовнішня характеристика. Залежно від способу отримання характеристики та способу регулювання зварювального струму зварювальні трансформатори поділяють на дві групи:

1. Трансформатори з нормальним магнітним розсіюванням і окремим дроселем, обмотка якого підключається послідовно з вторинною обмоткою трансформатора (рис. 14.7).



Рис. 14.6 – Загальний вигляд зварювальних трансформаторів

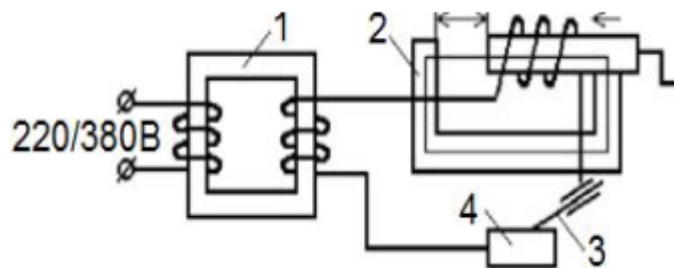


Рис. 14.7 – Структурна схема електрозварювальної установки з трансформатором і дроселем: 1 – зварювальний трансформатор, 2 – дросель; 3 – електрод; 4 – деталь

Трансформатор (1) становить звичайний силовий знижувальний трансформатор із нормальним магнітним розсіюванням. Регулювання зварювального струму відбувається внаслідок змін зазору  $\delta$  між рухомими та нерухомими частинами магнітопроводу дроселя (2).

Мінімальний зварювальний струм спостерігається при  $\delta = 0$ , а максимальне значення – при  $\delta = \delta_{max}$ .

2. Трансформатори з підвищеним магнітним розсіюванням. Залежно від способу отримання підвищеного магнітного розсіювання ці трансформатори класифікуються на такі:

- трансформатори з вбудованим дроселем (рис. 14.8).



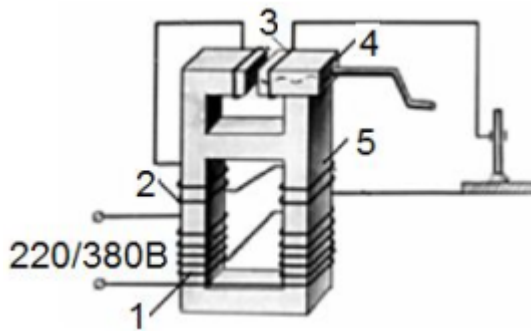


Рис. 14.8 – Структурна схема електрозварювальної установки з додатковою реактивною обмоткою на загальному магнітопроводі: 1 – первинна обмотка; 2 – вторинна обмотка; 3 – реактивна обмотка; 4 – рухома частина магні-топровода; 5 – магнітопровід

У цій установці дросель і трансформатор вмонтовані в один корпус і мають єдину магнітну систему. Плавне регулювання зварювального струму досягається аналогічно до попередньої конструкції.

– трансформатори з рухомою вторинною обмоткою (рис. 14.9). У таких трансформаторах вторинна обмотка (3) має можливість переміщатися вздовж стрижнів магнітопровода (2), унаслідок чого змінюється індуктивність розсіювання.

У разі зближення первинної та вторинної обмоток індуктивність розсіювання зменшується, а зварювальний струм збільшується, а у разі збільшення відстані між обмотками виникають зворотні явища.

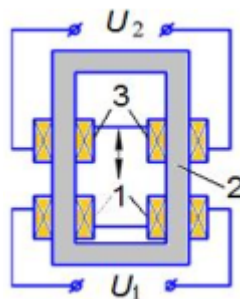


Рис.14.9 – Структурна схема електрозварювальної установки з вторинною рухомою обмоткою: 1 - первинна обмотка; 2 – магнітопровід; 3 – вторинна обмотка

Для розширення діапазону регулювання зварювального струму первинна і вторинна обмотки поділяються на дві секції, які можуть з'єднуватися як послідовно, так і паралельно.

– трансформатори з магнітними шунтами. У таких трансформаторах використовуються шунти двох видів (рис. 14.10, а): без підмагнічування та з підмагнічуванням. Первинна обмотка (1) і вторинна обмотка (4) закріплені нерухомо на магнітопроводі (2). На відміну від попередньої конструкції трансформатора тут передбачений магнітний шунт (3), який може обертатися навколо осі за допомогою механізму, що і призводить до зміни величини повітряного зазору між шунтом і стрижнем магнітопровода. Це зі свого боку забезпечує зміну величин індуктивного опору

розсіювання та зварювального струму. За умови зменшення зазору зварювальний струм зменшується.

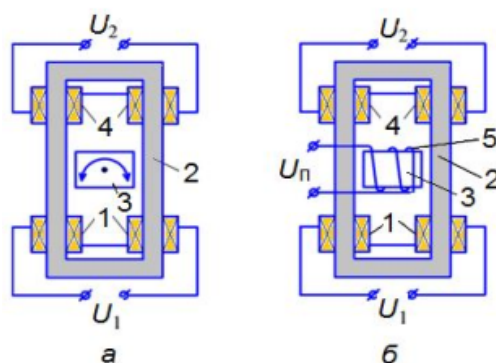


Рис. 14.10 – Структурні схеми електрозварювальних трансформаторів із шунтами: а) без підмагнічування; б) з підмагнічуванням: 1 – первинна обмотка; 2 – магнітопровід; 3 – шунт; 4 – вторинна обмотка; 5 – обмотка підмагнічування

У трансформаторах із магнітним шунтом із підмагнічуванням (рис. 14.10, б) на шунті (3) розміщується обмотка (5), яка підключена до регульованого джерела живлення постійним струмом. Коли струм в обмотці намагнічування відсутній, магнітний опір має найменше значення. Шляхом плавного збільшення струму в обмотки підмагнічування досягається плавне зменшення зварювального струму:

– трансформатори зі ступінчастим регулюванням зварювального струму. У таких трансформаторах вторинна обмотка має кілька напайок, які підключені до різного числа витків. За допомогою перемикача відбувається ступінчата зміна кількості витків вторинної обмотки, а отже, вимірюються зварювальні струми та напруги. Підвищене магнітне розсіювання у таких трансформаторах досягається шляхом розміщення первинної та вторинної обмоток на різних стрижнях магнітопроводу.

Прикладом зварювальних установок є зварювальні трансформатори типу ТДМ, зображених на рисунку 14.11.



Рис. 14.11 – Зварювальні трансформатори для ручного зварювання типу ТДМ

Такі зварювальні трансформатори призначені для ручного дугового зварювання покритими електродами на змінному струмі низьковуглецевих і низьколегованих сталей. Плавне регулювання зварювального струму в широкому діапазоні відбувається в цих трансформаторах за допомогою рухомого шунта. Технічні характеристики деяких зварювальних трансформаторів наведені в таблиці 14.2.

Таблиця 14.2

## «Технічні характеристики зварювальних установок»

| Параметри                  | Типи установок дугового зварювання |             |             |             |
|----------------------------|------------------------------------|-------------|-------------|-------------|
|                            | ТДМ-140                            | ТДМ-180     | ТДМ-200     | ТДМ-250     |
| $U_m$ , В                  | 220                                | 220         | 220         | 380         |
| $f$ , Гц                   | 50                                 | 50          | 50          | 50          |
| $I_n$ , А (при ТВ, %)      | 140 (10 %)                         | 180 (20 %)  | 180 (20 %)  | 250(10 %)   |
| $\Delta I$ , А             | 44–140                             | 38–180      | 60–190      | 54–170      |
| $U_0$ , В                  | 50                                 | 70          | 59          | 70          |
| $S$ , кВА                  | 7                                  | 13          | 7           | 18          |
| $D$ , мм                   | 2–3                                | 2–4         | 2–4         | 2–5         |
| $D \times Ш \times В$ , мм | 270×225×415                        | 360×360×940 | 440×212×302 | 360×360×940 |
| $M$ , кг                   | 60                                 | 60          | 110         | 120         |

У таблиці надано такі позначення: де  $U_m$  – номінальна напруга ланцюга живлення, В;  $f$  – частота мережі живлення, Гц;  $I_n$  – номінальний зварювальний струм, А;  $\Delta I$  – межі регулювання зварювального струму, А;  $U_0$  – напруга холостого ходу, В;  $S$  – повна потужність, кВА; ККД;  $D$  – діаметр електрода, мм;  $D \times Ш \times В$  – габаритні розміри, мм;  $M$  – маса випрямляча, кг.

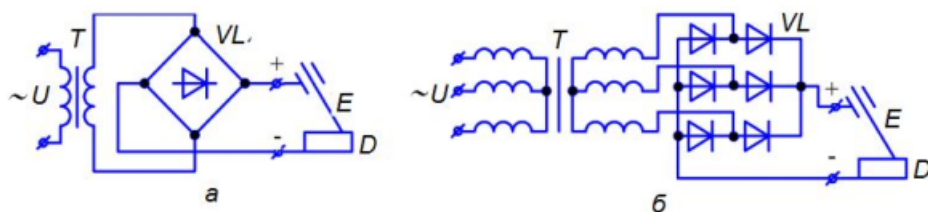
Зварювальні випрямлячі є джерелами постійного струму для електрозварювальних установок та мають різні конструкції, електричні схеми і призначення.

Зварювальні випрямлячі класифікуються за такими показниками:

- за кількістю фаз: однофазні та трифазні;
- за можливістю керування: із некерованими (кремнієві та селенові діоди) і керованими (тиристри) вентилями;
- за видом зовнішньої характеристики: падаюча; полого і жорстка; Загалом зварювальні випрямлячі мають головні складники:
  - знижувальний трансформатор;
  - випрямний блок, який призначений для перетворення змінного струму в постійний і регулювання (у регульованих) величини напруги;
  - блок пускорегулювання та захисту;
  - систему примусового охолодження.

На практиці використовують трансформатори з дроселем (рис. 14.12) для отримання необхідної зовнішньої характеристики.

Випрямний блок  $VL$  складається з вентилів, які збираються з однофазною (рис. 14.12, а) або трифазною мостовою схемою (рис. 14.12, б). У некерованих випрямлячах використовуються діоди, а у керованих – тиристри.



Режим роботи вентилів залежить від зовнішньої характеристики випрямляча. Наприклад, при падаючій зовнішній характеристиці струми КЗ практично не відрізняються від значень робочого струму, а тому номінальний струм випрямного блоку вибирається таким, що він прирівнюється постійному значенню максимального струму КЗ.

Для випрямлячів із жорсткою зовнішньою характеристикою коливання струмів КЗ можуть майже на порядок перевищувати значення робочого струму. Тому в таких випрямлячах обов'язковим є обмеження струмів КЗ, наприклад, унаслідок використання дроселів насичення або використання швидкодіючих електричних апаратів захисту, характеристики яких є значно кращими, ніж у вентилів.

Прикладом зварювальних однопостових випрямлячів є конструкції типу ВД (рис. 14.13), які призначені для таких видів робіт:

- ручного дугового зварювання покритим електродом на постійному струмі низьковуглецевих, а також корозійностійких сталей;



- ручного дугового зварювання покритим електродом, а також для аргонодугового зварювання електродом, який не плавиться, на постійному струмі низьковуглецевих, а також корозійностійких сталей.

Технічні дані деяких зварювальних випрямлячів наведено в таблиці 14.3.

Таблиця 14.3

**«Технічні характеристики зварювальних випрямлячів однопостового типу»**

| Параметри | Типи установок дугового зварювання |        |          |         |
|-----------|------------------------------------|--------|----------|---------|
|           | ВД-162                             | ВД-131 | ВД-306М1 | ВД-306Д |
| $U_m$ , В | 220                                | 220    | 380      | 380     |

|  |             |             |             |             |
|--|-------------|-------------|-------------|-------------|
| $f$ , Гц                                 | 50          | 50          | 50          | 50          |
| $I_n$ , А (при ТВ, %)                    | 160 (60 %)  | 180 (20 %)  | 150 (80 %)  | 315 (60 %)  |
| $\Delta I$ , А                           | 20–160      | 38–180      | 50–180      | 40–350      |
| $U_0$ , В                                |             | 70; 100     | 80          | 95          |
| $S$ , кВА                                | 5,3         | 12, 5       | 15; 13,5    | 25          |
| $D$ , мм                                 | 2–4         | 2–4         | 2–4         | 2–6         |
| $D \times \text{Ш} \times \text{В}$ , мм | 400×165×290 | 360×360×940 | 360×360×940 | 390×700×600 |
| $M$ , кг                                 | 8           | 60          | 73          | 125         |

У таблиці подано такі позначення: де  $U_m$  – номінальна напруга ланцюга живлення, В;  $f$  – частота мережі живлення, Гц;  $I_n$  – номінальний зварювальний струм, А;  $\Delta I$  – межі регулювання зварювального струму, А;  $U_0$  – напруга холостого ходу, В;  $S$  – повна потужність, кВА; ККД;  $D$  – діаметр електрода, мм;  $D \times \text{Ш} \times \text{В}$  – габаритні розміри, мм;  $M$  – маса випрямляча, кг.

Джерелом живлення для випрямляча може бути мережа змінного струму частоту 50 Гц та напругу 220 або 380 В. Підключення/відключення зварювальної установки від джерела живлення відбувається за допомогою контактів перемикача SA1:1 – SA1:4. Для зварювання на змінному струмі підключення зварювального ланцюга відбувається до розмикачів XS3 – XS4, а для зварювання на постійному струмі – до розмикачів XS1 – XS2.

Принципова схема зварювального випрямляча зображена на рисунку 14.14.

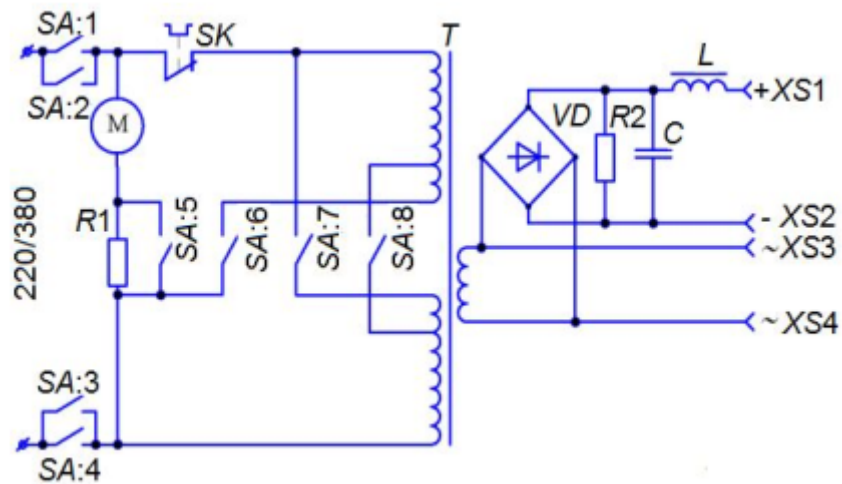


Рис. 14.14 – Принципова схема зварювального випрямляча

Для захисту від тривалих перевантажень по струму в схемі передбачено термореле SK. Перелік елементів схеми показаний у таблиці 14.4.

Багатопостові зварювальні випрямлячі призначені для комплектації одночасно декількох зварювальних постів. Прикладом таких електрозварювальних установок можуть бути зварювальні випрямлячі типу ВДМ (рис. 14.15), які призначені для комплектації зварювальних постів ручного дугового зварювання покритими електродами виробів з легованих сталей.

Такі випрямлячі мають жорстку вихідну характеристику та є регульованими. Технічні характеристики зварювальних випрямлячів наведені в таблиці 14.5.

Таблиця 14.4

«Перелік елементів схеми рисунка 14.13»

|                  |  |
|------------------|--|
| Позначення       | Найменування, тип                      |
| <i>C</i>         | Конденсатор МБГЧ–1-500 В–1,0 мкФ       |
| <i>M</i>         | Електроventильатор 220–230 В; 50–60 Гц |
| <i>R1</i>        | Резистор С5 – 35В – 25 Вт – 1,2 кОм    |
| <i>R2</i>        | Резистор С2 – 23 – 2 – 5,6 кОм         |
| <i>SA</i>        | Перемикач <i>LK 32R/43AP</i>           |
| <i>SK</i>        | Термореле 60Т11Ех – 15 L120 – 50С      |
| <i>XS1 – XS4</i> | Гніздо панельне ВЕВ1025                |
| <i>VD</i>        | Блок випрямний ВД – 131                |



Рис. 14.15 – Багатопостові зварювальні випрямлячі типу ВДМ

Таблиця 14.5

«Технічні характеристики багатопостових зварювальних випрямлячів»

| Параметри            | Типи установок дугового зварювання |               |               |
|----------------------|------------------------------------|---------------|---------------|
|                      | ВДМ – 6303С                        | ВДМ –1202С    | ВДМ-1600С     |
| $U_m, В$             | 380                                | 380           | 380           |
| $f, Гц$              | 50                                 | 50            | 50            |
| $I_n, А$ (при ТВ, %) | 630 (100 %)                        | 1 250 (100 %) | 1 600 (100 %) |

|                            |             |              |              |
|----------------------------|-------------|--------------|--------------|
| $N$ , шт                   | 4           | 8            | 10           |
| $K_o$                      | 0,5         | 0,5          | 0,5          |
| $I_n$ пос.                 | 315 (60 %)  | 315 (60 %)   | 315 (60 %)   |
| $U_p$ , В                  | 60          | 63           | 60           |
| $U_0$ , В                  | 75          | 75           | 73           |
| $S$ , кВА                  | 46          | 96           | 120          |
| $D$ , мм                   | 3-6         | 3-6          | 3-6          |
| $D \times Ш \times В$ , мм | 595×720×630 | 600×1130×800 | 1050×717×789 |
| $M$ , кг                   | 205         | 350          | 420          |

У таблиці подано такі позначення: де  $U_m$  – номінальна напруга ланцюга живлення, В;  $f$  – частота мережі живлення, Гц;  $I_n$  – номінальний зварювальний струм, А;  $N$  – кількість одночасно працюючих постів, шт;  $K_o$  – коефіцієнт одночасної роботи;  $I_n$  пос. – номінальний зварювальний струм одного поста, А;  $U_p$  – номінальна робоча напруга, В;  $U_0$  – напруга холостого ходу, В;  $S$  – повна потужність, кВА; ККД;  $D$  – діаметр електрода, мм;  $D \times Ш \times В$  – габаритні розміри, мм;  $M$  – маса випрямляча, кг.

Для забезпечення можливості незалежного регулювання зварювального струму на окремому посту використовуються баластні реостати типу РБ-302 (рис. 14.16).

За допомогою баластного реостата також досягається необхідна крутизна зовнішньої характеристики на зварювальному посту. Технічні характеристики баластного реостата наведено в таблиці 14.6.



Рис. 14.16 – Реостат баластний типу РБ

Таблиця 14.6

**«Технічні характеристики баластного реостата типу РБ»**

| Найменування параметрів | Значення |
|-------------------------|----------|
| Номінальний струм, А    | 315      |
| Опор, Ом                |          |

|  |             |
|--|-------------|
| – найменший                                  | 0,09        |
| – найбільший                                 | 55          |
| Діапазон регулювання зварювального струму, А | 6–315       |
| Маса, кг                                     | 26          |
| Габаритні розміри, мм                        | 605×370×500 |

Зварювальні генератори постійного струму становлять собою електричну машину постійного струму, в якій відбуваються перетворення механічної енергії, що підводиться від приводного двигуна в електричну енергію на невеликій напрузі.

Зварювальні генератори класифікуються:

- за видом приводного двигуна: зварювальні перетворювачі, приводним двигуном яких є асинхронний двигун з короткозамкненим ротором; зварювальні агрегати, у яких приводним двигуном є двигун внутрішнього згоряння (бензиновий або дизельний);
- за видом зовнішньої характеристики: із крутопадаючою, пологою, жорсткою, універсальною;
- за кількістю постів: одно- та багатопостові;
- залежно від способу збудження: із незалежним збудженням і послідовною обмоткою розмагнічування (підмагнічування); із паралельним збудженням і послідовною обмоткою розмагнічування; із розімкнутими полюсами; з поперечним полем.

У генераторів незалежного збудження та послідовною обмоткою розмагнічування (підмагнічування) обмотка збудження  $LG2$  (рис. 14.17) живиться від незалежного джерела живлення з напругою  $U_3$ , функції якого в деяких електрозварювальних установках виконують тиристорні випрямлячі.

Величина магнітного потоку  $\Phi_n$  обмотки незалежного збудження регулюється за допомогою реостата  $R$ . Обмотка  $LG1$  підключена послідовно до зварювального ланцюга, тому величина магнітного потоку  $\Phi_p$ , який вона створює, пропорційно залежить від сили зварювального струму.

Якщо обмотки  $LG1$  і  $LG2$  підключені так, що їхні магнітні потоки  $\Phi_p$  і  $\Phi_n$  збігаються, то обмотка  $LG1$  буде підмагнічувальною й у разі зміни зварювального струму напруга  $U_d$  на виході генератора буде залишатися незмінною, тобто характеристика буде «жорсткою».

Якщо обмотки  $LG1$  і  $LG2$  підключені так, що їхні магнітні потоки  $\Phi_p$  і  $\Phi_n$  спрямовані назустріч один одному, то обмотка  $LG1$  буде розмагнічувальною. Вихідна характеристика такого генератора буде падаючої або крутопадаючою, а у разі збільшення зварювального струму напруга  $U_d$  на виході генератора буде зменшуватися.

Різний нахил зовнішньої характеристики, а відповідно, і зміна струму  $K3$  досягаються шляхом секціонування обмотки  $LG1$ .

У зварювального генератора паралельного збудження з послідовною обмоткою розмагнічування (рис. 14.18) магнітні потоки основної обмотки  $LG2$  ( $\Phi_n$ ) і обмотки  $LG1$  ( $\Phi_p$ ) спрямовані назустріч один одному.

Обмотка паралельного збудження  $LG2$  підключена лише наполовину витків обмотки якоря через наявність щітки « $b$ ». Величина магнітного потоку  $\Phi_n$ , який створює ця обмотка, не залежить від величини зварювального струму, оскільки магнітний потік (намагнічувальний) реакції якоря, який діє в цій половині полюса, компенсує



розмагнічувальну дію послідовної обмотки  $LG_1$ . Такі генератори мають вихідні характеристики, що спадають.

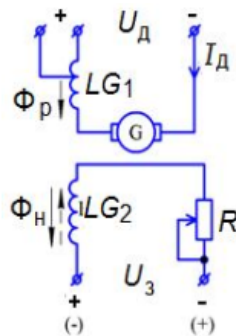


Рис. 14.17 – Схема зварювального генератора незалежного збудження з послідовною обмоткою розмагнічування (підмагнічування)

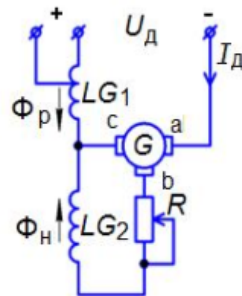


Рис. 14.18 – Схема зварювального генератора паралельного збудження з послідовною обмоткою розмагнічування

Прикладом зварювального генератора є зварювальний перетворювач типу ПСО-500 (рис. 14.19). В одному корпусі перетворювача розташовується приводний трифазний асинхронний двигун із короткозамкненим ротором і зварювальний генератор. На загальному валу містяться якор генератора, ротор асинхронного двигуна та вентилятор.

Технічні характеристики деяких зварювальних перетворювачів наведені в таблиці 14.7.



Рис. 14.19 – Зварювальні перетворювачі

## «Технічні характеристики зварювального перетворювача»

| Параметри                                | Тип перетворювача |          |         |         |           |           |
|--|-------------------|----------|---------|---------|-----------|-----------|
|  | ПСО-120           | ПСО-300А | ПСО-500 | ПСО-800 | АСО-2000  | ПС-1000   |
| Тип генератора                           | ГСО-120           | ГСО-300А | ГСО-500 | ГСО-800 | СГ-1-000  | ГС-1-000  |
| Номінальний зварювальний струм, А        | 120               | 300      | 500     | 800     | 1-000     | 1-000     |
| Напруга неробочого ходу, В               | 48–60             | 55–80    | 58–86   | 60–90   | –         | –         |
| Межі регулювання зварювального струму, А | 30–120            | 75–300   | 25–600  | 200–800 | 300–1 200 | 300–1 200 |
| Потужність перетворювача, кВт            | 7,3               | 12,5     | 28      | 55      | 56        | 55        |
| Швидкість обертання якоря, об/хв.        | 2 900             | 2 890    | 2 930   | –       | 1 460     | 1 460     |
| КПД перетворювача, %                     | 55                | 60       | 59      | 57      | 59        | 60        |
| Габаритні розміри, мм                    |                   |          |         |         |           |           |
| – довжина                                | 1 055             | 1 015    | 1 052   | 1 275   | 4 000     | 1 465     |
| – ширина                                 | 550               | 708      | 770     | –       | 93,5      | 770       |
| – ВИСОТА                                 | 730               | 980      | 1 080   | –       | 1 190     | 910       |
| Маса, кг                                 | 155               | 400      | 540     | 1 040   | 1 400     | 1 600     |

Прикладом зварювального агрегату є пристрій типу АДД (рис. 14.20), який призначений для живлення одного зварювального поста для ручного дугового зварювання на постійному струмі.

Такі електрозварювальні установки використовуються для зварювання в польових умовах, де живлення від мережі неможливо чи є складності. Тому ці установки виконуються мобільними.



Рис. 14.20 – Електрозварювальні агрегати

Приводним двигуном у таких установках є дизельний двигун типу Д-144 із повітряним охолодженням або типу Д-242 із водяним охолодженням. Джерелом зварювального струму в таких агрегатах є зварювальний генератор типу ГД. Агрегати виконують зварювання електродами з діаметром від 1,6 до 6 мм із будь-яким типом покриття. Діапазон регулювання зварювального струму становить 60–430 А.

#### 14.4. Контактні електрозварювальні установки

Незважаючи на велику різноманітність електрозварювальних установок для контактного зварювання, принцип їхньої дії полягає в тому, що ділянки деталей, які зварюються, приводять до контактування один з одним, нагріваючи їх до пластичного або розплавленого стану струмом, який проходить, безпосередньо, через місце зварювання. Після відключення електричного струму та подальшого механічного натискання деталей відбувається охолодження місць зварювання і створення нероз'ємного з'єднання між деталями.

До головних видів контактного зварювання належать: точкове, рельєфне, роликове і стикове (рис. 14.21).

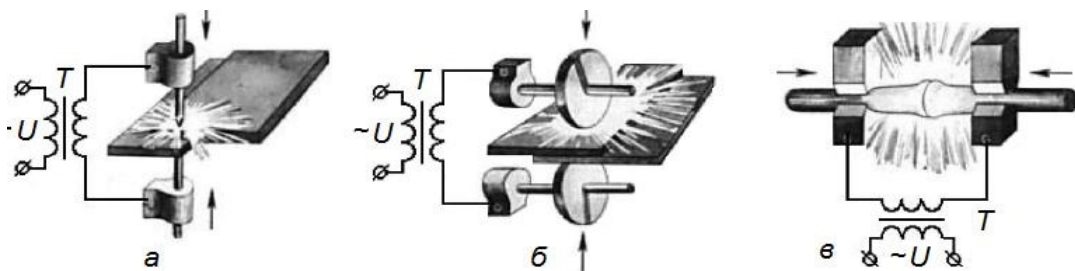


Рис. 14.21 – Види контактного зварювання: *a* – точкове; *б* – роликове; *в* – нажимне

Під час точкового зварювання (рис. 14.21, *a*) деталі для зварювання розміщують між електродами, які закріплюються в електротримачах.

За допомогою натискного механізму електроди з певним зусиллям стискають деталі. Через електроди та деталі, що зварюються, пропускають струм, який нагріває деталі до температури плавлення або пластичного стану на невеликих контактних ділянках. Після відключення струму відбувається охолодження контактних ділянок і створення нероз'ємного точкового шва.

Такий вид зварювання використовують для зварювання деталей завтовшки до 6 мм. Залежно від кількості точок, в яких одночасно відбувається зварювання, розрізняють одне-, дво- і багатоточкове зварювання.

*Рельєфне зварювання* є одним з видів точкового зварювання, при якому одна з деталей має виступи, через які відбувається початкове контактування з іншою деталлю, а потім у процесі зварювання ці виступи плавляться та забезпечують створення точкового зварювального шва.

Під час *роликового (шовного) зварювання* (рис. 14.21, *б*) деталі розташовують між роликами, які за допомогою натискного механізму стискають їх із необхідним зусиллям. У процесі зварювання відбувається переміщення деталей і проходження через ролики та деталі струму, що нагріває деталі до температури плавлення або пластичного стану. Після

охладження створюється зварювальний шов. Залежно від виду шва поділяють безперервне та перервне шовне зварювання. Такий спосіб зварювання використовують для зварювання матеріалу завтовшки 1,5–02 мм.

Під час *стикового зварювання опором* (рис. 14.21, в) можливі два їхні види: зварювання опором і зварювання оплавленням.

Під час *стикового зварювання опором* стики деталей спочатку дуже стискаються, а потім пропускається струм через деталі в місці їх контактування. Під час проходження струму через деталі внаслідок великого опору в місці контактування відбувається інтенсивне нагрівання торців і поява тонкого розплавленого шару матеріалу деталей.

Під час *стикового зварювання оплавленням* спочатку подається напруга на обидві деталі. Потім відбувається їх поступове зближення до положення контактування торців цих деталей без докладання значних механічних зусиль. За умови достатнього нагрівання матеріалу деталей по довжині стику деталі стискаються з великим зусиллям, що сприяє витісненню розплавленого металу, а добре прогрітий метал пластично деформується та зварюється. Таке зварювання використовується для зварювання у стик листів, труб, замкнутих профілів та інших деталей.

Головним елементом електрозварювальної установки (рис. 14.22) для контактного зварювання є зварювальний трансформатор і пусковий пристрій (далі ПП).



Рис. 14.22 – Установки для контактного зварювання деталей (а) та трансформатори (б)

Зварювальні трансформатори класифікуються за такими ознаками:

- за виконанням первинних обмоток (із циліндричними та дисковими котушками);
- за виконанням вторинних обмоток (із гнучким рухомим вторинним витком і з жорстким нерухомим вторинним витком);
- за взаємним розміщенням первинних і вторинних обмоток (із симетричним і несиметричним розміщенням обмоток);

– за розміщенням первинних обмоток на стрижнях магнітопроводу (на одній і на двох стрижнях);

– за виконанням магнітопроводу (стрижневі, броньові, кільцеві).

Конструкція первинних обмоток трансформаторів установок для контактного зварювання аналогічна до тої, що мають трансформатори установок для дугового зварювання. Вторинні обмотки трансформаторів мають конструктивні особливості та є різноманітними (із мідних пластин, трубчасті з міді тощо) залежно від технологічних можливостей та енергетичних показників машини.

Використання пускового пристрою (рис. 14.23) обумовлено тим, що електричне контактне зварювання відбувається імпульсним струмом, час проходження якого зазвичай триває від сотих секунд до декількох секунд. Якість зварювання значною мірою залежить як від сили струму, так і від тривалості його перебігу. Недотримання співвідношення цих параметрів може призвести до непроварювання або прожигання матеріалу.

Тому операція включення/відключення струму виконується за допомогою пускового пристрою, до складу якого входить контактор і керований програмний регулятор часу.



Рис. 14.24 – Пускові пристрої для установок контактної зварювання

У сучасних конструкціях установок для зварювання зазвичай використовують тиристорні контактори (рис. 14.24), які, порівняно з електромагнітними, мають низку істотних переваг: високу надійність, велику частоту включення, меншу потужність власних втрат, менші габарити та масу.

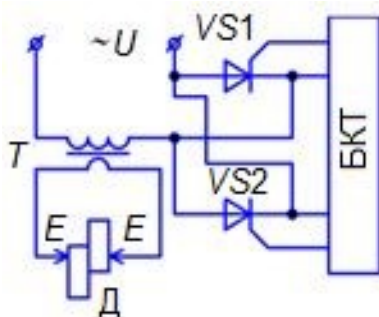


Рис. 14.24 – Схема тиристорного контактора

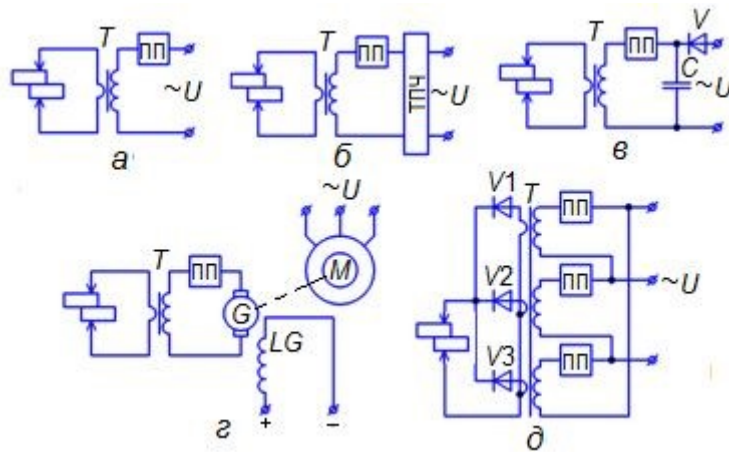


Рис. 14.25 – Електричні схеми зварювальних установок для контактного зварювання

Типовими електричними схемами електрозварювальних установок для контактного зварювання є такі:

- схеми на змінному струмі промислової частоти (рис. 14.25, а). Їхня перевага – простота;
- схеми для контактного зварювання на змінному струмі зниженої частоти (рис. 14.25, б). У таких схемах використовуються зазвичай тиристорні перетворювачі частоти, які знижують частоту змінного струму до 5–15 Гц. Їхньою перевагою є зменшення питомих втрат електроенергії;
- конденсаторна електрична схема (рис. 14.25, в), в якій імпульс зварювального струму створюється за допомогою енергії, яка накопичується в конденсаторі;
- для зварювання на постійному струмі (рис. 14.25, г). Згідно з цією схемою механічна енергія на вал зварювального генератора  $G$  із незалежним збудженням передається від трифазного асинхронного двигуна  $M$  із короткозамкненим ротором. За допомогою перетворювального пристрою імпульс постійного струму подається на первинну обмотку зварювального трансформатора  $T$ ;
- електрична схема з випрямлячем струму у вторинному контурі (рис. 14.25, д). Така схема забезпечує створення імпульсу однієї полярності практично необмеженої тривалості. Для випрямлення струму можуть використовуватися як керовані, так і некеровані вентиля.

Прикладом електрозварювальних установок для контактного зварювання є машина типу МТ-501 (рис. 14.26), яка призначена для точкового зварювання на змінному струмі виробів з низьковуглецевих і нелегованих сталей. У таких машинах використовується ножний привід за допомогою якого відбувається стискання деталей між електродами. Технічні характеристики таких машин показані в таблиці 14.8.

Таблиця 14.8

**«Технічні характеристики машини для точкового зварювання типу МТ-501»**

| Найменування параметрів    | Значення       |
|----------------------------|----------------|
| Напруга мережі живлення, В | $2 \times 380$ |

|   |       |
|---|-------|
| Частота мережі живлення, Гц                         | 50    |
| Кількість ступенів регулювання                      | 2     |
| Найбільший вторинний струм, кА                      | 5     |
| Номинальний робочий струм ( ПВ = 15 %)              | 2,5   |
| Межі регулювання тривалості зварювального струму, с | 0,1–3 |
| Найбільше зусилля стискання деталей, кГс            | 125   |
| Максимальна споживана потужність, кВА               | 38    |



Рис. 14.26 – Машина для кон-тактного точкового зварювання типу МТ-501

Машина рельєфного контактного зварювання типу МР-8010 (рис. 14.27) призначена для зварювання змінним струмом деталей із низьковуглецевої сталі, наприклад арматури залізобетонних виробів та інших.

Технічні характеристики машини наведені в таблиці 14.9.

Прикладом зварювальної машини для роликового (шовного) зварювання є установка для зварювання змінним струмом виробів із гальванічним покриттям (рис. 14.28), таких як оцинкованих сталей і сталей без покриття. Конструктивною особливістю машини є наявність приводу на два ролика, які мають кут нахилу 60°.

Таблиця 14.9

**«Технічні характеристики машини рельєфного контактного зварювання типу МР-8010»**

| Найменування параметрів          | Значення |
|----------------------------------|----------|
| Напруга мережі живлення, В       | 380      |
| Рід зварювального струму         | змінний  |
| Найбільша потужність при КЗ, кВА | 780      |
| Потужність при ПВ = 50 %, кВА    | 250      |

|                                |                 |
|--------------------------------|-----------------|
| Найбільший вторинний струм, кА | 80              |
| Зусилля стискання, кГс         | 200-3010        |
| Габарити (Д × Ш × В) мм        | 1 660×610×2 500 |
| Маса, кг                       | 1 300           |
| Частота мережі живлення, Гц    | 50              |



Рис. 14.27 – Машина рельєфного контактеного зварювання типу MR-8010

Такі машини можуть виконувати зварювання бортів, днищ у баках прямокутної форми тощо. Технічні характеристики таких машин наведені в таблиці 14.10.

Таблиця 14.10

**«Технічні характеристики машини шовного зварювання типу МШ-3210»**

| Найменування параметрів                     | Значення        |
|---|-----------------|
| Напруга мережі живлення, В                  | 380             |
| Потужність при ПВ = 50 %, кВА               | 192             |
| Найбільший вторинний струм, кА              | 32              |
| Номинальний тривалий вторинний струм, кА    | 22              |
| Лінійна швидкість роликів електродів, мм/хв | 0,5-2,5         |
| Діаметр електродів                          | 220/280         |
| Габарити (Д × Ш × В) мм                     | 2 275×650×2 030 |
| Маса, кг                                    | 1 720           |
| Частота мережі живлення, Гц                 | 50              |





Рис. 14.28 – Машина шовного зварювання типу МШ-3210

Прикладом електрозварювальної установки для контактеного стикового зварювання безперервним оплавленням є машина типу К-823 (рис. 14.29). Процес зварювання відбувається автоматично згідно з установленою програмою. Такі машини призначені для роботи в польових та стаціонарних умовах. Технічні характеристики машин наведені в таблиці 14.11.

Таблиця 14.11

**«Технічні характеристики машини стикового зварювання»**

| Найменування параметрів                  | Значення     |
|--|--------------|
| Напруга мережі живлення, В               | 380          |
| Найбільший вторинний струм, кА           | 50           |
| Номінальний тривалий вторинний струм, кА | 9            |
| Потужність при ПВ = 50 %, кВА            | 110          |
| Опір КЗ, мкОм                            | 100          |
| Робочий тиск у гідросистемі, МПа         | 10           |
| Маса, кг                                 | 2 700        |
| Габарити (Д×Ш×В) мм                      | 1622×880×930 |



Рис. 14.29 – Контактна машина для стикового зварювання типу

### 14.5. Електрозварювальні установки для спеціальних видів зварювання

Для деталей великої товщини, а також кольорових металів і сплавів, неіржавих сталей використовуються спеціальні зварювальні установки.

Головними з них є такі:

1. Електрозварювальні установки для електрошлакового зварювання (рис. 14.30).

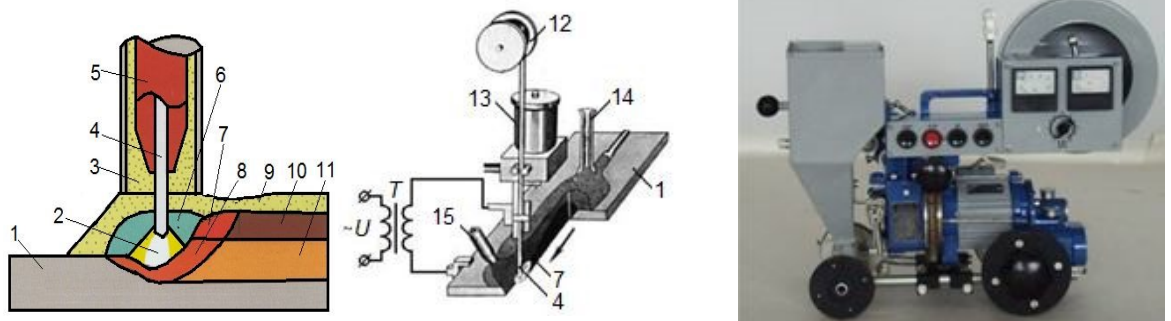


Рис. 14.30 – Електрозварювальні установки для електрошлакового зварювання: 1 – матеріали, що з'єднуються, 2 – електрична дуга; 3 – флюс; 4 – електрод; 5 – контактний наконечник; 6 – захисна атмосфера; 7 – розплавлений шлак; 8 – зварочна ванна; 9 – флюс; 10 – шлак, що застив; 11 – метал, що зварився; 12 – бухта подачі дроту; 13 – привод; 14 – сопло для видалення шлаку; 15 – сопло для подачі флюсу

Під час зварювання на таких установках електрод (4) розміщується між торцями деталей (1), що зварюються, які покриваються товстим шаром флюсу (3). У процесі горіння електричної дуги (2) відбувається плавлення флюсу і створення шлакової ванни (7). Температура шлакової ванни є достатньою для плавлення торців деталей (1) і електроду (4) у вигляді дроту, який автоматично подається в зону горіння дуги з бухти (12) за допомогою приводу (13). Джерелом живлення для таких електрозварювальних установок є зварювальні трансформатори з жорсткою зовнішньою характеристикою та

глибоким регулюванням напруги як однофазні, так і трифазні з вторинною напругою у 38–63 В і номінальним зварювальним струмом до 3 000 А.

Зварювальні установки дають змогу зварювати метали практично необмеженої товщини без скошування кромки за один прохід електрода;

2. *Електрозварювальні* установки для високочастотного зварювання. Такі установки залежно від способу отримання високої температури можуть бути двох видів.

В установках першого виду зварні деталі з'єднуються за допомогою торців, і місця їх контактування внаслідок індукційного нагрівання від індуктора нагріваються до температури плавлення. Джерелом живлення для індуктора є машинні або тиристорні перетворювачі з частотою у 1–70 кГц. Такі установки (рис. 14.31) використовуються для зварювання труб із чорних і кольорових металів. Їхнім головним недоліком є те, що значна частина енергії виділяється поза зони розплавлення торців зварених деталей.

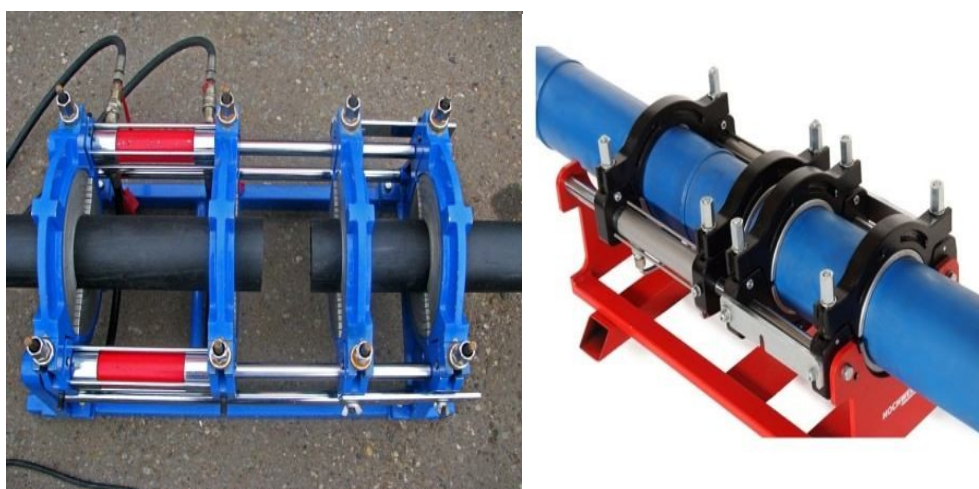


Рис. 14.31 – Установки для зварювання труб

В установках *другого виду* торці зварюваних деталей розміщуються в безпосередній близькості один від іншого. До зварюваних деталей підводиться напруга від високочастотного джерела живлення унаслідок проходження струму відбувається оплавлення торців, а потім під час їх з'єднання – зварювання. Джерелом живлення в таких установках є високочастотні генератори, які працюють на радіочастотах. Ці установки призначені для зварювання труб з листового заліза, електричних кабелів тощо;

3. *Електрозварювальні установки для плазмового зварювання/різання.* У таких установках (рис. 14.32) використовуються плазмотрони з дугою прямої та не прямої дії. Під час такого зварювання використовується теплова енергія стовпа дуги, що горить між двома електродами плазмотрона або між внутрішнім електродом плазмотрона та матеріалом зварюваних деталей. У таких установках використовуються джерела живлення з круто падаючими вертикальними зовнішніми характеристиками, потужність яких становить від 5 кВА до 160 кВА. Плазмове зварювання використовують для зварювання тугоплавких металів і сплавів, під час зварювання металів із неметалами, для наплавлення та нанесення покриття, різання металів тощо.

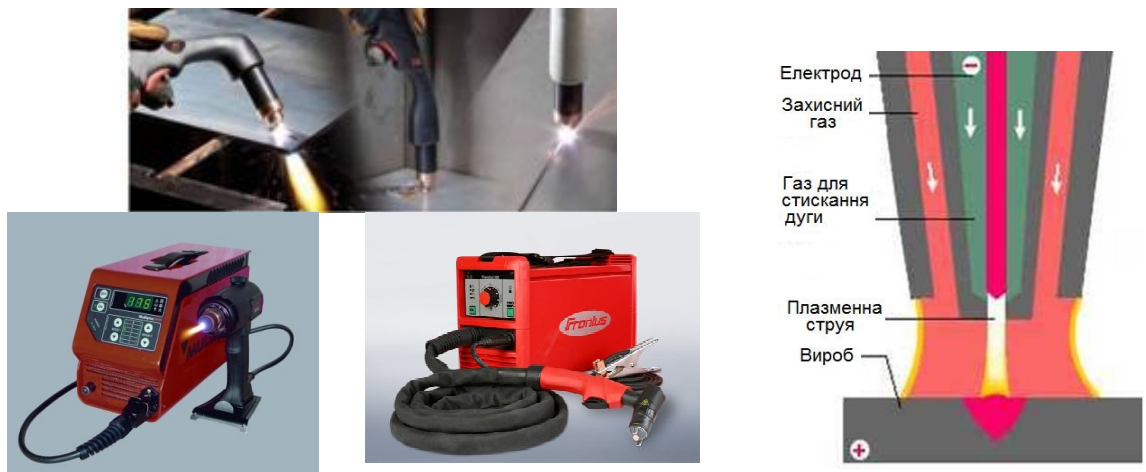


Рис. 14.32 – Плазмові зварювальні установки

4. *Електрозварювальні установки для лазерного зварювання/різання.* Такі установки (рис. 14.33) призначені для зварювання та різання металів і неметалів великої товщини (до десятків міліметрів). У цих установках процес зварювання може відбуватися на повітрі, у вакуумі та середовищі захисних газів;



Рис. 14.33 – Електролазерні зварювальні установки

5. *Електрозварювальні установки для електроннопроміневого зварювання.* Головним складником таких установок є електронна пушка, яка залежно від напруги може бути від 30 кВ до 100 кВ і вище. Потужність таких установок становить від 5 кВА до 160 кВА.

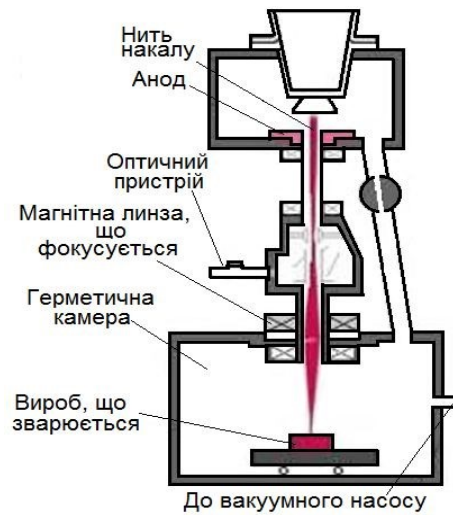


Рис. 14.34 – Установа для електронно-променевого зварювання

Таким чином, електрозварювальні установки для спеціальних видів зварювання технічних металевих і неметалевих конструкцій широко використовуються у сучасному світі. Завдяки використанню таких установок є можливість з'єднання елементів у будь-яких середовищах.

#### 14.6. Електрозварювальні установки як приймачі електричної енергії

Режим роботи більшості електрозварювальних установок повторнокороткочасний і лише для деяких – тривалий.

Діапазон потужностей електрозварювальних установок дуже широкий і становить від одиниць до десятків тисяч кіловольтампер. Нижче наводяться дані про потужність деяких видів установок, кВА:

- зварювальні трансформатори 5–170;
- зварювальні генератори 4–55;
- зварювальні випрямлячі 5–155;
- машини для точкового зварювання 10–200;
- машини для рельєфного зварювання 100–1 300;
- машини для роликового зварювання 50–1 100;
- конденсаторні машини 20–70;
- автоматичні зварювальні лінії 600–20 000.

Зазвичай електрозварювальні установки становлять однофазні приймачі електричної енергії, які підключаються до лінії на фазну напругу 220 В або на лінійну напругу 380 В. Тому вони визначають несиметрію струмів і напруг.

Більшості установок властиві низькі значення коефіцієнта потужності  $\cos\varphi$ .

#### Завдання на самостійне опрацювання та підготовку

1. Самостійно відновити матеріал по основним поняттям та визначенням;

2. Самостійно опрацювати матеріал з опису: Використання енергоефективних перетворювачів електроенергії в електромеханічних системах.

## ТЕМА №15. ЕЛЕКТРОЛІЗНІ УСТАНОВКИ

Мета: ознайомити здобувачів початкового рівня вищої освіти з загальними принципами електролізних установок для отримання чистих металів та газів

### План лекції

- 15.1. Електролізні установки для отримання чистих металів та газів.
- 15.2. Електролізні установки з розплавлених сполук солей і газів.
- 15.3. Джерела живлення електролізних установок.
- 15.4. Електролізні установки гальванотехніки, джерела живлення для електролізних установок гальванотехніки.
- 15.5. Електролізні установки як приймачі електричної енергії.

### Хід проведення лекційного заняття

- I. Організація групи;
- II. Мотивація навчальної діяльності. Оголошення теми й мети;
- III. Викладення та обговорення нового матеріалу.
- IV. Оголошення завдання на самостійне опрацювання та підготовку.

### 15.1. Електролізні установки для отримання чистих металів та газів

В основі принципу дії електролізних установок є явище *електролізу*.

*Електроліз* – це сукупність окисно-відновних процесів, що перебігають під час проходження постійного струму через розчин або розплав електроліту з зануреними у нього електродами.

*Електроліти* – це речовини, розчини та розплави, які можуть проводити електричний струм, носіями якого є іони, які утворюються внаслідок електролітичної дисоціації (процес розпаду речовин на рівномірно заряджені іони).

Уперше явище електролізу було відкрито в 1800 р. англійськими вченими У. Нікольсеном та А. Карлайлем під час спостереження виділення бульбашок кисню на катоді у процесі занурення електродів у воду (рис. 15.1).



У. Ніколсон  
(1753–1815рр.)



Е. Карлайл  
(1768–1842рр.)



М. Фарадей  
(1791–1867рр.)

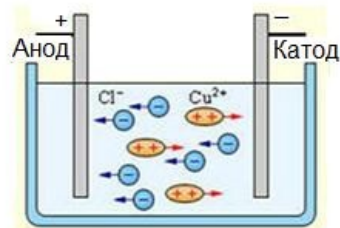


Рис. 15.1 – Відкриття явища електролізу

Закони електролізу вперше були експериментально встановлені англійським фізиком М. Фарадеєм у 1833 р.

На сьогодні широко використовується явище електролізу в промисловості, а саме для такого:

- отримання лужних (Li-літій, K-калій, Na-натрій) та лужноземельних (Ca-кальцій, Ba-барій, Sr-стронцій) металів і алюмінію (Al);
- отримання галогенів (F-фтор, Cl-хлор, I-йод, Br-бром) та водню (H) ітощо;
- нанесення металевого покриття на поверхню виробів (*гальваностегія* – нікелювання, хромування, золочення);
- виготовлення рельєфних металевих копій (*гальванопластика*);
- очищення кольорових металів від домішок (*рафінування*).

Відповідно до сфери використання електролізні установки класифікуються на установки:

- для отримання чистих металів та газів;
- гальванотехнічні установки.

Коротко розглянемо деякі електролізні установки отримання металів та принцип їхньої дії.

В електролізних установках для отримання чистих металів із водних розчинів отримують такі метали, як: нікель, срібло, цинк, золото, хром, мідь тощо, які мають електродний потенціал «– 1».

Як приклад розглянемо отримання цинку електролізним способом.

Електроліз цинку з водних розчинів його солей виконують у прямокутних ваннах (*електролізерах*), корпус яких виконується з дерева або залізобетону (рис. 15.2). У середині ванна покривається листами з вініласту або свинцю, а зовні кислотостійкої фарбою, бітумом або гумою. Для електроізоляції ванн від землі їх установлюють на ізолятори 7.

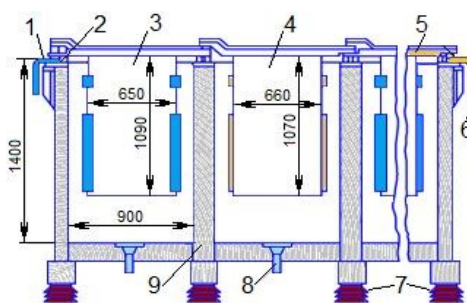


Рис. 15.2 – Конструкція електролізера для електролізу цинку: 1 – катод; 2 – катодна шина; 3 – катодна ванна; 4 – анодна ванна; 5 – анодна шина; 6 – анодний струмопровід; 7 – ізолятори; 8 – зливний патрубок; 9 – корпус ванни

У ваннах закріплюються алюмінієві катоди та свинцеві аноди прямокутної форми. Аноди розміщують між катодами на відстані 30-40 мм

Внутрішній об'єм ванни заповнюється (5–6) % водним розчином  $ZnSO_4$ . Напряга на ванні в процесі роботи дорівнює 3,5–4,5 В. Ванни розміщують-

ся поруч і об'єднуються у блоки. Напряга на блоках може коливатися до 300–400 В. Ванни у блоці з'єднуються послідовно, сила струму становить 7–12 кА, а щільність струму 400–600 А/м<sup>2</sup>.

У процесі електролізу на катоді осідає цинк, який після закінчення процесу(40–50 год.) знімається з катода і відправляється на переплавлення.

## 15.2. Електролізні установки з розплавлених сполук солей і газів

В установках для електролізу розплавлених сполук солей металів отримують метали, такі як алюміній, кальцій, натрій, магній, берилій, фтор тощо. Усі ці речовини мають нормальний потенціал нижче ніж «-1».

Розглянемо роботу таких установок на прикладі отримання алюмінію. Алюміній є найпоширенішим матеріалом, який в природі в чистому вигляді практично не зустрічається. Тому його отримують за допомогою електролізу з алюмінієвих руд.

Процес отримання алюмінію складається з декількох стадій:

- отримання з руди глинозему (окис алюмінію  $Al_2O_3$ );
- виробництво фтористих солей (фтористого алюмінію, фтористогонатрію);
- виробництво вугільної анодної маси, загартованих анодних і катодних блоків, а також інших футерувальних матеріалів;
- електролітичне виробництво алюмінію.

Схема електролізера для електролізу алюмінію наведена на рисунку 15.3.

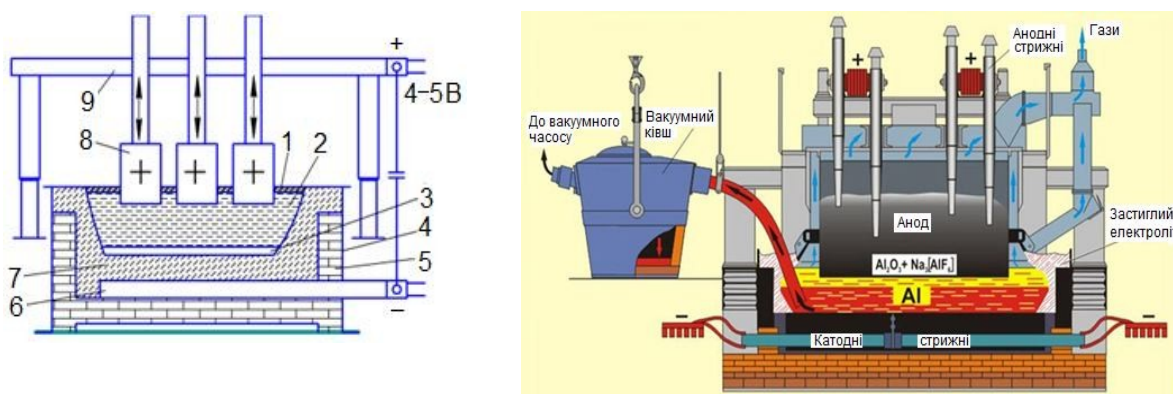


Рис. 15.3 – Схема електролізера для електроліза алюмінію: 1 – глинозем; 2 – кріоліто-глиноземний розплав; 3 – розплавлений алюміній; 4 – ванна; 5 - шамотна кладка; 6 – шина, що підводить струм; 7 – вугільні подові блоки; 8 – аноди; 9 – анодні шини

До складу електролізера входить ванна (4), яка виготовляється з металевих листів і має прямокутну форму. Усередині ванна футерована вугільними блоками, а знизу розміщується подина з вугільними блоками, до якої підводиться спеціальна шина (6), через яку підводиться струм. Бічні стіни ванни покривають азбестовими листами, та теплоізолюють глиноземом. Аноди (8) підвішують на рухомій рамі.

Процес електролізу полягає у виділенні на катоді металевого алюмінію та окислення вугільного анода, на якому виділяється кисень.

Функції катода виконує шар розплавленого алюмінію (3), який за допомогою більшої питомої маси осідає на дно ванни. Над шаром алюмінію розміщується шар розплавленого електроліту. Процес електролізу також супроводжується виділенням оксиду вуглецю. Електричне з'єднання ванн між собою та струмопроводом від джерела



живлення здійснюється за допомогою шин, в яких сила струму може становити 150 кА.

У нормальному режимі роботи напруга на ванні становить 4,2–4,5 В, але може збільшуватися за допомогою анодного ефекту, при якому газ обволікають анод і утворюється плівка, яка не проводить струм. Для усунення її необхідно періодично поповнювати глинозем в електроліт.

Процес електролізу алюмінію є дуже дорогим і енергоємним і потребує 14 000–16 000 кВт/год електроенергії на тону готової продукції.

Електролізні установки також використовуються для отримання великих об'ємів газів, таких як кисень, водень, хлор й інших шляхом розкладання води.

Електроди в таких установках виготовляють із заліза або нікелю. Під час електролізу на аноді створюються бульбашки з водню, які самостійно піднімаються по електроліту вгору, де і відбираються за допомогою спеціальних пристроїв, а потім по трубопроводу передаються в резервуари.

Процес отримання водню набагато складніший, він обумовлюється утворенням під час електролізу в навколокатодній області бульбашок із водню, які призводять до збільшення електричного опору і, відповідно, до збільшення втрат електроенергії.

### 15.3. Джерела живлення електролізних установок

До джерел живлення електролізних установок належать генератори постійного струму, діодні або тиристорні випрямлячі.

Генератори постійного струму на сьогодні практично не використовуються. Це пояснюється низкою недоліків: низький ККД, низька надійність, висока вартість, експлуатаційні втрати. Найпоширенішими є діодні випрямлячі (агрегати). Типова однолінійна схема наведена на рисунку 15.4.

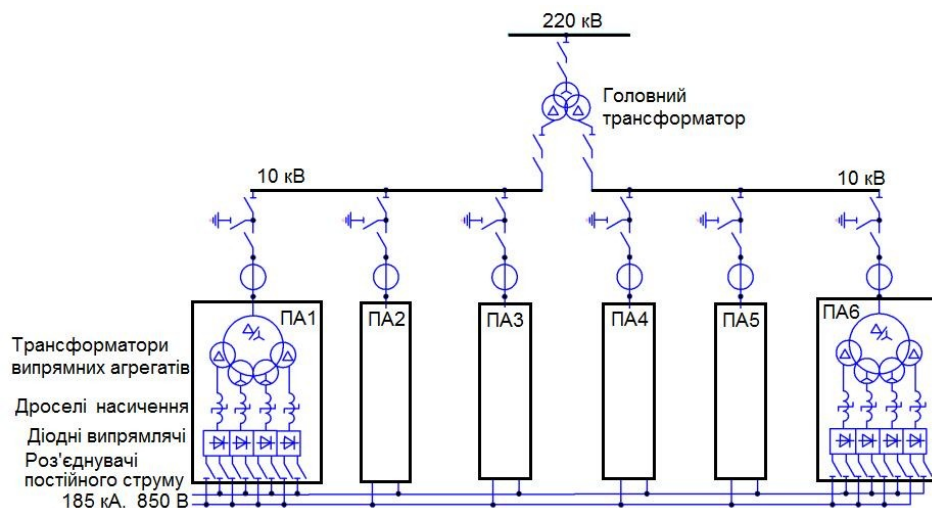


Рис. 15.4 – Однолінійна схема перетворювальної підстанції з діодними агрегатами

На понижувальній підстанції відбувається трансформація напруги від 220 кВ до 10 кВ, яке є первинним напругою для діодних перетворювальних агрегатів ПА1...ПА6, які є джерелами постійного струму для електролізних установок. Вони формуються за системою «трансформатор-випрямляч», основними силовими елементами яких є такі:

спеціальний трансформатор перетворює, дроселі насичення та діодні випрямлячі.

У перетворювальних агрегатах регулювання випрямленої напруги виконується як поступово, так і плавно. Ступінчасте регулювання виконується по первинній обмотці трансформатора за допомогою пристрою регулювання під напругою (далі РПН) шляхом перемикання кінців обмотки. Плавне регулювання в межах одного-двох ступенів пристрою РПН здійснюється за допомогою дроселів насичення.

Головними недоліками діодних випрямлячів є такі:

- обмеженість глибини регулювання напруги, яка на практиці становить близько 60 %. На таку саму величину необхідно підвищувати габаритну потужність трансформатора перетворювального агрегату;

- неможливе забезпечення рівності напруг частин, сполучених за схемою «трикутник» і «зірка» у зв'язку з невеликою кількістю витків вторинної обмотки трансформаторів. Тому вирівнювання навантаження у випрямних блоках виконується шляхом затримки початку комутації в блоках, які підключені до частин вторинних обмоток, з'єднаних за схемою «трикутник». Така необхідна міра сприяє появі нерівності міжкомутаційних інтервалів і виникненню вищих парних гармонік у мережі;

- поява врівноважених струмів між фазозсувними частинами, оскільки частини вторинних обмоток трансформаторів виконуються за допомогою переплетених із черговістю котушок, з'єднаних за схемою «трикутник» і «зірка». Для обмеження врівноважених струмів пакети збірних шин, що йдуть від випрямних блоків, які підключені до сполук «трикутник» і «зірка», в електролізері виконуються ізольованими.

Зазначені недоліки вдається обійти в тиристорних випрямних установках (рис. 15.5).

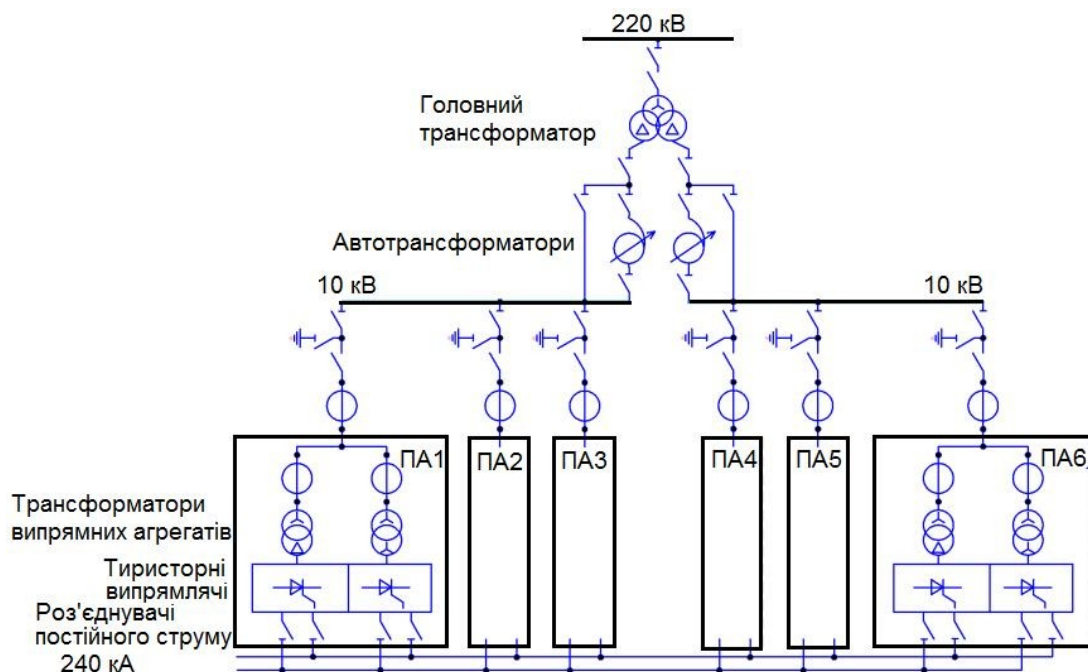


Рис. 15.5 – Однолінійна схема перетворювальної підстанції з тиристорними агрегатами

Відповідно до схеми є шість тиристорних перетворювачів (ПА1 – ПА6) із вихідними параметрами 40 кА, 1000 В. Тиристири з'єднані за схемою «подвійний міст». Спеціальні трансформатори випрямних агрегатів без регулювання напруги мають дві

активні частини, які з'єднані за схемою «зірка» та «трикутник». Регульовані автотрансформатори мають дев'ять ступенів регулювання, з яких два призначені для компенсації зниження напруги мережі. Глибина регулювання напруги становить 15 %. У разі необхідності автотрансформатори можуть бути відключені за допомогою роз'єднувачів.

У сучасних зразках тиристорних випрямних агрегатах використовують імпульсно-фазове регулювання, яке забезпечує рівність кутів керування різних фаз, що виключає появу вищих парних гармонік у напрузі мережі. Використання тиристорних випрямних агрегатів, забезпечує значно вищий, ніж у діодних, рівень стабілізації струму в динамічних режимах роботи. Також обмеження аварійних струмів досягається шляхом швидкої зміни величини кута керування. Усе зазначене вище забезпечує підвищення якості керування струмом, зменшення вартості обладнання та експлуатаційних витрат.

#### 15.4. Електролізні установки гальванотехніки, джерела живлення для електролізних установок гальванотехніки

Гальванотехніка становить сферу прикладної електрохімії, де використовуються процеси електролітичного осадження металів на поверхні металевих і неметалевих виробів.

Гальванотехніка поділяється на *гальваностегію* та *гальванопластику*.

*Гальваностегія* – це процес (рис. 15.6) електролітичного нанесення покриття

на поверхні металевих і неметалевих виробів із метою підвищення їхньої механічної міцності, корозійної стійкості та поліпшення декоративних якостей.

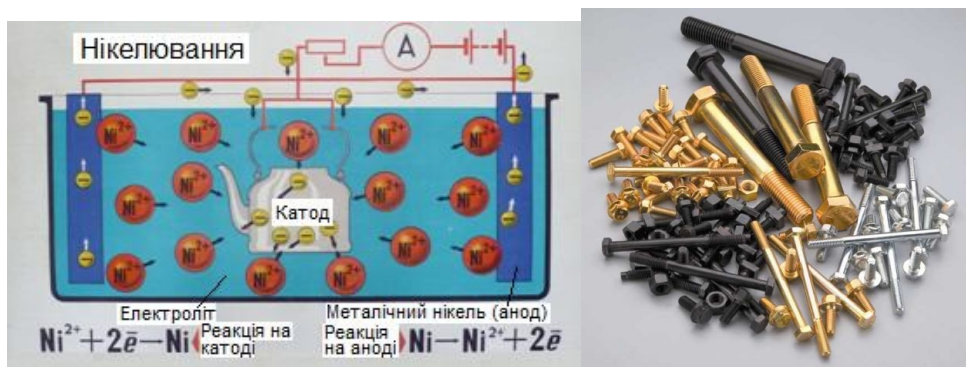


Рис. 15.6 – Процес гальваностегії та металеві вироби

Процес гальваностегії базується на перенесенні металу анода на катод. Анод є розчинним в електроліті та його виготовляють у вигляді прутка або пластини із матеріалу.

Функцію катода виконує виріб, на який необхідно нанести покриття. Якщо матеріал виробу (катод) не є провідником електричного струму, то його поверхню спочатку покривають тонким шаром порошку зі струмопровідного матеріалу.

Анод і катод поміщують у ванну з електролітом і після підводу до них напруги від джерела постійного струму внаслідок електролізу відбувається перенесення іонів матеріалу анода на поверхню катода.

Іноді використовують аноди з металів або сплавів, які не розкладаються в електроліті (свинець). У таких установках метал, який осідає на катоді, виходить тільки з електроліту (водний розчин солей того металу, який наноситься на виріб), солі якого є його обов'язковим складником і систематично поповнюються в процесі роботи.

У промислових умовах гальваностегію здійснюють у спеціальних ваннах. Каркас ванни виготовляється зі сталі у вигляді зварної конструкції прямокутної форми (рис. 15.7). Сучасні зразки ванн виготовляються з пропілену, який є синтетичним термопластичним полімером. Такі ванни мають високий запас міцності, високу водостійкість.

По бортах ванни (1) встановлюються катодні й анодні шини (3), які підключаються до джерела постійного струму. На підвісках, установлених на катодних шинах, підвішуються вироби, на які наносяться покриття. Для забезпечення постійного теплового режиму на днищах ванн установлюється змійовик (2), по якому протікає гаряча вода.

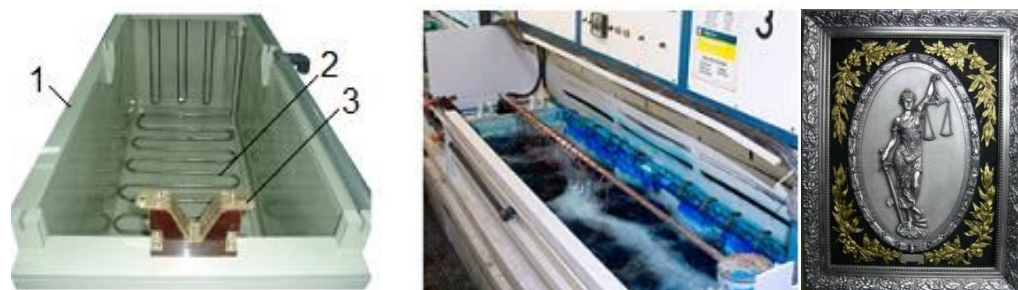


Рис. 15.7 – Гальванічна ванна та виріб: 1 – корпус; 2 – змійовик; 3 – шина

У промислових умовах при масовому виробництві використовують механізовані або автоматичні гальванічні лінії для виконання підготовчих операцій (знежирення, травлення тощо).

Склад і конструкція обладнання, що входить до гальванічної лінії, залежить від особливостей технологічного процесу, кількості видів покриттів, номенклатури виробів тощо.

Загалом автоматична гальванічна лінія має в своєму складі такі елементи (рис. 15.8):

- набір технологічних ванн;
- завантажувально-навантажувальні пристрої;
- металоконструкцію (каркас);
- пристрої для переміщення підвісок, які укомплектовані за допомогою системам автоматизованого керування;
- транспортні шляхи та система вентиляції;
- випрямні агрегати; насоси; установки для фільтрації тощо.

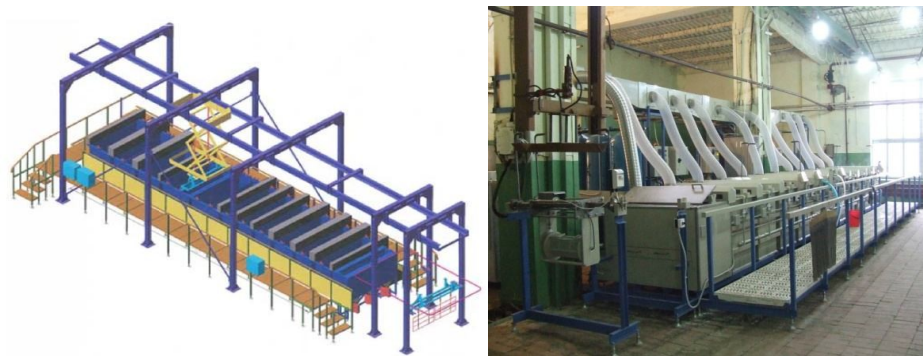


Рис. 15.8 – Гальванічна лінія

Прикладами гальваностегії є такі:

– цинкування – процес гальванічного покриття виробів для захисту їхніх поверхонь;

– анодування – процес отримання оксидних плівок на поверхні виробів з алюмінію, магнію, титану та їхніх сплавів. До того ж підвищуються антикорозійні властивості виробів, твердість і стійкість до механічних впливів, а також декоративних якостей;

– нікелювання – процес нанесення шару нікелю і його сплавів на поверхню виробу, що забезпечує підвищення механічної міцності та зносостійкості, а також поліпшуються декоративні якості виробів;

– хромування – забезпечує поверхні високі зносо- і жаростійкі властивості, а також стійкість від корозії, покращує електромагнітні властивості й декоративні якості виробів;

– сріблення та позолочення – підвищує антикорозійні властивості виробів і покращує декоративні якості.

*Гальванопластика* – процес (рис. 15.9) електролітичного нанесення металевих покриттів на шаблони (форми) із метою отримання точних копій з оригіналу. З використанням гальванопластики виготовляють копії статуй, предметів інтер'єру тощо.

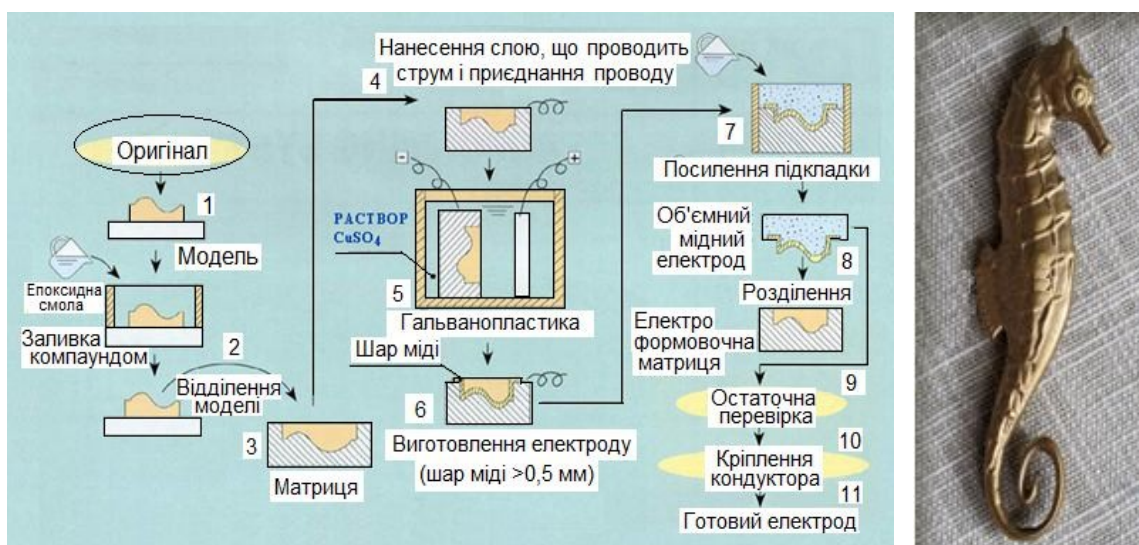


Рис. 15.9 – Процес гальванопластики та виріб

Процес отримання гальванокопій передбачає такі операції:

- виготовлення матриці (форми) – відбиток, що має дзеркальне відображення оригіналу. Використовується гіпс, віск, високополімерні матеріали;
- нанесення струмопровідного шару на струмопровідний оригінал;
- зарядка матриці шляхом спорядження її контактними провідниками, які забезпечують електричний контакт із матеріалом матриці й катодного штангою. Провідники виготовляють із мідного або латунного дроту;
- завантаження матриці у ванну та виконання безпосередньо гальванопластики. Матриця виробу, у якого поверхня оброблена графітом, розміщується в ванні з електролітом (рис. 15.10).

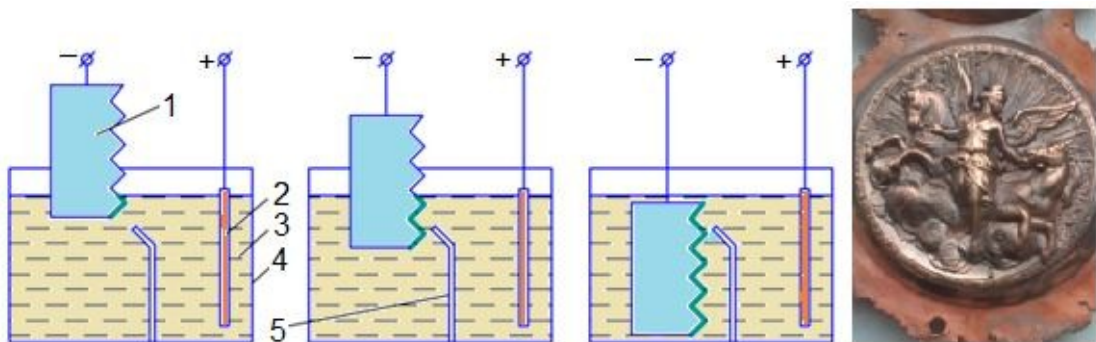


Рис. 15.10 – Спосіб отримання гальванопластичного покриття під час поступового занурення матриці в електроліт: 1 – матриця; 2 – анод; 3 – електроліт; 4 – ванна; 5 – екран

Після занурення до анода і катода підводиться напруга. Якщо матриця має срібну поверхню, то спочатку підводять до анода та катода напруга, а потім виріб занурюють в електроліт.

Основним завданням процесу є рівномірність покриття поверхні, яке досягається різними способами. Наприклад, матриця занурюється в електроліт поступово і у процесі занурення відбувається екранування тієї частини поверхні, на якій вже утворився шар металу.

Джерела живлення для електролітичних установок гальванотехніки є випрямні агрегати, що підключаються до мережі 220/380 В, частотою 50Гц.

На сьогодні в промисловості найпоширеніші тиристорні (серії ТІ, ТЕР, ТБ, ТВР) та інверторні (серії ВІ, ВИР, ВІЦ, ВІЦР) агрегати.

Тиристорні випрямні агрегати (рис.15.11) виготовляються нереверсивними (серії ТІ, ТВ) та реверсивним (серії ТЕР, ТВР) із повітряним (серії ТІ, ТЕР) і водяним (серії ТБ, ТВР) охолодженням.



Рис. 15.11 – Тиристорні випрямні агрегати

Тиристорні агрегати виконують такі функції:

- автоматичну стабілізацію вихідної напруги;
- автоматичну стабілізацію вихідного струму;
- автоматичну стабілізацію щільності струму;
- ручне керування без стабілізації;
- ручний реверс струму;
- ручне керування величиною стабілізованого вихідного струму або на-пруги при прямому і зворотному напрямку струму;
- автоматичний реверс струму при роздільній тривалості імпульсів струму прямого та зворотного напрямку.

*Інверторні випрямні агрегати.* Принцип дії таких агрегатів базується на високочастотному перетворенні електричної енергії, що порівняно з тиристорними перетворювачами та відбувається значно довше.

Живлення агрегату здійснюється від трифазної чотирипровідної лінії змінного струму напругою 220/380 В, частотою 50 Гц (рис. 15.12).

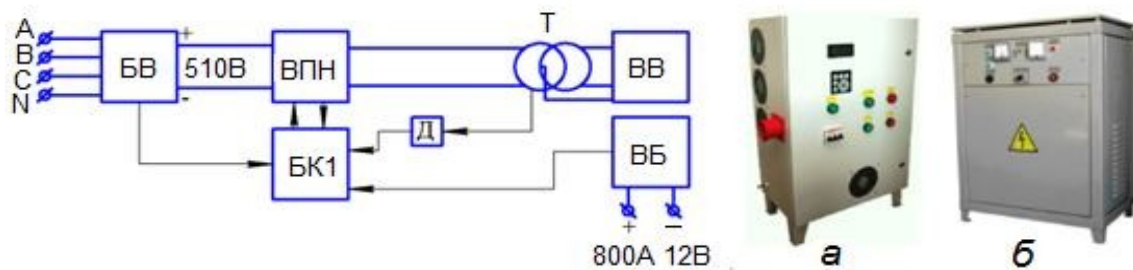


Рис. 15.12 – Блок схема випрямного агрегату та інверторнівипрямні агрегати зі схемами керування: а - цифровий; б - аналоговий: БВ – блок випрямлення; ВПН – високочастотний перетворювач напруги; Т – високочастотний трансформатор; ВВ – вихідний випрямляч; Д – датчик; ВБ – вимірювальний блок; БК1 – блок керування та інформації

У блоці випрямлення БВ відбувається перетворення змінної напруги в постійну з номінальним значенням 510 В. У високочастотному перетворювачі напруги (далі ВПН) постійний струм інвертується в змінний з частотою 12–18 кГц. Високочастотний трансформатор Т забезпечує зниження напруги, а у вихідному випрямлячі (далі ВВ) відбувається перетворення високочастотної напруги в постійну. Високочастотний трансформатор має феритове осердя, а вихідний випрямляч побудований на діодах Шоттки, які мають високу швидкодію та малі значення падіння напруги, що забезпечує істотне підвищення ККД.

Переваги інверторних випрямних агрегатів:

- маса агрегатів зменшується в 7–8 разів порівняно з тиристорними агрегатами;
- економія енергії становить 20–30 %.

Випускаються інверторні агрегати як з аналоговою, так і цифровою схемами керування. Це дає можливість при комплексній автоматизації процесів гальванотехніки використовувати комп'ютерні технології. Головні технічні характеристики випрямних агрегатів наведені в таблиці 15.1.

Таблиця 15.1

**«Технічні характеристики інверторних випрямних агрегатів»**

| Параметри                             | ВІ, ВІР             | ВІЦ, ВІЦР |
|---------------------------------------|---------------------|-----------|
| Напруги мережі живлення, В            | 380±10%             |           |
| Вихідний струм, А                     | 50–800              | 400–3 200 |
| Вихідна напруга, В                    | 12; 24; 48          |           |
| ККД, %                                | 85                  |           |
| Точність автоматичної стабілізації, % | ±2                  | ±1        |
| Дискретність сили струму              | –                   | 1–10      |
| Діапазон регулювання сили струму      | 5–100               |           |
| Охолодження                           | Повітряно–примусове |           |

**15.5. Електролізні установки як приймачі електричної енергії**

Електролізні установки є також приймачами електричної енергії, і більшою мірою з них властиві тривалий режим роботи та тільки деяким – повторно-короткочасний.

Електролізні установки для одержання чистих металів та газів належать до приймачів І категорії надійності електропостачання. Електролізні установки гальванотехніки здебільшого є приймачами ІІ категорії.

Електролізні установки є енергоємними. Дані про питомі втрати електроенергії на електроліз різних металів показані в таблиці 15.2.

Таблиця 15.2

**«Питомі втрати електроенергії на електроліз металів»**

| Назва металу | Питомі втрати, кВт·час/т |
|--------------|--------------------------|
| Мідь         | 320–360                  |
| Нікель       | 1 700–3 700              |
| Цинк         | 3 200–3 300              |
| Марганець    | 7 000–8 000              |



|          |               |
|----------|---------------|
| Магній   | 13 000–14 000 |
| Алюміній | 13 000–16 000 |
| Галій    | 5 190 000     |

Установки мають підвищені вимоги щодо точності підтримки напруги джерела живлення або щільності струму. ККД установок коливається від 0,7 до 0,97.

Деякі ванни є низьковольтними приймачами електричної енергії з великими значеннями сили струму. Об'єднання ванн у серії до декількох десятків, а то і сотень послідовно з'єднаних, обумовлено підвищенням напруги. Дані параметрів деяких електролізних установок показані в таблиці 15.3.

Таблиця 15.3

**«Параметри електролізних установок»**

| Технологічний процес             | Сила струму, кА | Напруга, В |
|----------------------------------|-----------------|------------|
| Електроліз коштовних матеріалів  | 0,5–2 000       | 12–150     |
| Електроліз галію                 | 6–12            | 12–48      |
| Електроліз міді                  | 12–30           | 200–400    |
| Електроліз нікелю                | 12–30           | 100–600    |
| Електроліз цинку                 | 12–30           | 700–900    |
| Електроліз хлору                 | 50–250          | 200–600    |
| Електроліз алюмінію              | 50–300          | 600–1 200  |
| Електроліз магнію                | 100–120         | 200–600    |
| Гальваностегія, гальванопластика | 1,25–25         | 12–48      |

**Завдання на самостійне опрацювання та підготовку**

1. Самостійно відновити матеріал по основним поняттям та визначенням;
2. Самостійно опрацювати матеріал з опису: Визначення плазми та її основні властивості.

**ТЕМА №16. ЕЛЕКТРОННО-ІОННІ УСТАНОВКИ**

Мета: ознайомити здобувачів початкового рівня вищої освіти з: електронно-іонні установки газоочищення (електрофільтри); електронно-іонні установки електросепарації сипучих сумішей; електронно-іонні установки для електрофарбування.

План лекції

- 16.1. Електронно-іонні установки газоочищення (електрофільтри).
- 16.2. Електронно-іонні установки електросепарації сипучих сумішей.
- 16.3. Електронно-іонні установки для електрофарбування.
- 16.4. Електронно-іонні установки для електродруку.

Хід проведення лекційного заняття

- I. Організація групи;
- II. Мотивація навчальної діяльності. Оголошення теми й мети;

III. Викладення та обговорення нового матеріалу.

IV. Оголошення завдання на самостійне опрацювання та підготовку.

### 16.1. Електронно-іонні установки газоочищення (електрофільтри)

Електронно-іонними (електростатичними) установками називаються такі електротехнологічні установки, в яких використовується дія електростатичного поля високої напруженості на речовину, яка перебуває у твердому, рідкому і газоподібному стані, із метою зміни її фізичних або хімічних властивостей, що досягається зазвичай шляхом спрямованого розподілу їхніх складових частин.

Робота таких установок заснована на використанні таких явищ:

– електрофорез – рух частинок, що перебувають у зваженому стані в рідкому або газоподібному середовищі, під дією електростатичного поля;

– електросепарація (електростатичне збагачення) – відділення від суміші необхідних компонентів унаслідок дії сильного електростатичного поля на електрично заряджену суміш;

– електроосмос – рух рідини через капіляри та пористі діафрагми під дією електростатичного поля.

Під час проходження всіх цих явищ під дією електростатичного поля відбувається переміщення окремих іонів, мікрочастинок речовини, які складаються з врівноваженої великої кількості молекул.

Електронно-іонними установками газоочищення називають електротехно-логічні установки, в яких використовується коронний розряд для заряджених частинок, що перебувають у газовому середовищі й у твердому або рідкому стані в електростатичному полі. Такі установки застосовуються у чорній і кольоровій металургії, енергетики, хімічної та гірничодобувної промисловості тощо.

Принцип дії електрофільтра (рис. 16.1) полягає в такому.

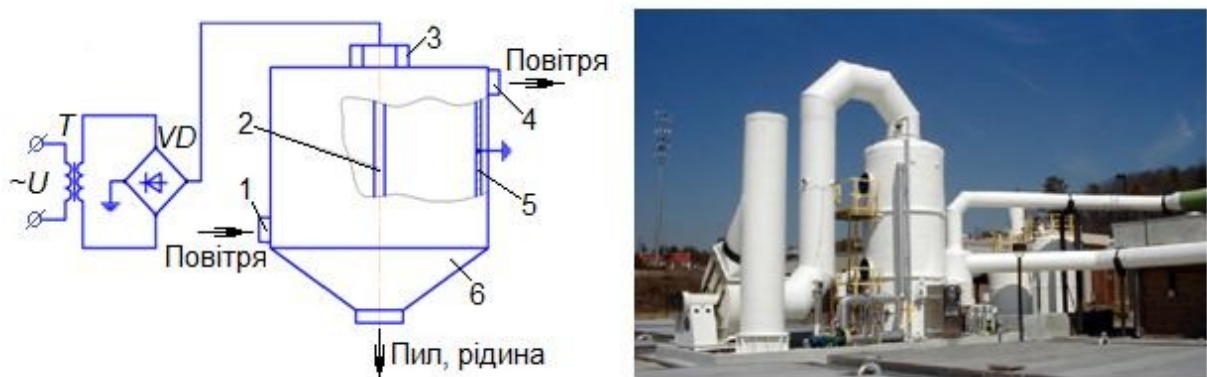


Рис. 16.1 – Схема електрофільтра та промислова установка: 1, 4 – ввідний та вивідний патрубки; 2, 5 – коронний електроди, які осаджують; 3 – високовольтний ввід; 6 – бункер

Живлення установки походить від лінії змінного струму. Трансформатор  $T$  здійснює підвищення напруги, а високовольтний випрямляч  $VD$  перетворює його в постійну.

Коронний електрод (2) з'єднаний із негативним, а електрод (5), який осаджує, із позитивним полюсом високовольтного випрямляча. Через ввідний патрубок (1) у середину електрода (5) подається забруднене повітря.

При достатньої різниці потенціалів між коронним електродом (2) та електродом (5) виникає різко неоднорідне електростатичне поле зі стійким коронним розрядом. Більшість частинок забрудненого повітря в електростатичному полі заряджаються негативно та направляються до внутрішніх стінок електрода (5) й осідають на ньому. Окремі частинки повітря набувають позитивний заряд і осідають на коронному електроді (2). Очищене повітря виходить через вихідний патрубок (4).

Залежно від виду частинок, які осідають на поверхні електрода (5) і способу їх виділення, електрофільтри класифікують на сухі й вологі.

У сухих електрофільтрах зняття частинок пилу з електродів відбувається за допомогою механізмів ударно-молоткового типу. Пил опадає в бункер (6) і видаляється.

У вологих електрофільтрах осадження з поверхні електрода змивається за допомогою рідини або стікає самопливом.

Залежно від напрямку руху газу електролітичні фільтри класифікують на вертикальні й горизонтальні.

Сучасним зразком електрофільтрів можуть бути електрофільтри серії ЕГБМ (рис. 16.2), які призначені для високоефективного очищення газів і повітря під час технологічного процесу (сушіння; переробки сипких матеріалів тощо).

Такі фільтри широко застосовуються в чорній і кольоровій металургії, теплоенергетики, промисловості будівельних матеріалів тощо.

Технічні дані електрофільтра серії ЕГБМ наведені в таблиці 16.1.

Таблиця 16.1

**«Технічні характеристики електрофільтрів серії ЕГБМ»**

| Параметри   | Значення                     |
|---|------------------------------|
| Умовна висота електрода, м                                    | 4; 6; 7,5; 9; 10,5; 12; 13,5 |
| Міжелектродний шаг, мм  | 300; 350; 400                |
| Кількість газових проходів, шт                                | від 8 до 88                  |
| Довжина електричного полю, м                                  | 2,56; 3,2; 3,84; 4,48; 5,12  |
| Кількість полей, шт   | 2–6                          |
| Продуктивність по газу, що очищений, тис. м <sup>3</sup> /год | 50–1300                      |
| Температура газу, що очищений, °С                             | 330                          |
| Вхідна запиленість газів, г/м <sup>3</sup>                    | 90                           |

Переваги електрофільтрів:

- високий рівень очищення газів – до 99,95 %;
- можливість виявлення твердих і рідких частинок розміром від 0,01 мкм (віруси, тютюновий дим тощо) до десятків мкм;
- низький гідравлічний опір, що становить близько 0,2 кПа.

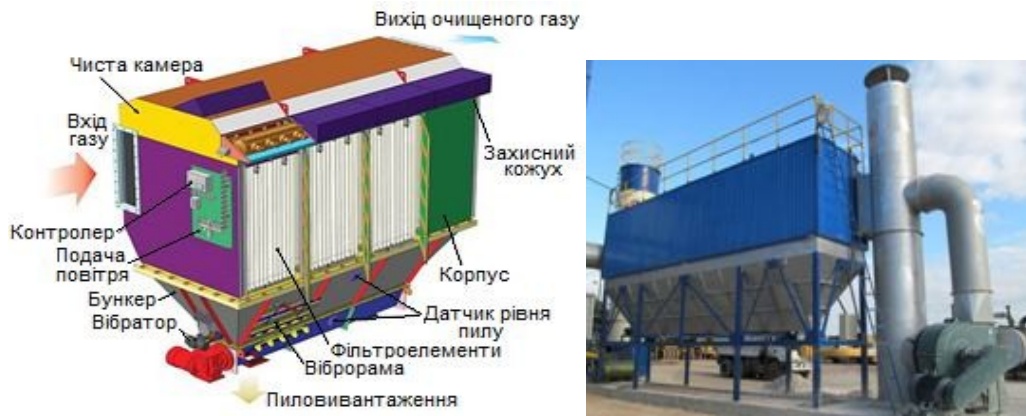


Рис. 16.2 – Високоєфективні очисні установки серії ЕГБМ

## 16.2. Електронно-іонні установки електросепарації сипучих сумішей

*Електросепарація* сипучих сумішей – це процес поділу сипучих дрібнозернистих сумішей або подрібнених матеріалів (насіння, рослин, промислових відходів тощо) в електричному полі сепаратора (рис. 16.3).

Принцип роботи електросепаратора базується на тому, що окремі частинки матеріалу в електростатичному полі отримують різні заряди залежно від їхніх розмірів, електричних властивостей, хімічного складу, щільності і тощо. Від величини заряду в кожній окремо взятій частинки залежить величина сили її притягнення до транспортерної стрічки в зоні розрядки.

Від електродвигуна (7) стрічка транспортера (5) приводиться в рух. З бункера (1) матеріал, що сепарується, розсипається тонким шаром на транспортерній стрічці. Під час руху частка матеріалу потрапляє в зону А, яка є зоною зарядки в електричному полі між коронним електродом (2) і транспортерною стрічкою (5), яка виконує функцію електрода, що осаджує окремі частинки матеріалу.

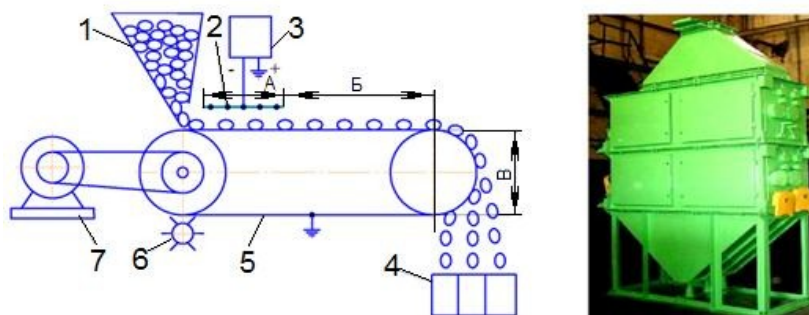


Рис. 16.3 – Схема коронного електросепаратора конвеєрного типу: 1 – бункер загрузки; 2 – коронний електрод; 3 – джерело високої напруги; 4 – класифікатор; 5 – транспортерна стрічка; 6 – щітка; 7 – електродвигун; А – зона зарядки; Б – зона розрядки; В – зона поділу

У зоні поділу на кожну частку, крім сил тяжіння діють дві сили: тяжіння та відцентрова. Під дією результуючої сили окремі частинки відриваються в різних місцях



Живлення установки здійснюється від джерела змінного струму через підвищувальний трансформатор  $T$  і високовольтний випрямляч  $VD$ . Процес фарбування з використанням таких установок відбувається у такий спосіб.

З резервуара (1) (див. рис. 16.4) лакофарбовий матеріал надходить у розпилювач (3) і дробиться там за допомогою енергії стиснутого повітря, який підходить від компресора (4), а також під дією центробіжних сил електричного поля. Електричне поле високої напруги (60–140 кВ) створюється між заземленим виробом (обложений електрод) і розпилювачем (коронний електрод).

Заряджені дрібні частинки лакофарбового матеріалу виштовхуються з камери розпилювача та перемішуються в напрямку силових ліній електростатичного поля до виробу 920 і рівномірно осідають по всій його поверхні. Створення фарбувального факела, форма якого зумовлена формою ліній електростатичного поля, що дає змогу здійснювати фарбування не лише фронтальних відносно розпилювача, але й інших поверхонь виробу.

Переваги установок електронно-іонної електрофарбування:

- менше втрати лакофарбових матеріалів, які становлять 5–10 %;
- висока якість лакофарбового покриття;
- можливість фарбування з усіх боків виробів без втрат лакофарбового матеріала.

Недоліки:

- неможливість або висока складність повного фарбування поверхонь і конструкцій, які мають глибокі западини та складні з'єднання;
- високі вимоги до лакофарбових матеріалів;
- висока ціна установок;
- високі вимоги до кваліфікації обслуговуючого персоналу.

#### **16.4. Електронно-іонні установки для електродруку**

Принцип роботи електронно-іонних установок для електродруку базується на створенні потоку монодисперсних крапель рідини, подання кожної з них електричного заряду та керування рухом зарядженої краплі до моменту попадання її на поверхню друку. Найпрогресивнішими зразками таких установок є електрокаплеструйні маркувальні пристрої (принтери, рис. 16.5), що призначені для нанесення різної інформації (літерно-цифрової, малюнка і тощо) на поверхню виробу. Рідина (фарба, чорнила) подається в генератор (1) (див. рис. 16.5) із сопла якого вона виходить у вигляді тонкого струменя монодисперсних крапель.

Під час проходження струменя крапель через зону дії електростатичного поля, яка створює електроди зарядки (2), кожній із крапель дається однаковий електричний заряд. Після цього заряджені краплі потрапляють у зону дії електричного поля електродів керування 3. Ці електроди створюють імпульси електричного поля які відповідні спеціальної програми. Під дією імпульсів електричного поля кожній з електрично заряджених крапель задається певний кут відхилення та забезпечується своя траєкторія руху. На поверхню виробу наноситься маркування внаслідок визначених програмою розміщень на ній крапель рідини. Такі пристрої широко застосовуються під час

маркування різних виробів, особливо тих, що виготовляються на високотехнологічних лініях: продуктів харчування; проводів і кабелів; стрічок різних матеріалів тощо.

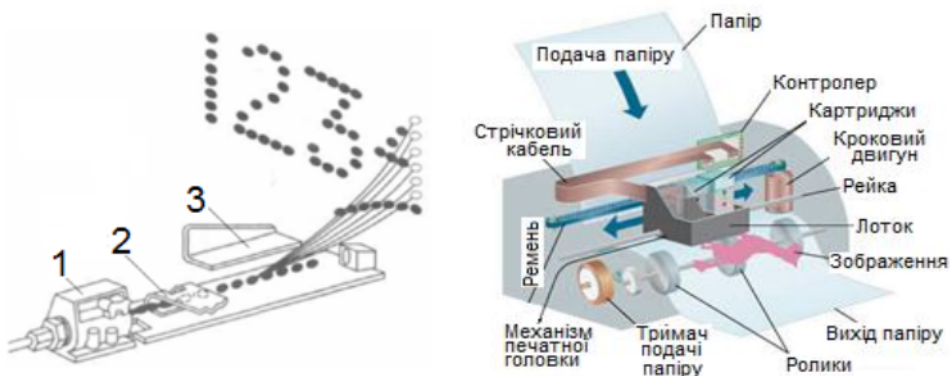


Рис. 16.5 – Електроустановки та принтер для друку: 1 – генератор монодисперсних крапель; 2 – електроди зарядки; 3 – електроди керування

Ці установки легко монтуються в автоматичні технологічні лінії та забезпечують нанесення маркування без її зупинки. Приклад маркувального комплексу наведений на рисунку 16.6.



Рис. 16.6 – Маркувальний комплекс

До базового складу комплексу входить принтер і транспортний пристрій. Технічні дані комплексу наведені в таблиці 16.3.

Таблиця 16.3

**«Технічні характеристики маркувального комплексу»**

| Параметри                              | Тип PRO |      |      |
|--|---------|------|------|
|  | Xs2     | Xs3  | Xs4  |
| Максимальний робочий тиск рідини, атм  | 7       | 7    | 7    |
| Максимальний робочий тиск повітря, атм | 7       | 7    | 7    |
| Вага розпилювача, г                    | 667     | 711  | 788  |
| Довжина розпилювача, см                | 21,8    | 24,6 | 28,2 |

|   |       |      |      |
|---|-------|------|------|
| Діапазон опору краски, МОм·см             | 7-150 | 7-∞  | 25-∞ |
| Максимальна вихідна напруга, кВ           | -     | 60   | 85   |
| Максимальна робоча температура рідини, °С | 48,8  | 48,8 | 48,8 |

Таким чином, на цей час існує велика кількість електронно-іонних установок, які виконують різноманітні функції. Вони постійно модернізуються, що дає можливість використовувати їх у різноманітних середовищах.

#### **Завдання на самостійне опрацювання та підготовку**

1. Самостійно відновити матеріал по основним поняттям та визначенням;
2. Самостійно опрацювати матеріал з опису: Нанесення покриттів в електричному полі.

### **ТЕМА №17. УСТАНОВКИ ДЛЯ ЕЛЕКТРОХІМІЧНОЇ РОЗМІРНОЇ ОБРОБКИ МЕТАЛІВ**

Мета: ознайомити здобувачів початкового рівня вищої освіти з особливостями та принцип дії установок для обробки металів. Установки для електрохімічної обробки в стаціонарному електроліті.

#### **План лекції**

- 17.1. Особливості та принцип дії установок для обробки металів.
- 17.2. Установки для електрохімічної обробки в стаціонарному електроліті.
- 17.3. Установки для розмірної електрохіміко-гідралічної обробки.
- 17.4. Установки для розмірної електрохіміко-механічної обробки.
- 17.5. Установки для електрохімічної обробки як приймачі електричної енергії.

#### **Хід проведення лекційного заняття**

- I. Організація групи;
- II. Мотивація навчальної діяльності. Оголошення теми й мети;
- III. Викладення та обговорення нового матеріалу.
- IV. Оголошення завдання на самостійне опрацювання та підготовку.

#### **17.1. Особливості та принцип дії установок для обробки металів**

В установках для електрохімічної розмірної обробки металів відбувається перетворення електричної енергії в хімічну. Мета розмірної обробки – заміна стану поверхні, форми та розміру виробу.

Поява та подальше використання цього способу було обумовлено необхідністю обробки твердих, жароміцних, хімічно стійких, неіржавних і магнітних сталей, а також напівпровідникових матеріалів, які використовуються під час виготовлення турбін, реактивних двигунів, обладнання атомних електростанцій тощо. Обробка виробів із таких матеріалів традиційними механічними способами була ускладнена, а іноді та зовсім неможливою.

Принцип дії установок базується на явищі анодного (електрохімічного) ро-



зчинення матеріалу виробу під час проходження струму через електроліт, який подається в зазор між електродами. Матеріал виробу, який виконує функції анода, спочатку переходить із металевого стану в іонний шляхом віддачі металом електронів.

Наступним процесом є створення металевих з'єднань, склад яких залежить від хімічного складу електроліту й аноду. Продукти таких реакцій є розчинними в електроліті, і сам процес проводять вільно з перемішуванням електроліту. Щільність струму в електроліті невелика та дорівнює 2–3 А/см<sup>2</sup>.

Гідрат оксиду металу, який практично не розчиняється в електроліті, випадає в осад. Для видалення осаду, з метою усунення можливості засмічення міжелектродного зазору, електроліт подають з великою швидкістю. Щільність струму в електроліті може досягати сотень ампер на квадратний сантиметр.

Установки для електрохімічної розмірної обробки металів поділяються на три групи (рис. 17.1):

- установки для обробки в стаціонарному електроліті;
- установки для електрохіміко-гідравлічної обробки;
- установки для електрохіміко-механічної обробки.



Рис. 17.1 – Класифікація установок для розмірної електрохімічної обробки

## 17.2. Установки для електрохімічної обробки в стаціонарному електроліті

Робота таких установок базується на анодному розчиненні матеріалу виробу і полягає в тому, щоб, наприклад, зняти з поверхні виробу зайвий шар металу з метою надання більшій гладкості поверхні (шліфування, полірування), її очищення (травлення), зміни форми (анодна обробка), нанесення зображення (маркування). Типовою особливістю роботи таких установок є те, що електроліту не сприяє примусовий рух у

зону обробки, а його переміщення здійснюється природним шляхом за порівняно невеликих швидкостей. Процеси, що проходять під час проведення зазначених операцій, є однаковими та відрізняються один від одного лише щільністю струму, і, відповідно, швидкістю розчинення матеріалу виробу.

*Анодне полірування* відбувається за порівняно малих значень густини струму і швидкості розчинення матеріалу. Процес анодного полірування (рис. 17.2, а) полягає в тому, що під час електролізу найінтенсивніше будуть розчинятися виступаючі частини поверхні виробу (рис. 17.2, б), оскільки в заглиблених частинах накопичуються продукти розкладу, і щільність струму на цих ділянках є значно меншою.

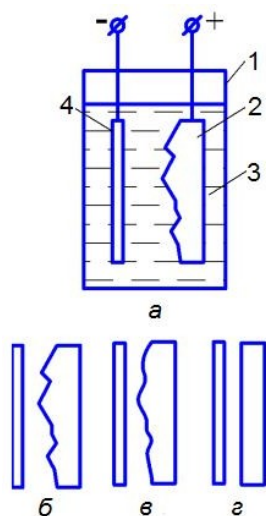


Рис. 17.2 – Схема та етапи процесу анодного полірування: 1 – ванна; 2 – вироби; 3 – електроліт; 4 – катод

Тому спочатку відбувається округлення виступаючих гострих ділянок поверхні (рис. 17.2, б), а потім – згладжування поверхні виробу (рис. 17.2, з).

Прикладами анодного полірування є: різноманітні вироби (рис. 17.3), а також внутрішнє полірування тонкостінних і звичайних труб, турбінних лопаток, робочих отворів арматури зі сталі та спеціальних сплавів, легованих зубчастих коліс тощо.



Рис. 17.3 – Зразки виробів після анодного полірування та травлення

Процес *травлення* проводиться аналогічно до вказаної вище операції, але за умови

значно великих густин струму і швидкості розчинності. Мета травлення зазвичай полягає в тому, що з поверхні виробу знімається шар металу, а разом із ним і шар окислів, бруду та жиру. Після такої операції жорсткість поверхні є дещо більшою, ніж після операції полірування.

Для проведення процесу *загострення* під час обробки металевих виробів із метою зміни їхньої форми застосовується установка, що показана на рисунку 17.4.

Такі установки призначені для загострення пруткових заготовок круглої, прямокутної та багатогранної форм; лез; катодів електронно-променевих установок тощо.

Виріб (3) закріплюється в головці (2) механізму рівномірного підняття/опускання. Електрод-інструмент (1) розміщується у ванні (4). Механізм забезпечує необхідну швидкість переміщення виробу вздовж осі симетрії електроду-інструменту. Унаслідок процесу електролізу відбувається анодне розчинення матеріалу виробу та його загострення на кінці. Характер загострення залежить від початкового кута загострення та розміщення виробу по електроду-інструменту.

*Електрохімічне маркування* використовується для отримання зображення на поверхні металевого виробу без її пошкодження. Принцип дії установки (рис. 17.5) полягає в анодному розчиненні металу під час проходження струму від електроду-інструмента (маркувальної головки) (1) до виробу (3) через шар електроліту безпосередньо (без трафаретне маркування) або через змочений електролітом трафарет (2) (трафаретне маркування).

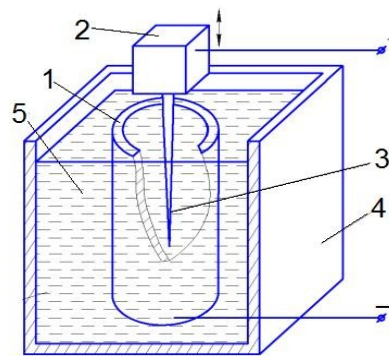


Рис. 17.4 – Схема електрохімічної установки для виконання операції загострення виробів: 1 – електрод-інструмент (катод); 2 – головка механізму опускання/підняття; 3 – виріб (анод); 4 – ванна; 5 – електроліт

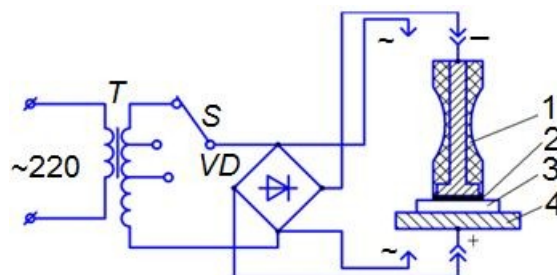


Рис. 17.5 – Схема установки для електрохімічного маркування: 1 – електрод-інструмент; 2 – трафарет; 3 – виріб; 4 – робочий стіл

Під час *безтрафаретного маркування* на електрод інструмент, який виготовлений зі струмопровідного матеріалу, наноситься зображення, яке необхідно нанести на виріб. Поверхня із зображенням покривається шаром електроізоляційного матеріалу (пластмаси), а потім обробляється до появи зображення. Стіл (4), на якому розміщується виріб (3), підключають до позитивного полюса, а електроінструмент (маркувальну голівку) – до негативного полюса. Маркувальна голівка змочується електролітом. Під час контактування маркувальної голівки з виробом у середовищі електроліту відбувається анодне розчинення матеріалу виробу в місцях його контактування зі струмопровідними ділянками маркувальної голівки й отримання копії зображення на виробі. У разі такого маркування зображення на маркувальній голівці практично не зношується та його можна використовувати багато разів.

У процесі *трафаретного маркування* зображення наноситься на трафарет (трафаретну маску) (2), який виготовляється з металу, пластику тощо. У сучасних зразках електрохімічних установках для маркування трафаретні маски багаторазового використання виготовляються з хіміко- та термічно стійкого матеріалу, який має сітчасту структуру, що забезпечує високу якість і відмінність зображення. На таких трафаретних масках зображення може наноситися різними способами: печатанням за допомогою принтера, написанням чи малюванням ручкою тощо.

Трафарет змочується електролітом, склад якого обирається з урахуванням властивостей матеріалу виробу для досягнення кращої якості зображення. Як електроліт використовують зазвичай водні розчини одно- або багатоконпонентних нейтральних солей. Мета правильного підбору складу електроліту полягає в забезпеченні мінімального часу обробки, чіткості й контрастності зображення та його корозійної стійкості.

У процесі трафаретного маркування трафарет (2) розміщується між клеймом і виробом. Під час проходження струму у наслідок електрохімічних реакцій, у середовищі електроліту зображення з трафарету переноситься на поверхню виробу внаслідок зміни кольору поверхні виробу або зміни рельєфу поверхні на невелику глибину (від 2 мкм до 200 мкм).

За допомогою перемикача (див. рис. 17.5) здійснюється регулювання напруги на виході трансформатора  $T$ , що подається на випрямляч  $VD$ . Таким способом досягається забезпечення необхідного значення сили струму з урахуванням властивостей матеріалу виробу, площі нанесення зображення тощо.

Переваги електрохімічного способу маркування:

- простота та висока продуктивність;
- можливість ручного, напівавтоматичного та автоматичного виконання операцій;
- відсутність деформацій і концентрацій напруги, що дає змогу маркування виробів з тонких та ажурних листів,
- відсутність геометричних та структурних змін поверхні;
- висока якість і контрастність зображення;
- можливість маркування різних металевих виробів незалежно від їхніх розмірів, форми, механічних і хімічних властивостей матеріалу, а також виду первинної обробки.

Установки для електрохімічного маркування (рис. 17.5) широко застосовуються в авіаційному, автомобільному, інструментальному, електронному та інших виробництвах, а також у процесі маркування медичних виробів, столових приладів при

нанесенні торгових марок, логотипів тощо.

Зразки виробів із маркуванням зображені на рисунку 17.6. Технічні характеристики для електрохімічного маркування наведені в таблиці 17.1.



Рис. 17.5 – Установа для електрохімічного маркування



Рис. 17.6 – Зразки електрохімічного маркування

Таблиця 17.1

**«Технічні характеристики установок для електрохімічного маркування»**

| Технічна характеристика | Модель           |               |            |                 |                  |     |
|-------------------------|------------------|---------------|------------|-----------------|------------------|-----|
|                         | EU-80            | EU-100        | EU-300     | EU-500          | MODULMAT         |     |
|                         |                  |               |            |                 | 300              | 500 |
| Режим роботи            | Ручний           |               |            |                 | Полуавтоматичний |     |
| Вхідна напруга, В       | ~ 220            |               |            |                 |                  |     |
| Вихідна напруга, В      | 8; 16; 24<br>(~) | 0–24<br>(~/=) | 0–30 (~/=) |                 |                  |     |
| Потужність, Вт          | 100              |               | 310        | 510             | 310              | 510 |
| Габаритні розміри, мм   | 155 × 200 × 150  |               |            | 140 × 380 × 220 |                  |     |

**17.3. Установки для розмірної електрохіміко-гідралічної обробки**

Робота установок для розмірної електрохіміко-гідралічної обробки базується на

одночасному анодному розчиненні та винесенні матеріалу обробки струменем електроліту. Типовою особливістю установок є те, що в процесі роботи між виробом (анодом) та інструментом (катодом) відсутній безпосередній механічний контакт, а обов'язковим є зазор, в який подається електроліт. Швидкість анодного розчинення залежить від зазору між анодом і катодом: чим цей зазор менше, тим швидше відбувається розчинення анода – обробка виробу. Під час зближення електродів поверхня анода (виробу) повторює з великою точністю поверхню катода (інструменту).

Для видалення продуктів розчинення та оновлення складу електроліту обов'язковим є прокачування електроліту через зону обробки. Шляхом підбору складу електроліту в таких установках можлива обробка виробів з будь-яких струмопровідних матеріалів із забезпеченням високої якості обробленої поверхні.

Установлення обробки різанням (рис. 17.7). Робочим інструментом таких установок може бути: диск, стрічка або дрiт.

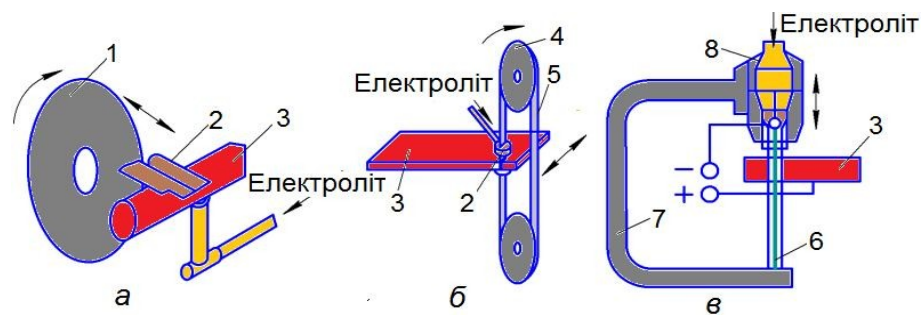


Рис. 17.7 – Схеми установки для розмірної електрохіміко-гідралічної обробки шляхом різання: а – диском; б – стрічкою; в – провідом: 1 – диск; 2 – напрямна; 3 – деталь; 4 – барабан; 5 – стрічка; 6 – провід; 7 – скоба; 8 – головка

Безпосередньо в зону обробки подається електроліт. У процесі роботи рухомих може бути тільки інструмент-електрод, а виріб залишається нерухомим і закріплюється на робочому столі. Можливі також і погоджені одночасні рухи, як електрода-інструмента, так і виробів.

На установках із дисковим інструментом-електродом розрізають вироби завтовшки (діаметром до 160 мм), а вироби з великими розмірами розрізають на установках зі стрічковим або провідним інструментом – електродом. Стрічкові та провідні відрізні установки дають змогу також виконувати фігурне і поздовжнє розрізання.

Установки для виконання копіювально-прошивних операцій (рис.17.8). У процесі роботи електрод-інструмент (катод) (1) і заготовля (анод) (2) здійснюють періодичні рухи переважно в одних координатах (наприклад, вгору/вниз) без взаємного контактування. Обробка виконується на мінімальному допустимому міжелектродному зазорі, у якому постійно перебуває електроліт. У момент зближення електрода-інструмента та заготовки проходить імпульс технологічного струму і відбувається обробка заготовки. У момент розбіжності електрода-інструмента та заготовки технологічний струм відсутній, і в цей час відбувається прокачування електроліту (див. рис. 17.8 – показано стрілками) і видалення з робочої зони продуктів електролізу. Отвір, який утворюється в процесі обробки, із великою точністю повторює профіль електрода-інструмента (рис. 17.9).

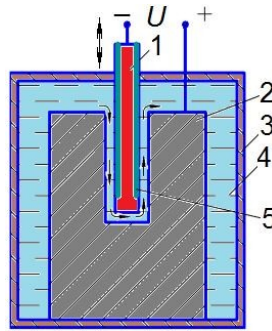


Рис. 17.8 – Схема установки для виконання копіювально-прошивних операцій: 1 – електродний інструмент; 2 – заготовка; 3 – камера; 4 – електроліт; 5 – ізоляція



Рис. 17.9 – Електродний інструмент (1) деталі (2) після виконання копіювально-прошивної операції

На установках для виконання копіювально-прошивних операцій оброблюються вироби, які мають як наскрізні, так і глухі отвори різної форми (рис. 8.10), а саме: сідло клапана компресора, магнітопровід ротора, муфти внутрішнього зчеплення; прес-форми; ротори гідротурбін тощо.

Прикладом установки для виконання копіювально-прошивних операцій є копіювально-прошивний верстат-автомат (рис. 17.11), який призначений для електрохімічної розмірної обробки поверхонь після штампування, пресування та лиття виробів з інструментальних сталей незалежно від твердості матеріалу заготовки.

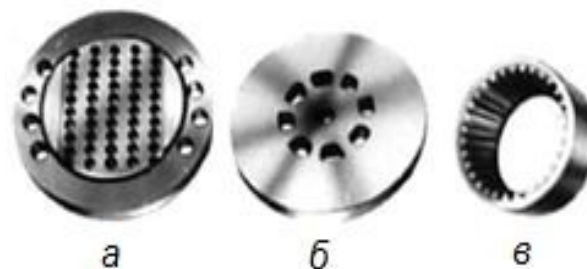


Рис. 17.10 – Зразки виробів: а – сідло клапана компресора; б – магнітопровід ротора; в – муфта внутрішнього зчеплення



Рис. 17.11 – Електрохімічний копіювально-прошивний верстат-автомат

У таких верстатах у процесі роботи електрод-інструмент, який закріплюється нерухомо в електротримачі віброголовки, гойдається у вертикальній площині з частотою 50 Гц. Заготівля закріплюється на столі верстата, і вони разом переміщуються вгору на зближення з електродом –інструментом.

У момент зближення проходить імпульс технологічного струму та відбувається обробка заготовки.

Переваги обробки виробів на верстатах:

- підвищена продуктивність обробки (швидкість знімання становлять 0,05–3,5 мм при площі обробки до 100 см<sup>2</sup>);
- висока точність поверхні після обробки;
- можливість зниження жорсткості поверхні під час обробки технологічним струмом;
- обробка виконується на низьких (менше 12 В) напругах з використанням електролітів нейтральних водних розчинів мінеральних солей (NaCl; NaNO<sub>3</sub>) що дає змогу підвищити електробезпеку для обслуговочого персоналу і уникнути можливості виникнення пожежі в зоні обробки.

*Установки для виконання токарних та фрезерних операцій* призначені для електрохімічної обробки шляхом точіння торців деталей тіл обертання (рис. 17.12).

Деталь (1), що становить тіло обертання, закріплюється в передній бабці (8). Інструмент-електрод (2) закріплюється на штанзі (6), через яку в зону обробки подається електроліт. Деталь і електрод-інструмент розміщуються в середині камери (7), заповненої електролітом. Обробка виконується на мінімально допустимому міжелектродному зазорі між деталлю та інструментом-електродом. Напрямок руху передньої бабки та патрона (3), із яким жорстко з'єднаний інструмент-електрод, показано стрілками.

Установки для виконання фрезерних операцій використовуються для обробки плоских, криволінійних поверхонь, зубчастих і черв'ячних коліс тощо. Приклади деталей, оброблених способом електрохімічного фрезерування, зображені на рисунку 17.13.



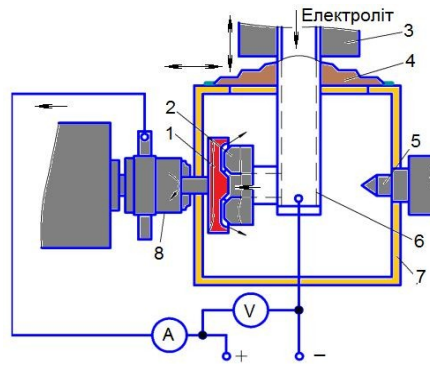


Рис.17.12 – Схема установки для вико-нання токарних операцій: 1 – деталь; 2 – електрод-інструмент; 3 – патрон; 4 – мідний диск; 5 – центр; 6 – штанга; 7 – камера; 8 – передня бабка



Рис.17.13 – Деталі, що оброблені спосо- бом електрохімічного фрезерування

#### 17.4. Установки для розмірної електрохіміко-механічної обробки

Робота установок розмірної електрохіміко-механічної обробки (анодно-механічної) також базується на анодному розчиненні матеріалу виробу в середовищі електроліту. Однак на відміну від перших розглянутих установок у цих установках у процесі роботи відбувається механічне контактування електрода-інструмента й електрода-виробу. Тому використовується електрохімічна та механічна дія на виріб у зоні обробки.

На відміну від чисто механічної обробки з зусиллям, що виникають між виробом й електродом-інструментом під час електрохіміко-механічної обробки, значно менше, а продуктивність роботи таких установок зазвичай значно вище.

Установки для електрохіміко-механічної обробки поділяють на дві групи: для чистової та чорнової анодно-механічної обробки.

*Установки для чистової анодно-механічної обробки* (рис. 17.14). Принцип дії установок полягає в тому, що інструмент (катод) (3) і виріб (анод) (4) перебувають у середовищі електроліту (2) і через них проходить електричний струм великої щільності ( $0,5\text{--}10\text{ А/см}^2$ ). Унаслідок електролізу відбувається розчинення матеріалу виробу й осідання продуктів розчинення на поверхні. При нерухомих електродах на поверхні виробу виникає плівка (1) з продуктів розчинення, товщина якої з часом збільшується, що призводить до зростання електричного опору.

Для ефективної роботи установки та чистої анодно-механічної обробки обов'язковим є умови:

- велика швидкість відносного переміщення інструмента (катода) і виробу (анода);
- розташування анода та катода на мінімально можливій відстані один від іншого, яке забезпечувало б безпосереднє контактування, а також видалення плівки (1) за допомогою інструмента (3);
- обов'язкова безперервна наявність електроліту між виробом й інструментом.

За таких умов розчинення у вигляді плівки на поверхні деталі будуть виділятися, і у такий спосіб забезпечуватиметься обробка виробу з високим класом чистоти поверхні.

Видалення плівки з продуктів розчинення може відбуватися і не металевим інструментом (4) (рис. 17.16), наприклад, пластмасовим, дерев'яним або гумовим. У цьому разі вдається обійти електричне контактування анода і катода, а під дією порівняно невеликих механічних зусиль із боку інструменту можливо видаляти продукти розчинення виробу й у такий спосіб виконувати його обробку.

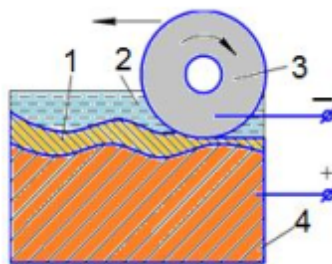


Рис.17.14 – Процес роботи установки для чистої анодно-механічної обробки: 1 – плівка з продуктів розчинення; 2 – електроліт; 3 – інструмент; 4 – виріб

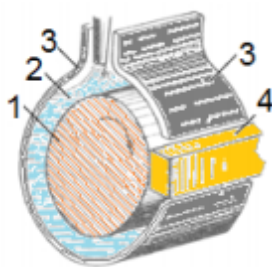


Рис. 17.15 – Схема чистої анодно-механічної обробки неметалевим інструментом: 1 – виріб; 2 – електроліт; 3 – катодні пластини; 4 – інструмент для зняття плівки

Переваги установок для чистої анодно-механічної обробки:

- можливість отримання високої чистоти поверхні виробу;
- можливість зміни в широкому діапазоні якості поверхні виробу шляхом зміни електричного режиму без заміни інструмента та перестановки заготовки;
- незалежність результатів обробки від механічних властивостей матеріалу заготовки;

- простота інструмента;
- низькі питомі тиски інструмента на виріб.

Недоліки:

- відсутність низька продуктивність;
- відсутність необхідність постійної підтримки необхідного зазору між виробом та інструментом.

Різновиди установок для чистової анодно-механічної обробки є установки для електроабразивної та електроалмазної обробки.

Під час *електроабразивної обробки* функцію робочого інструмента виконує спеціальний струмопровідний диск, який виготовляється з суміші абразивних зерен із металевим порошком (металоабразивний) або графітом (графітоабразивний). Металева або графітова суміш забезпечує струмопровідні властивості абразивного круга, а за допомогою абразивних зерен виконується механічне видалення плівки з продуктів розчинення в зоні обробки. Як електроліт у таких установках, використовуються розбавлені розчини рідкого скла, нітратів, нітритів тощо.

Перевага установок:

- висока чистота поверхні деталей, які обробляються;
- можливість використання неагресивних електролітів;
- можливість використання як спеціальних анодно-механічних шліфувальних верстатів, так і звичайних шліфувальних верстатів, після нескладної їх модернізації;
- робота на безпечних напругах та при невеликій щільності струму, яка не надає термічну дію на виріб.

Недоліки:

- невисока продуктивність;
- необхідність використання спеціальних, значно дорогих кіл.
- значне зношення кола електрода;
- поява гострих кромek деталей після обробки.

Під час *електроалмазної обробки* функцію робочого інструмента виконує спеціальний диск, що має металеву основу з нанесенням на його робочу поверхню шару з алмазних зерен. Таке конструктивне виконання диску створює неможливий контакт металу диска й виробу та забезпечує дотримання найменших робочих зазорів (0,01–0,03 мм). Такі установки допускають велику щільність струму (300–500 А/см<sup>2</sup>), високу продуктивність, клас чистоти поверхні й мале зношення інструмента, що є їхньою перевагою, порівняно з іншими установками.

Недоліки: необхідність використання спеціальних, набагато дорожче алмазні диски замість традиційних.

Установки для *чорнової анодно-механічної обробки* (рис. 17.16). Принцип роботи таких установок схожий на попередній, де інструмент (катод) і виріб (анод) також переміщуються з високою швидкістю, а в зону обробки постійно подається електроліт і відбувається розчинення матеріалу виробу.

Типовою відмінністю в роботі таких установок є таке:

- середнє значення щільності струму яка становить 10–500 А/см<sup>2</sup>;
- під час роботи установки обов'язковим є контактування металу виробу (анода) (5) та інструмента (катода) (3) в окремих точках (4) (див. рис. 17.16), що

підвищує щільність струму шляхом збільшення точок контактування;

– обробка відбувається тільки за допомогою металевого інструмента, який під час роботи зношується, оскільки що також піддається теплової дії процесів, які описані вище;

– значно зростає продуктивність роботи установки, оскільки поруч з анодним розчиненням матеріалу виробу та видаленням продуктів розчинення відбувається інтенсивне теплове електроерозійне руйнування поверхні виробу.

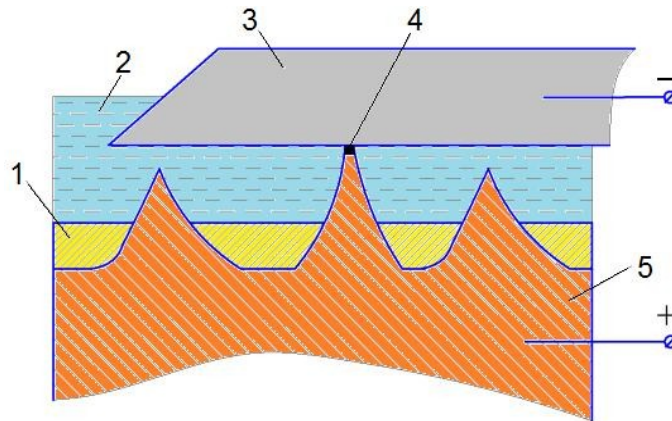


Рис. 17.16 – Процес роботи установок для чорнової анодно- механічної обробки: 1 – плівка з продуктів розчинення; 2 – електроліт; 3 – інструмент; 4 – місце контактування; 5 – виріб

Чорнова анодно-механічна обробка використовується при виконанні операцій різання, шліфування, розточування тощо.

Переваги:

– висока продуктивність;  
– зниження відходів;  
– незначні механічні зусилля під час обробки;  
– можливість обробки виробів із металів і сплавів практично будь-якої твердості;

– можливість зміни в певному діапазоні якості поверхні виробу без зміни інструменту та перестановки заготовки.

Недоліки:

– низька чистота обробки виробу;  
– зміни в структурі поверхневого шару матеріалу виробу, які обумовлюються з термічним процесом;  
– значне зношення електрода-інструмента;  
– низька технологічність електроліту.

Базові моделі верстатів для анодно-механічної обробки зображені на рисунку 17.17 та рисунку 17.18.

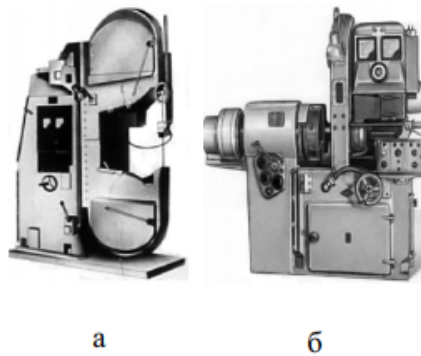


Рис. 17.17 – Анодно-механічні станки: а – дисковий; б – стрічковий



Рис. 17.18 – Полуавтомат плоскошліфувальний

Технічні характеристики верстатів наведені в таблиці 17.2 і таблиці 17.3.

Таблиця 17.2

**«Технічні характеристики анодно-механічних верстатів»**

| Параметри                         | Значення моделей                 |   |
|-----------------------------------|----------------------------------|---|
|                                   | 4A812                            | ME-12   |
| Розміри деталей, мм:              |                                  |   |
| – діаметр, мм;                    | 160                              | 350   |
| – довжина, мм                     | 10–4000                          | 10–600  |
| Розміри електроду-інструмента, мм | 650 × 1,5<br>(діаметр × товщина) | 5700 × 40 × 0,8<br>(довжина × ширина × товщина) |
| Сила струму, А                    | 320                              | 800   |
| Напруга, В                        | 24/ 27/ 30                       | 21/38   |

Таблиця 17.3

**«Технічні характеристики полу автомата плоскошлифовального електрохімічного»**

| Параметри                         | Значення |
|-----------------------------------|----------|
| Найбільші розміри та маса виробу: |          |
| – довжина, мм;                    | 630      |
| – ширина, мм;                     | 200      |

|   |       |
|---|-------|
| – висота, мм;                                     | 320   |
| – маса, кг  | 200   |
| Найбільше переміщення, мм:                        |       |
| – столу;  | 900   |
| – шліфувальної головки                            | 320   |
| Дискретність переміщення шліфувальної головки, мм | 0,001 |
| Потужність головного приводу, кВт                 | 11    |

### 17.5. Установки для електрохімічної обробки як приймачі електричної енергії

Більшість установок визначаються є тривалим режимом роботи та тільки частина з них – короткочасним.

Графік навантаження більшості установок, за умови контролю технологічного процесу, є рівномірним.

Установки здебільшого є приймачами II категорії електропостачання, і лише незначна їхня частина належить до приймачів I категорії.

Живлення установок здійснюється від лінії змінного струму напругою 380/220 В і частотою 50 Гц із подальшим зниженням до одиниць/десятків вольт і випрямленням у діодних або тиристорних випрямлячах. Технічні характеристики джерел живлення установок наведено в таблиці 17.5.

Таблиця 17.5

#### «Технічні характеристики джерел живлення установок для електрохімічної розмірної обробки матеріалів»

| Вид обробки                | Напруга, В | Щільність струму А/см <sup>2</sup> | Питомі втрати енергії, кВт·час/кг |
|----------------------------|------------|------------------------------------|-----------------------------------|
| Електрохімічне травлення   | 3–12       | 0,05–0,2                           | 10–30                             |
| Електрохіміко-гідравлічна  | 2–24       | 50–200                             | 8–15                              |
| Електрохімічне полірування | 4–24       | 0,05–0,6                           | 5–20                              |
| Анодно-механічна:          |            |                                    |                                   |
| – чернова;                 | 12–36      | 20–500                             | 3–5                               |
| – чистова                  | 4–16       | 0,5–10                             | 8–15                              |
| Електроабразивна           | 2–16       | 0,5–10                             | 8–15                              |
| Електроалмазна             | 2–16       | 0,5–10                             | 8–15                              |

Установки мають підвищені вимоги до точності підтримання напруги джерел живлення або щільності струму, оскільки їхня потужність прямо пропорційна до квадрату струму/напруги живлення, а від потужності, зі свого боку, залежить продуктивність і якість. ККД установок коливається від 0,7 до 0,95.

Установки з тиристорними випрямлячами є джерела вищих гармонік. Коефіцієнт потужності установок: при діодних випрямлячах  $\cos\varphi = 0,92–0,94$ ; при тиристорних випрямлячах  $\cos\varphi = 0,6–0,9$ .

### **Завдання на самостійне опрацювання та підготовку**

1. Самостійно відновити матеріал по основним поняттям та визначенням;
2. Самостійно опрацювати матеріал з опису: Нейтралізація зарядів статичної електрики.

## **ТЕМА №18. ТЕХНОЛОГІЧНІ ПРОЦЕСИ, ЗАСНОВАНІ НА СИЛОВОМУ ВПЛИВІ ЕЛЕКТРИЧНИХ ПОЛІВ НА МАТЕРІАЛИ**

Мета: ознайомити здобувачів початкового рівня вищої освіти з процесами електричного зарядження частинок матеріалів та процесами, що пов'язані з переміщенням частинок в електричному полі. Колективні процеси в зарядженому аерозолі.

### **План лекції**

- 18.1. Процеси електричного зарядження частинок матеріалів.
- 18.2. Зарядження частинок. Індукційне зарядження частинок.
- 18.3. Процеси, що пов'язані з переміщенням частинок в електричному полі.
- 18.4. Колективні процеси в зарядженому аерозолі.

### **Хід проведення лекційного заняття**

- I. Організація групи;
- II. Мотивація навчальної діяльності. Оголошення теми й мети;
- III. Викладення та обговорення нового матеріалу;
- IV. Оголошення завдання на самостійне опрацювання та підготовку.

### **18.1. Процеси електричного зарядження частинок матеріалів**

Якщо часткам дрібно-дробленого (диспергованого) матеріалу повідомлений деякий заряд, то на ці частинки в електричному полі діє сила  $F=Eq$ , яка змушує частинки рухатися. Різні форми цього руху можна використовувати для виконання різноманітних технологічних операцій. Широке поширення технологій, заснованих на управлінні рухом заряджених частинок полем, пов'язано з наявністю цілого ряду переваг цих технологій перед традиційними методами впливу на оброблюваний матеріал.

- Перш за все, слід вказати на безпосередній вплив електричної енергії, зосередженої в електричному полі, на оброблюваний матеріал без проміжних трансформацій енергії, а значить і без додаткових втрат, які супроводжують ці проміжні трансформації.

- У природі немає речовин як провідних або напівпровідних, так і діелектричних, які тим чи іншим способом не могли б бути заряджені і піддані силовому впливу електричного поля. Звідси випливає властивість універсальності методів розглянутої технології.

- Ця універсальність не обмежується скільки-небудь значно тією обставиною, що найбільш ефективний вплив електричних полів на сировину може проявлятися у випадку, якщо остання знаходиться в диспергованому стані, тому що взаємодія поля з речовиною відбувається головним чином на межі розділу середовищ. Слід мати на увазі, що величезна маса сировини по своїй природі або вже перебуває в

диспергованому стані, або легко може бути приведена в такий стан при видобутку і подальшій обробці. Наприклад, видобуток корисних копалин неминуче супроводжується істотним подрібненням руд. Ступінь роздробленості може бути різною: від часток субмікронних розмірів до часток у кілька десятків міліметрів.

- Дані методи дозволяють забезпечити легке і універсальне управління процесами за рахунок можливості плавного регулювання в широких межах величини напруги (або що теж саме напруженості електричного поля). Остання обставина дозволяє говорити про можливість забезпечення високої точності.

Силовий вплив електричного поля на частинки сировини може реалізовуватися в різних формах і мати різний кінцевий результат:

1. Частинки речовини при розміщенні їх в електричному полі поляризуються. Якщо вони довгастої форми, то виникають сили, що орієнтують частинки по силових лініях поля. Ця здатність лежить в основі технологій виготовлення текстильних і композиційних матеріалів.

2. Так як властивості окремих частинок відрізняються, то виникають сили, які крім орієнтації змушують частинки рухатися з різними швидкостями і по різних траєкторіях. Це дозволяє здійснювати сепарацію і класифікацію частинок по діелектричним властивостям, електропровідності і розмірами.

3. При наявності надлишкового електричного заряду частинки незалежно від фізичних властивостей будуть рухатися в електричному полі в напрямку до електродів, які мають заряд протилежний за знаком заряду частинок. Це дозволяє виділяти частинки з несучого їх газового середовища, тобто здійснювати очищення газу від рідких і твердих диспергованих матеріалів.

4. Частинки, осідаючи на електрод, утримуються на його поверхні за рахунок сил дзеркального відображення, створюючи щільний шар. При цьому маючи однойменний заряд, частинки розштовхуються і забезпечують рівномірність покриття, що використовується при нанесенні полімерних порошкових покриттів в електричному полі для декоративних і антикорозійних цілей.

5. Взаємодія зарядів, осаджених на поверхню фото-напівпровідника, з зарядженими частинками проявляючих матеріалів приводить до їх вибіркового осадження. Це явище було покладено в основу електродруку.

6. Зарядження частинок диспергованих матеріалів різнойменними зарядами дозволяє зробити однорідне змішування матеріалів.

Всі ці електротехнологічні процеси містять три основні стадії, які і визначають структурну схему типової технологічної установки (рис.18.1).





Рис. 18.1 – Структурна схема типової електротехнологічної установки

Відповідно до цієї схеми теоретичну основу процесів становлять закономірності зарядження і руху частинок в електричному полі.

## 18.2. Зарядження частинок. Індукційне зарядження частинок

В даний час використовуються такі методи зарядження частинок, тобто надання частинкам надлишкового заряду: 1) іонне зарядження, 2) індукційне зарядження, 3) статична електризація.

Іонне зарядження. Метод полягає в тому, що іони, що рухаються в газовому середовищі, наприклад, у зовнішній зоні коронного розряду, і стикаються з частинкою, осідають на її поверхні. Зворотно іони не можуть повернутися з-за того, що вони повинні володіти певною енергією для подолання потенційного бар'єру на межі розділу середовищ. Таким чином відбувається накопичення іонів на частинці.

Розглянемо зарядження частинки в електричному полі з уніполярним об'ємним зарядом. Збільшення заряду частинки визначається кількістю іонів, що потрапляють на частинку в одиницю часу:

$$\frac{dq}{dt} = e \int_s \bar{f} d\bar{s},$$

де  $q$  – заряд частинки;  $e$  – заряд електрона;  $\bar{f}$  – вектор густини потоку іонів;  $s$  – площа поверхні частинки, на яку осідають іони.

Потік іонів на частинку визначається рухом іонів під дією електричного поля і рухом, викликаним дифузією іонів за рахунок градієнта концентрації іонів:

$$\bar{f} = nk\bar{E} - D\overline{gradn},$$

де  $E$  – напруженість електричного поля біля поверхні частинки;  $n, k$  – концентрація і рухливість іонів;  $D$  – коефіцієнт дифузії.

Визначимо, при яких умовах переважає зарядження частинки за рахунок осадження іонів під дією електричного поля («ударне» зарядження) і коли переважає рух іонів під дією дифузійного механізму («дифузійне» зарядження). З виразу випливає, що «дифузійний» механізм переважає над «ударним» за умови, якщо  $D\overline{gradn}$ .

Припускаючи, що у поверхні частинки  $n = 0$ , а її вплив виводу із рівноваги на концентрацію іонів поширюється на відстань, рівну  $2a$ , отримуємо  $\overline{gradn}$ . При атмосферному тиску відповідно до молекулярно-кінетичної теорії газів  $D \sim 0,025$  к. Тому можна записати  $E \ll 0,025/(2a)$ . Для умов, які спостерігаються в апаратах електронно-іонної технології, коли  $E \sim (1 \div 3)$  кВ/см, отримуємо, що при розмірах частинок  $2a \ll 0,1$  мкм переважає «дифузійний» механізм зарядження частинок. «Ударне» зарядження переважає в цих умовах для частинок розміром  $2a \gg 1$  мкм.

«Ударне» зарядження частинок в електричному полі. Результуюча напруженість поля біля поверхні частинки визначається такими складовими: зовнішнім полем  $E_{\text{зовн}}$ , полем поляризації частинки  $E_{\text{п}}$ , полем заряду іонів, які осіли на частинку,  $E_{\text{q}}$ , полем дзеркального відображення іона в поверхні частинки  $E_{\text{дз}}$ :

$$E = E_{\text{зовн}} + E_{\text{п}} + E_{\text{q}} + E_{\text{дз}},$$

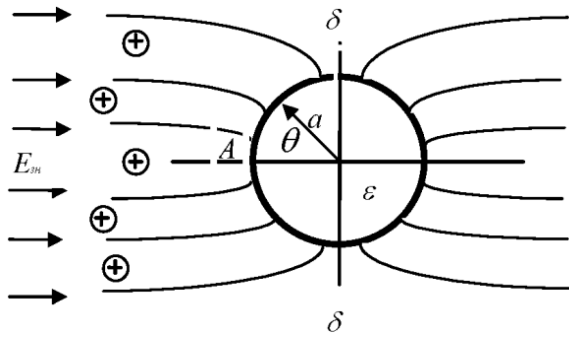


Рис. 18.2 – Схема ударного зарядження сферичної частинки

Для сферичної частинки (рис. 18.2) радіусом  $a$  й відносною діелектричною проникністю  $\varepsilon$  в повітрі нормальна складова зовнішнього поля з урахуванням поля поляризації частинки (позитивний напрям – до частинки) дорівнює:

$$E_{зн.н} + E_{н.н} = E_{зн} \cos \theta + \frac{2(\varepsilon - 1)}{\varepsilon + 2} E_{зн} \cos \theta = E_{зн} k_\varepsilon \cos \theta,$$

де  $\theta$  – меридіональний кут сферичної системи координат,  $k_\varepsilon = 1 + 2(\varepsilon - 1)/(\varepsilon + 2) = 3\varepsilon/(\varepsilon + 2)$  – коефіцієнт, що враховує відносну діелектричну проникність частинки.

Напруженість кулонівського поля від заряду частинки, відштовхуючого підлітаючі іони, дорівнює:

$$Eq = \frac{-q}{4\pi\varepsilon_0 a^2},$$

Поле дзеркального відображення іона діє на малій відстані від поверхні частинки, і його можна врахувати як збільшення ефективного радіусу частинки, оскільки всі іони, що потрапили в межі зони дії сили дзеркального відображення, захоплюються частинкою. Для розглянутих розмірів частинок цим збільшенням можна знехтувати.

Підставляючи значення напруженостей електричного поля в попередні вирази, отримаємо:

$$\frac{dq}{dt} = ek \int \left( n k_\varepsilon E_{зн} \cos \theta \frac{-q}{4\pi\varepsilon_0 a^2} \right) ds,$$

Чисельні розрахунки показують, що концентрація іонів при русі в електричному полі в зазначених умовах не змінюється вздовж траєкторії руху іонів. Якщо на достатньому віддаленні від частинки ця концентрація дорівнює  $n_0$ , то вона складає  $n_0$  і вздовж поверхні частинки. Отже, вона може бути винесена за знак інтеграла у зазначеній вище формулі. Інтегрування в даній формулі проводиться у сферичній системі координат з тієї сторони поверхні частинки, де поле забезпечує потрапляння іона на частинку. Отже:

$$\frac{dq}{dt} = \frac{en_0 k}{4\varepsilon_0 q_m} (q(t) - q_m)^2,$$

де  $q_m = 4\pi\varepsilon_0 k_\varepsilon a^2 E_{зн}$  – максимальний заряд частинки.

Очевидно, що на самому початку зарядження частинки ( $q = 0$ ) іони осідають на всій лівій половині частинки (границя  $\delta$ - $\delta$ ). У міру накопичення заряду на частинці, завдяки посиленню відштовхуючого поля область осадження іонів скорочується (границя  $\delta$ - $\delta$  зміщується вліво) аж до нуля (границя  $\delta$ - $\delta$  проходить через точку  $A$ ). В цьому випадку зарядження частинки припиняється і частинка набуває максимальний заряд.

Рішенням диференціального рівняння є вираз (формула Потенье):

$$q(t) = q_m \frac{en_0kt}{4\pi\epsilon_0 + en_0kt},$$

Для провідної частинки можна вважати, що  $\epsilon \rightarrow \infty$  і  $k_\epsilon = 3$ , тоді:

$$q_m = 12\pi\epsilon_0 a^2 E_{zn},$$

При зарядженні частинки в біполярній короні, коли в просторі, що оточує частинку, поряд з іонами одного знаку (наприклад, позитивними –  $n_+$ ,  $k_+$ ) присутні іони іншого знаку (негативні –  $n_-$ ,  $k_-$ ), потік зарядів на частинку має дві складові: позитивну, збільшує заряд частинки, і негативну, зменшує її заряд.

Граничний заряд в цьому випадку дорівнює:

$$q_{гран} = q_m \frac{1 - \sqrt{\frac{en_-k_-}{en_+k_+}}}{1 + \sqrt{\frac{en_-k_-}{en_+k_+}}},$$

де  $\gamma_{v+} = en_+k_+$  і  $\gamma_{v-} = en_-k_-$  провідності, що визначаються відповідно позитивними і негативними зарядами. З формули ( $q_{гран}$ ) видно, що граничний заряд, що набуває частинка в полі біполярного коронного розряду, менше максимального заряду частинки, одержуваного при уніполярній зарядці  $q_{гран} < q_m$ .

Дифузійне зарядження частинок. Для малих частинок ( $2a \ll 0,1$  мкм) потік іонів на частинку визначається тільки процесом дифузії, а з електричних сил необхідно враховувати лише відштовхуючий вплив, що набуває заряд частинки. За позитивний напрям прийнято напрямок потоку до центру частинки.

Підстановка і інтегрування рівняння дає рішення в неявному вигляді:

$$t = \frac{\epsilon_0}{en_0k} (E_i(A) - c_0 - \ln A),$$

де  $E_i$  – інтегральна показова функція;  $A = kq / (D4\pi\epsilon_0 a)$ ;  $c_0 = 0,577$  – стала Ейлера.

Визначивши величину  $A$  з ( $t$ ) легко можна знайти заряд  $q$ . При дифузійному механізмі зарядження заряд зростає в часі необмежено.

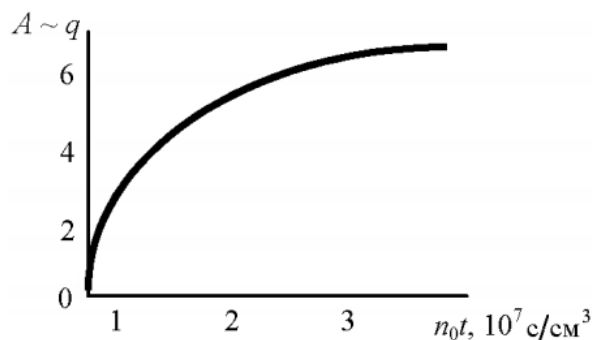


Рис. 18.3 – Залежність параметра  $A$  від часу

Пояснюється це тим, що в міру накопичення заряду на частинці і зростання його відштовхуючої дії зростає градієнт концентрації іонів біля поверхні частинки за рахунок зосередження зміни концентрації все в більш вузькому шарі поблизу поверхні частинки.

Однак графік (рис. 18.3) показує, що основний заряд частинка набуває в початковий період часу ( $n_0t \leq 2 \cdot 10^7$  с/см<sup>3</sup>), а далі він змінюється мало. За граничний заряд

приймається  $A_{\text{гран}} = 6,7$  при  $n_0t = 4 \cdot 10^7$  с/см<sup>3</sup>.

Строго аналітичного рішення задачі при одночасному врахуванні «ударного» і «дифузійного» механізмів зарядження немає і завдання вирішується чисельно. В результаті чисельних розрахунків встановлено, що при  $0,1 \leq a \leq 1$  мкм величину заряду можна обчислювати як суму зарядів, розрахованих за формулами «ударного» і «дифузійного» зарядження.

Якщо форма частинок істотно відрізняється від сферичної, то використовується заміна частинки на частинку еліпсоїдальної форми, еквівалентну за співвідношенням осей і об'єму. Слід мати на увазі, що якщо форма частинки близька до сферичної, то вона при зарядженні обертається.

Частинки подовженої форми в електричному полі набувають певну орієнтацію, і цю обставину слід враховувати при розрахунку величини заряду. Формули для «ударного» і «дифузійного» зарядження еліпсоїдів можна знайти у відповідній літературі.

Індукційне зарядження частинок. Механізм індукційного зарядження пояснимо, розглядаючи рух сферичної провідної частинки в полі плоского конденсатора (рис. 18.4).

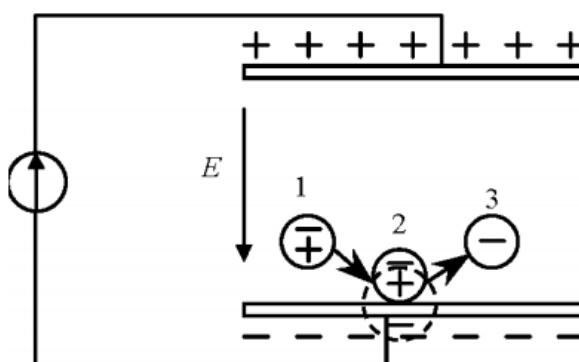


Рис. 18.4 – Схема індукційного зарядження частинок

Частинка, яка потрапляє в проміжок між пластинами, поляризується (позиція 1). При контакті з електродом (позиція 2) взаємодія зарядів частинки і електрода призводить до нейтралізації найближчого до точки контакту поляризаційного заряду. Далі, якщо частинка відривається (позиція 3), то вона забирає надлишковий заряд.

Таким чином, індукційний механізм зарядження включає поляризацію частинки в електричному полі і нейтралізацію одного із зарядів. Не обов'язково це відбувається при контакті з електродом. Наприклад, поділ зарядів відбувається при розриві крапель в

електричному полі.

Зарядження при контакті з електродом в електричному полі. Для розрахунку індукційного зарядження розглянемо частинку у вигляді провідного півеліпсоїда, що знаходиться на поверхні плоского електрода в електричному полі (рис. 18.5,  $\varepsilon_1 \rightarrow \infty$ , питомі електропровідності  $\gamma_{v1} = \gamma_{v2} = 0$ ).

Півеліпсоїд за рахунок зміни співвідношення осей дозволяє моделювати частинки різної форми. Форма у вигляді півеліпсоїда зручна для розрахунку поля, так як за рахунок дзеркального відображення плоскої поверхні електрода від системи півеліпсоїда на площині в однорідному полі можна перейти до системи еліпсоїд в однорідному полі. Для такого випадку відомий аналітичний розподіл поля на поверхні і навколо еліпсоїда, що знаходиться в однорідному полі.

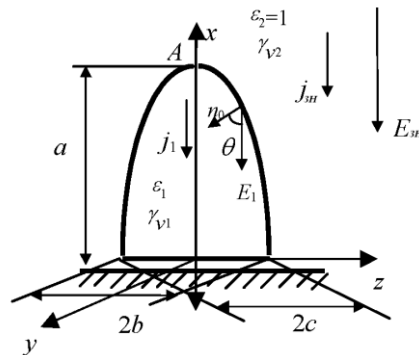


Рис. 18.5 – Півеліпсоїд на електроді

Тоді напруженість електричного поля біля поверхні провідного півеліпсоїда  $E_n$  запишеться у вигляді:

$$E_n = -\frac{E_{zn}x}{a^2 d_a} \left[ \left( \frac{x}{a} \right)^2 + \left( \frac{y}{b} \right)^2 + \left( \frac{z}{c} \right)^2 \right]^{-\frac{1}{2}},$$

де  $a, b, c$  – півосі еліпсоїда,  $d_a$  – коефіцієнт деполаризації еліпсоїда в напрямку вісі  $x$ .

Коефіцієнт деполаризації відображає зміну напруженості поля еліпсоїдом в напрямку відповідної вісі. Для сфери маємо  $d_a = d_b = d_c = 1/3$ . Якщо частинка моделюється півеліпсоїдом, то  $b/a = c/a = 0,5$  і  $d_a = 0,172$ .

Маючи на увазі, що густина поверхневого заряду пов'язана з напруженістю поля біля поверхні електрода співвідношенням:

$$\sigma = -\varepsilon_0 E_n,$$

індукційний заряд півеліпсоїда можна визначити за формулою:

$$q = \int_s \sigma ds = -\varepsilon_0 \int_s E_n ds,$$

Після підстановки ( $E_n$ ) в ( $q$ ) і інтегрування в еліпсоїдальній системі координат по зовнішній поверхні півеліпсоїда отримаємо:

$$q = -\pi \varepsilon_0 E_{zn} \frac{bc}{d_a},$$

Таким чином, провідна частинка на поверхні електрода в електричному полі, вектор напруженості якого спрямований до поверхні електрода, набуває негативний заряд і на неї діє відриваюча від поверхні електрична сила.

Зарядження напівпровідної частинки, що знаходиться на електроді в полі уніполярного коронного розряду. У загальному випадку частинка характеризується деякою певною величиною питомої об'ємної електропровідності  $\gamma_{v1}$  і знаходиться на електроді не в електростатичному полі, а в полі уніполярного коронного розряду, тобто  $\gamma_{v2} \neq 0$  і  $J_{zn} \neq 0$ . Тоді зарядження не проходить миттєво і зміна заряду в часі визначається рівнянням нерозривності густині повного струму (струму провідності та зміщення) на поверхні частинки (рис. 18.5):

$$\gamma_{v2}E_{2n} + \varepsilon_0\varepsilon_2 \frac{dE_{2n}}{dt} = \gamma_{v1}E_{1n} + \varepsilon_0\varepsilon_1 \frac{dE_{1n}}{dt},$$

Оскільки в початковий момент часу частинка поляризується як діелектричний еліпсоїд, то поле всередині частинки є однорідним і направлено паралельно  $E_{zn}$ . Це означає, що  $E_{1n} \sim \cos\theta$ , де  $\theta$  – кут між нормаллю до поверхні і вектором  $E_1$ . Звідси з умови рівності нормальних складових вектора електричного зміщення всередині і зовні напівеліпсоїда отримуємо:

$$E_{2n} = E_{1n} \frac{\varepsilon_1}{\varepsilon_2},$$

де  $E_{2n}$  – нормальна складова напруженості електричного поля на зовнішній поверхні півеліпсоїда. Тоді густина зв'язаних зарядів  $\sigma_{nos} = \varepsilon_0(E_{1n} - E_{2n}) \approx \theta$ .

Кількість заряду, що осідає в одиницю часу на одиницю поверхні частинки в результаті протікання струму коронного розряду дорівнює:

$$J_{2n} - J_{1n} = \gamma_{v2}E_{2n} - \gamma_{v1}E_{1n},$$

Таким чином, сумарна густина вільного та зв'язаного зарядів  $\sigma = \sigma_A \cos\theta$  (пропорційна  $\cos\theta$ ), де  $\sigma_A$  – сумарна густина вільного та зв'язаного зарядів у вершині  $A$  півеліпсоїда.

Оскільки в процесі зарядження  $E_{1n}$ ,  $E_{2n}$ ,  $\sigma$  залишаються пропорційними  $\cos\theta$ , то рівняння нерозривності  $\gamma_{v2}E_{2n} + \varepsilon_0\varepsilon_2 \frac{dE_{2n}}{dt} = \gamma_{v1}E_{1n} + \varepsilon_0\varepsilon_1 \frac{dE_{1n}}{dt}$  досить вирішити тільки для вершини еліпсоїда  $A$ .

Для вершини еліпсоїда справедливо:

$$E_{1n}^A = E_{zn} + d_a \frac{\sigma_A}{\varepsilon_0},$$

$$E_{2n}^A = E_{zn} - (1 - d_a) \frac{\sigma_A}{\varepsilon_0},$$

Підставляючи і інтегруючи по поверхні частинки, отримуємо:

$$q(t) = q_\infty \left( 1 - e^{-\frac{t}{\tau}} \right),$$

$$q_\infty = \frac{\pi \varepsilon_0 b c E_s n (\varepsilon_1 \gamma_{v2} - \gamma_{v1})}{\gamma_{v1} d_a + \gamma_{v2} (1 - d_a)},$$

$$\tau = \varepsilon_0 \frac{\varepsilon_1 d_a + (1 - d_a)}{\gamma_{v1} d_a + \gamma_{v2} (1 - d_a)},$$

де  $q_\infty$  – граничний заряд, що набувається частинкою,  $\tau$  – постійна часу зарядження частинки.

З отриманих залежностей випливає, що зарядження частинки в часі носить експоненціальний характер.

При  $\varepsilon_1 \gamma_{v2} > \gamma_{v1}$  (частинка погано проводить)  $q_\infty > 0$ , тобто частинка набуває надлишковий позитивний заряд і на неї діє притискаюча електрична сила.

При  $\varepsilon_1 \gamma_{v2} < \gamma_{v1}$  (частинка добре проводить)  $q_\infty < 0$ , тобто частинка набуває надлишковий негативний заряд і на неї діє відриваюча електрична сила.

Статична електризація. Статична електризація відбувається при контакті і наступному поділі тіл, що володіють різними фізичними або хімічними властивостями. Контактуючі тіла набувають заряду різних знаків. Статична електризація відбувається і у відсутності зовнішнього поля. Основною фізичною величиною, що визначає електричні явища при контакті твердих тіл, є робота виходу електрона. Різниця робіт виходу електрона у контактуючих тіл приводить до порушення їх нейтрального стану. Матеріал, для якого робота виходу  $A_{\text{вих}}$  менше, при контакті легше втрачає електрони і, таким чином, заряджається позитивно. Інтенсивність утворення зарядів пропорційно різниці робіт виходу.

Для більшості діелектричних частинок діє правило Коена: при приведенні в контакт і роз'єднання двох діелектриків речовина з більшою відносною діелектричною проникністю заряджається позитивно. Так як стан поверхні контактуючих частинок залежить від ряду факторів (параметрів зовнішнього середовища, забруднення поверхні і т.д.), то набуті заряди залежать суттєво від конкретних умов і визначаються експериментально.

### 18.3. Процеси, що пов'язані з переміщенням частинок в електричному полі

Рух частинок в електричному полі. Рух частинок розглядається як рух їх центру мас. Це означає, що обертання частинок, якщо потрібно, слід враховувати окремо. За другим законом Ньютона:

$$m \frac{d\vec{V}}{dt} = \sum \vec{F},$$

На частинку, що знаходиться в газовому (повітряному) середовищі і в електричному полі, діють наступні сили:

1. Сила тяжіння  $F_{mg} = mg$ , де  $g$  – вектор прискорення вільного падіння.
2. Сила дії електричного поля на заряджену частинку.

$$F_q = Eq,$$

3. Сила, зумовлена нерівномірним розподілом напруженості електричного поля.

Сферична частинка, що знаходиться в електричному полі, набуває заряду поляризації  $q_{\Pi}$  (рис.18.6). Сила, діюча на сферу в неоднорідному електричному полі, дорівнює

$$F = E_1 q_{\Pi} - E_2 q_{\Pi} = q_{\Pi} \delta E = q_{\Pi} 2a \text{grad} E.$$

Оцінки сили, зумовленої нерівномірним розподілом електричного поля, показують, що вона мала в порівнянні з іншими силами, що діють на частинку, і тому цією силою можна знехтувати, за винятком випадків, коли частинка не заряджена, а неоднорідність поля велика.

4. Сила опору середовища руху частинки  $F_c$ . Сила виникає у зв'язку з тим, що рух тіла викликає появу в навколишньому просторі течію газу (повітря). Порушення течії вимагає деякої витрати енергії, яка забирається у рухомого тіла. Таким чином, тіло гальмується.

Силу опору середовища можна розрахувати, якщо відомо розподіл швидкості течії повітря, викликаной тілом. Розподіл швидкості повітря навколо рухомого тіла розраховується з рівняння Нав'є-Стокса:

$$\gamma_{\Pi} \frac{d\bar{u}}{dt} = \gamma_{\Pi} \bar{F} - \gamma_{\Pi} P - \mu \Delta^2 \bar{u},$$

і рівняння нерозривності течії рідини:

$$\operatorname{div} u = 0,$$

де  $u$  – вектор швидкості течії рідини;  $\gamma_{\Pi}$  – густина середовища (повітря);  $\mu$  – коефіцієнт

динамічної в'язкості середовища ( $\mu_{\text{пов}} = 1,85 \cdot 10^{-5}$  кг/(м·с));  $p$  – тиск.

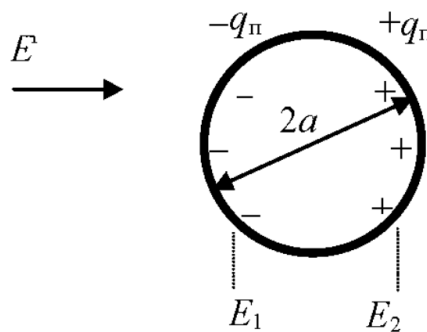


Рис. 18.6 – Поляризація частинки в електричному полі

Навіть в самому простому випадку – для сферичної частинки – рішення рівняння руху вдається отримати тільки при спрощених припущеннях. Ці спрощення визначаються величиною числа Рейнольдса, що встановлює співвідношення між силами інерції і в'язкості:

$$Re = \frac{F_{\text{інерції}}}{F_{\text{в'язкості}}} = \frac{\gamma_{\Pi} \frac{d\bar{u}}{dt}}{\mu \Delta^2 \bar{u}} \cong \frac{\gamma_{\Pi} \frac{u}{l/u}}{\mu u/l^2} = \frac{ul}{\nu},$$

де  $\nu = \mu/\gamma_{\Pi}$  – коефіцієнт кінематичної в'язкості повітря;  $l$  – характерний розмір течії (для течії рідини в трубі – діаметр труби; для частинки – діаметр частинки).

Для рухомої сферичної частинки:

$$Re = \nu \frac{2a}{\nu},$$

де  $\nu$  – швидкість частинки відносно газового середовища,  $\nu$  – коефіцієнт кінематичної



в'язкості.

У технологічних процесах зазвичай використовують частинки розміром не більше 300 мкм. Швидкості частинок зазвичай менше 10 м/с і найчастіше складають  $1 \div 3$  м/с. Найбільші значення числа Рейнольдса досягають 100, зазвичай вони лежать в діапазоні  $0,1 \div 10$ .

Спрощуючи рівняння Нав'є-Стокса Стокс отримав формулу для сили опору сфери руху сферичної частинки, справедливу при  $Re \leq 0,5$ :

$$F_c = -6\pi\mu a v,$$

При більш широкому діапазоні значень  $Re$  слід використовувати наступну формулу для сили опору:

$$\bar{F}_c = -C_x \frac{\gamma_n v \bar{v}}{2} s,$$

де  $C_x$  – коефіцієнт аеродинамічного опору;  $s$  – характерний перетин тіла (для сфери  $s = \pi a^2$ ,  $a$  – радіус).

В результаті узагальнення експериментальних даних отримана залежність  $C_x = f(Re)$ , яка представлена рис. 18.7.

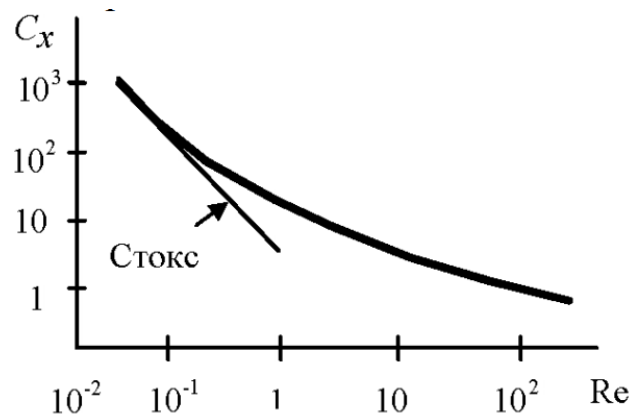


Рис.18.7 – Залежність  $C_x$  від  $Re$

Найбільш вдалою апроксимацією цієї залежності є формула Клячко:

$$C_x = \frac{24}{Re} \left( 1 + \frac{Re^{2/3}}{6} \right)$$

З ( $F_c$ ) і ( $C_x$ ) випливає, що сила опору середовища нелінійно залежить від швидкості (рис. 18.8)

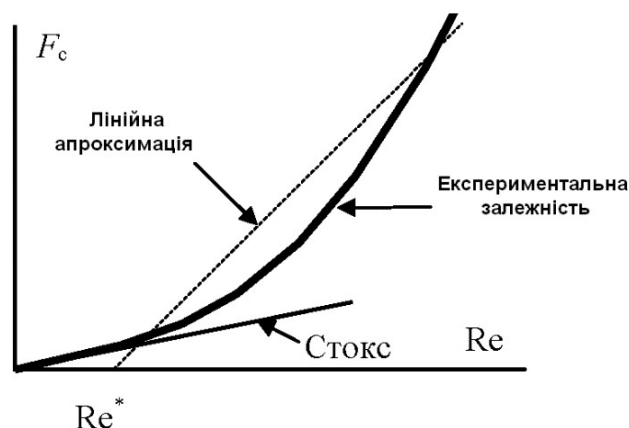


Рис. 18.8 – Лінійна апроксимація залежності сили опору від числа Рейнольдса

Для аналітичних розрахунків більш зручно використовувати лінійну апроксимацію від числа Рейнольдса:

$$F_c = k_c 6\pi\mu a(v - v^*)$$

де  $k_c$ ,  $v^* = (Re^* v) / 2a$  - коефіцієнти лінійної апроксимації (рис. 18.8).

Рух частинки в однорідному електричному полі. При русі сферичної частинки зі стану спокою під дією постійних зовнішніх сил при  $Re < 0,5$  рівняння руху запишеться у вигляді:

$$m \frac{dv}{dt} = F - 6\pi\mu a v,$$

де  $F = Eq + mg$  – зовнішні сили, які визначаються впливом електричного та гравітаційного полів. Якщо заряд частинки і напруженість поля незмінні, то рішення рівняння має вигляд:

$$v = v_{уст} \left( 1 - e^{-\frac{t}{\tau}} \right),$$

де  $v_{уст} = F / (6\pi\mu a)$  – усталена швидкість руху частинки;  $\tau = m / (6\pi\mu a)$  – стала часу, що визначає характерний час зміни швидкості частинки.

Стала часу пов'язана з довжиною інерційного пробігу частинки –  $l_i$ . Якщо частинка має початкову швидкість  $v_0$ , то при відсутності впливу зовнішніх сил до повної зупинки свого руху вона пройде шлях, рівний:

$$l_s = \int_0^{\infty} v dt = \int_0^{\infty} v_0 e^{-t/\tau} dt = v_0 \tau.$$

Чим більше проявляється вплив інерційних властивостей частинки, тим більше довжина інерційного пробігу.

Для розрахунку руху частинок при  $Re > 0,5$  можна скористатися лінійною апроксимацією сили опору середовища у вигляді ( $F_c$ ). Тоді рішення записується за аналогією з рішенням рівняння ( $F - 6\pi\mu a$ ). Більш складний для розрахунку випадок має місце, коли заряд частинок і напруженість поля в процесі руху змінюються. Аналітичне рішення для цього випадку відсутнє.

Більш просто вирішується задача, якщо силами інерції при розрахунку можна нехтувати. Можливість такого спрощення визначається числом Стокса.

Число Стокса являє собою відношення довжини інерційного пробігу частинки при швидкості  $v_x$  до характерного розміру  $l$  – відстані, на якій діюча на частинку зовнішня сила зазнає зміни, розмірної з її середнім значенням:

$$St = \frac{l_i}{l} = v_x \tau / l$$

Під характерною швидкістю розуміється швидкість, обумовлена дією зовнішніх сил без урахування сил інерції.

Таким чином, число Стокса визначає вплив сил інерції на рух частинки під дією змінної зовнішньої сили. Якщо  $St \ll 1$ , то рух частинки можна вважати безінерційним.

За аналогією з поняттям рухливості іонів можна ввести поняття рухливості

частинки:

$$B_p = v/E = qB, \text{ де } B = v/F = 1/6\pi\mu a.$$

Таким чином, рухливість частинки, що володіє зарядом  $q$ , являє собою сталу швидкість руху в полі одиничної напруженості.

Для випадку, коли частинка набуває заряд в полі коронного розряду, можна побудувати залежність рухливості від розміру частинок (рис. 18.9).

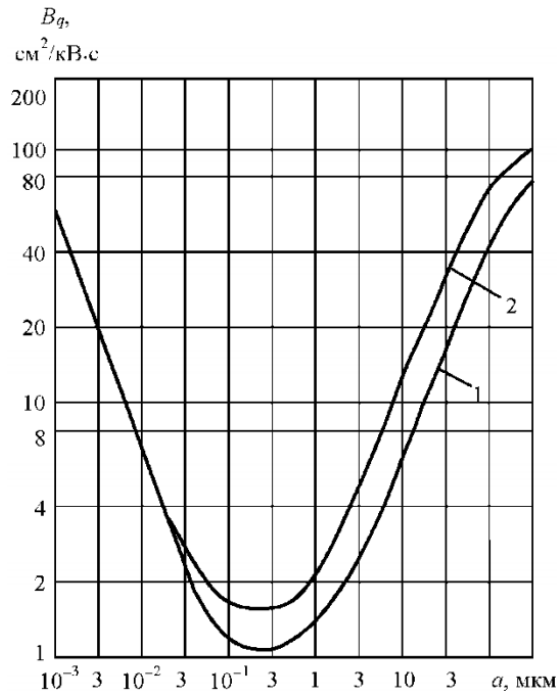


Рис. 18.9 – Залежність рухливості  $B_q$  від радіуса частинок 1 –  $E = 1$  кВ/см; 2 –  $E = 3$  кВ/см

Рухливість має мінімум при розмірі частинок  $2a$  рівному  $0,3 \div 0,5$  мкм. Зростання рухливості для частинок дуже малого розміру пояснюється зменшенням сили опору середовища через те, що розмір частинок стає сумірним з довжиною вільного пробігу молекул повітря (поправка Кенінгема).

Зростання рухливості для частинок  $2a \geq 1$  мкм пояснюється тим, що починає працювати механізм «ударного» зарядження і має місце квадратичний характер залежності заряду від розміру частинок. Тоді відповідно до  $(St)$  рухливість зростає пропорційно розміру частинок.

Для розрахунку сили опору середовища руху частинок несферичної форми використовується заміна на еліпсоїд, еквівалентний частинці за об'ємом і співвідношенням осей. В літературі є дані по коефіцієнту опору для еліпсоїдів.

При русі починаючи з перехідного значення  $Re$  частинки набувають певну орієнтацію (за рахунок гідродинамічній взаємодії з навколишнім середовищем). Орієнтація така, що частинка при русі одержує максимальний опір. Наприклад, на циліндричну подовжену частинку при русі в повітряному середовищі в електричному полі діють два обертаючих моменти (рис. 18.10).

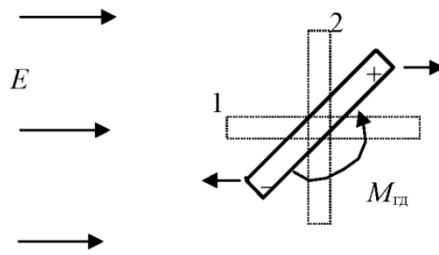


Рис. 18.10 – Сили, що діють на частинку несферичної форми

З одного боку електричне поле прагне розвернути поляризовану частинку таким чином, щоб вона розташувалась своєю великою віссю уздовж силових ліній електричного поля (положення 1). З іншого боку гідродинамічні сили опору середовища руху частинки –  $M_{ГД}$  – прагне розвернути її таким чином, щоб лобовий опір був максимальним з усіх можливих положень частинки, тобто перпендикулярно напрямку руху частинки під дією сил електричного поля. В результаті може встановлюватися деяка проміжна орієнтація частинки в електричному полі, як показано на рис. 18.10.

#### Завдання на самостійне опрацювання та підготовку

1. Самостійно відновити матеріал по основним поняттям та визначенням;
2. Самостійно опрацювати матеріал з опису: Процес та установки для зневоднення нафтопродуктів.

### ТЕМА №19. ОЧИЩЕННЯ ГАЗІВ ВІД ЧАСТИНОК У ЕЛЕКТРОФІЛЬТРАХ

Мета: ознайомити здобувачів початкового рівня вищої освіти з процесами та технологією очищення газів від частинок електрофільтрах.

#### План лекції

- 19.1. Процеси, що відбуваються в електрофільтрах. Задача очищення газів від пилу.
- 19.2. Формування шару частинок на електроді і виникнення зворотного коронного розряду.

#### Хід проведення лекційного заняття

- I. Організація групи;
- II. Мотивація навчальної діяльності. Оголошення теми й мети;
- III. Викладення та обговорення нового матеріалу.
- IV. Оголошення завдання на самостійне опрацювання та підготовку.

#### 19.1. Процеси, що відбуваються в електрофільтрах. Задача очищення газів від пилу

У багатьох технологічних процесах промислові гази містять дрібні тверді або рідкі частинки, від яких повинні бути очищені. В цілому ряді виробництв ці частинки є кінцевим продуктом, наприклад, в виробництві деяких кольорових металів, сажі, цементу, уловлюванні каталізаторів при нафто-перегонці.

В інших випадках потрібна очистка газу від зважених частинок, як, наприклад, при

підготовці повітря при виробництві сірчаної кислоти, або очищення повітря в спеціальних приміщеннях при виробництві напівпровідникових приладів або фотокіноплівки. Набувають поширення побутові електрофільтри, використовувані для очищення повітря житлових приміщень.

Найбільш широке поширення одержали електрофільтри для санітарної очистки димових газів теплових електростанцій. Так при спалюванні твердого палива тільки на одному блоці потужністю 500 МВт утворюється приблизно  $500 \text{ м}^3$  димових газів в секунду, що містять до  $20 \text{ г/м}^3$  зважених частинок золи. Це відповідає викидам в атмосферу 36 тон золи на годину.

Електрофільтри є на сьогоднішній день найбільш ефективним засобом очищення газів завдяки ряду особливостей:

1. У електрофільтрах досягається високий ступінь очищення газу до 99,9 %;
2. Електрофільтри мають дуже низький гідравлічний опір потоку газу;
3. Електрофільтри дозволяють вловлювати зважені частинки в широкому діапазоні розмірів (від частинок мікрометрів до десятків міліметрів);
4. Електрофільтри легко регенеруються
5. Весь процес очищення газів електрофільтрами легко піддається автоматизації.

Альтернативними способами очищення газів є:

1. Рукавні фільтри (володіють високим динамічним опором, який росте в міру набору пилу і важко регенеруються);
2. Циклони і механічні сепаратори (дозволяють добре вловлювати великі частинки, але мають низький ступінь очищення для дрібних частинок);
3. Мокрі скрубери (мають велику витрату води і відносно високий гідравлічний опір).

Принципова схема електрофільтру. Принципова схема електрофільтру представлена на рис. 19.1. Між двома плоскими осаджувальними електродами розташований ряд коронуючих проводів. В проміжок між коронуючими і осаджувальними електродами надходить запылений газ.

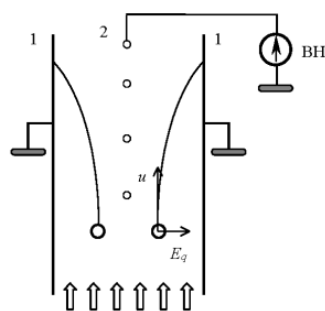


Рис. 19.1 – Принципова схема електрофільтру, де 1 – осаджувальні електроди; 2 – коронуючі електроди

В поле коронного розряду, що виникає при подачі високої напруги на дроти, частинки заряджаються і під дією поля рухаються до осаджувальних площин, з яких вони періодично видаляються. Таким чином, концентрація зважених частинок у міру проходження через електрофільтр поступово зменшується.

Ступінь очищення газів в електрофільтрі. Ступінь очищення газу в електрофільтрі є

основною характеристикою ефективності його роботи. Він визначається вмістом пилу або рідких частинок в газі до надходження в електрофільтр і після виходу з нього:

$$\eta = \frac{Z_{\text{вх}} - Z_{\text{вих}}}{Z_{\text{вх}}} = 1 - \frac{Z_{\text{вих}}}{Z_{\text{вх}}},$$

де  $Z_{\text{вх}}$  – концентрації пилу на вході в електрофільтр;  $Z_{\text{вих}}$  – концентрація пилу на виході з електрофільтру.

Осадження частинок відбувається з області, що безпосередньо граничить з електродом. Спад частинок в цій області заповнюється за рахунок дрейфу частинок в електричному полі і за рахунок захоплення їх турбулентними потоками.

Так як протяг газу в електрофільтрі завжди турбулентний, то саме це сприяє вирівнюванню розподілу концентрації частинок в міжелектродному проміжку.

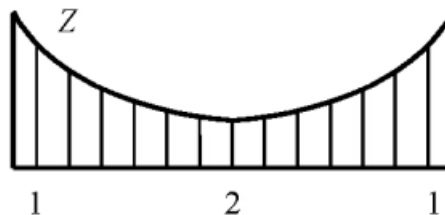


Рис. 19.2 – Розподіл концентрації в міжелектродному проміжку, де 1 – осаджувальні електроди; 2 – коронуючі електроди

В результаті дії всіх факторів: дрейфу частинок в полі, осадження частинок на електродах і турбулентних пульсацій в міжелектродному проміжку встановлюється певний розподіл концентрації (рис. 19.2). Будемо вважати, що закон розподілу концентрації частинок не змінюється по довжині електрофільтру, а зменшується лише абсолютне значення концентрації.

Ступінь очищення визначається середньою по перетину концентрацією пилу, яку ми позначимо  $Z_x$ , де за координату  $x$  приймається відстань від входу в електрофільтр до розглянутого перерізу.

Кількість осадженого пилу визначається концентрацією пилу біля осаджувального електроду  $Z_{oc}$ .

Так як ми прийняли, що закон розподілу концентрації незмінний по довжині електрофільтру, то  $Z_{oc}/Z_x = \chi$  є незмінною на будь-якому віддаленні від входу в електрофільтр.

Маса пилу  $g$ , що міститься в обсязі міжелектродного проміжку довжиною  $dx$ , віддаленому від входу в електрофільтр на відстані  $x$ , дорівнює:

$$g = Z_x 2bHdx,$$

де  $H$  – відстань між коронуючими та осаджувальними електродами,  $b$  – ширина осаджувального електроду.

Зменшення маси пилу за рахунок осадження за час  $d\tau$  на поверхню електродів площею  $2b dx$  буде дорівнювати:

$$dg = -Z_{oc} 2bvHdx d\tau,$$

де  $v$  – швидкість дрейфу під дією поля біля поверхні осаджувального електроду.

Об'єднуючи записані співвідношення, одержуємо:

$$\frac{dg}{g} = -\frac{Z_{oc} 2b v dx \tau}{Z_x 2b H dx} = -\chi v \frac{d\tau}{H} \quad \text{або} \quad \frac{dZ_x}{Z_x} = -\chi v \frac{d\tau}{H},$$

Після інтегрування останнього диференціального рівняння, враховуючи, що  $d\tau = dx/u$  отримуємо:

$$Z_{вих} = Z_{вх} \exp\left(-\frac{v\chi l}{uH}\right),$$

де  $l$  – довжина електрофільтру, а  $u$  – швидкість газу в електрофільтрі.

Таким чином, ступінь очищення газу електрофільтром (у відсотках) дорівнює:

$$\eta = \left[1 - \exp\left(-\frac{v\chi l}{uH}\right)\right] \cdot 100\%,$$

Для підвищення ефективності уловлювання пилу необхідно з одного боку збільшувати швидкість руху частинок до осаджувального електроду і довжину електрофільтру, а з іншого боку зменшувати швидкість газового потоку та ширину міжелектродної відстані.

Якщо ми маємо справу з полідисперсним складом пилу (частинки різного розміру), то розрахунки ведуться за кожною фракцією окремо, а потім інтегральна ступінь очищення визначається як сума середньозважених ступенів очищення окремих фракцій:

$$\eta = \sum_{i=1}^n \eta_i g_i,$$

де  $g_i$  – частинка  $i$ -ої фракції.

Швидкість руху частинок до осаджувального електроду (швидкість дрейфу частинок) визначається головним чином дією електричних сил. Тому, як було показано раніше, встановлена швидкість руху частинок може бути записана у вигляді:

$$v = \frac{qE}{6\pi\mu a},$$

де  $\alpha > 1$  мкм  $q \sim C_1 a^2 E$  або  $v \sim a E^2$

З отриманого співвідношення випливає, що в першу чергу в електрофільтрі осідають великі частинки, а потім дрібні, у яких швидкість дрейфу мала.

Квадратичний характер залежності швидкості від напруженості поля свідчить про доцільність роботи електрофільтру на гранично можливих напругах, що очевидно, відповідає передпробивному режиму.

При цьому краще працювати на негативній полярності напруги живлення, тому що при цьому коронний розряд більш стійкий, а пробивна напруга значно вище.

Вплив концентрації дисперсної фази на характеристики коронного розряду і процес очищення газу електрофільтрами. При наявності дисперсної фази в міжелектродному проміжку сумарний об'ємний заряд буде визначатися вже не тільки об'ємним зарядом іонів, а і об'ємним зарядом заряджених частинок, що знаходяться в проміжку. При певній концентрації дисперсної фази об'ємний заряд частинок стає порівняним з об'ємним зарядом іонів і починає істотно впливати на процеси розвитку розряду. Система рівнянь описує процеси в міжелектродному проміжку може бути представлена у вигляді:

$$\begin{cases} \operatorname{div} E = (\rho_i + \rho_p) / \varepsilon_0 \\ \operatorname{div}(J_i + J_p) = 0 \\ J_i = k\rho_i E, \\ J_p = \rho_p(qB_p E + u), \\ \operatorname{grad} \varphi = -E \end{cases},$$

де  $u$  – середня швидкість руху газового середовища, індекси  $i$  і  $p$  відносяться відповідно до іонів і частинок.

Так як рухливість іонів  $k \gg B_p$ , струм визначається в основному іонною складовою. Об'ємний заряд частинок грає роль негативного зворотного зв'язку.

Частинки пилу в полі коронного розряду набувають заряд того ж знаку, що і знак корони. Рухливість заряджених частинок пилу мала в порівнянні з рухливістю іонів. Заряджені частинки пилу створюють власне електричне поле, вектор якого спрямований зустрічно полю іонів коронного розряду, і ця обставина змушує іони уповільнювати свій рух від коронуючого електрода до осаджувального електрода. Крім того, електричне поле об'ємного заряду частинок пилу знижує напруженість електричного поля на поверхні коронуючого електрода і тим самим зменшує струм коронного розряду. В результаті струм корони значно зменшується.

Це явище – зменшення струму корони – називається замиканням струму корони. При цьому, як наслідок, погіршується зарядження частинок пилу.

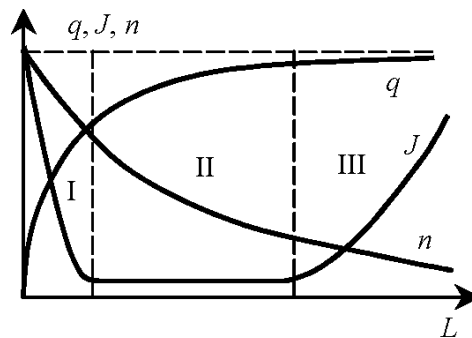


Рис. 19.3 – Зміна струму, концентрації і заряду частинок по довжині електрофільтру

Зміна густини іонного струму, концентрації частинок і їх середнього заряду по довжині електрофільтру, представлено на рис. 19.3, наочно демонструє процес замикання коронного розряду при високих вхідних концентраціях дисперсної фази.

На представленому рисунку можна виділити три характерні зони. У зоні I відбувається порівняно швидке зарядження частинок до заряду, при якому струм через замикання коронного розряду падає практично до нуля. Концентрація частинок через короткочасність цієї стадії змінюється незначно. У зоні II через осадження частинок концентрація зменшується, що призводить до часткового відмикання струму корони і повільного підзарядження частинок, такого, що густина об'ємного заряду частинок завжди залишається близькою до замикаючої. При наближенні заряду до граничного швидкість зарядження різко зменшується. Починаючи з цього моменту (зона III електрофільтру) зменшення концентрації не може бути компенсовано збільшенням заряду частинок і коронний розряд поступово відмикається, що супроводжується ростом струму.



## 19.2. Формування шару частинок на електроді і виникнення зворотного коронного розряду

Опір пилу, яка вловлюється електродами, може змінюватися в дуже широких межах, що в свою чергу істотно впливає на процес уловлювання пилу. Умовно пил поділяють на три групи за рівнями питомого опору.

До першої групи відноситься ті, які добре проводять пил, що має питомий опір  $\rho_v \leq 10^2$  Ом·м. Пил першої групи вловлюється погано, тому що при осадженні частинки

швидко перезаряджаються, відштовхуються від електрода і несуться потоком газу.

До пилу другої групи відносять пил, питомий об'ємний опір якого лежить в межах  $10^2 < \rho_v < 10^8$  Ом·м. Пил другої групи вловлюється добре в електрофільтрах. Заряд

частинок пилу рівномірно стікає на осаджувальний електрод у міру осадження нових частинок і підходу до шару іонів. Таким чином частинки добре утримуються на поверхні шару в процесі пилоловлення.

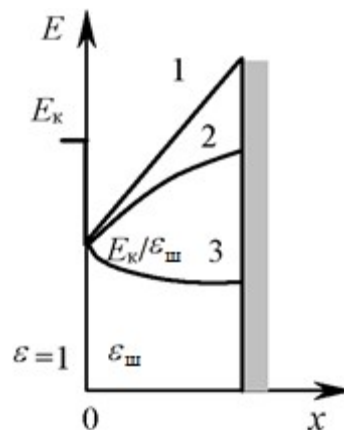


Рис. 19.4 – Розподіл напруженості поля всередині порошкового шару для 1 – діелектричних; 2 – напівпровідних; 3 – провідних частинок

До пилу третьої групи відноситься пил з питомим об'ємним опором  $\rho_v \geq 10^8$  Ом·м. Цей пил найбільш важко уловлюється через виникнення зворотної корони.

Частинки, що осіли на осаджувальний електрод, довго зберігають свій заряд через високий опір частинок пилу. Заряди, що містяться в шарі, визначають розподіл

напруженості електричного поля в шарі.

На рис. 19.4 представлені три характерних випадки розподілу напруженості поля всередині шару частинок в залежності від їх провідності.

Подивимося, як змінюється напруженість електричного поля в шарі для заряджених діелектричних частинок.

За рівняння Пуассона:

$$\operatorname{div} E = \frac{\rho}{\varepsilon_{ш} \varepsilon_0},$$

Для одновимірного випадку:

$$\frac{dE}{dx} = \frac{\rho}{\varepsilon_{ш} \varepsilon_0},$$

Розділяємо змінні та інтегруємо:

$$\int_{\frac{E_k}{\varepsilon_{ш}}}^E dE = \frac{\rho}{\varepsilon_{ш} \varepsilon_0} \int_0^x dx,$$

Рішення є:

$$E = \frac{E_k}{\varepsilon_{ш}} + \frac{\rho x}{(\varepsilon_{ш} \varepsilon_0)},$$

Тобто отримали лінійну залежність від координати  $x$ .

Отже, для діелектричних і напівпровідних частинок по мірі зростання товщини шару напруженість зростає і може навіть істотно перевищити зовнішню напруженість поля, незважаючи на те, що  $\varepsilon_{ш} < \varepsilon_{zn}$ . У газових включеннях, наявних усередині шару, починаються іонізаційні процеси, які призведуть до пробію всього шару. В результаті пробію утворюється кратер, порошок з якого викидається в міжелектродний проміжок. Після пробію шару навколо кратера починається також розряд по поверхні, який знімає поверхневий заряд.

В результаті цих іонізаційних процесів починається емісія іонів протилежного знаку в міжелектродний проміжок. Це явище носить назву зворотного коронного

розряду. Встановлено, що пробій шару настає при  $\rho_v > 10^8 \div 10^9$  Ом·м. Це

співвідношення прийнято вважати критерієм виникнення зворотного коронного розряду.

Час виникнення зворотного коронного розряду легко визначити з умови зарядження шару без урахування витоків зарядів через шар.

$$E_{ш} \varepsilon_{ш} - E_k = \frac{\sigma}{\varepsilon_0},$$

де  $E_{ш}$  – напруженість в шарі частинок,  $E_k$  – напруженість поля коронного розряду на поверхні шару. Враховуючи, що  $\sigma = Jt$ , отримаємо при виникненні зворотної корони:

$$E_{ш} \varepsilon_{ш} - E_k = \frac{Jt_{зк}}{\varepsilon_0},$$

де  $E_{пр.ш}$  – пробивна напруженість в шарі частинок,  $t_{зк}$  – час виникнення зворотного коронного розряду.

Час виникнення зворотного коронного розряду дорівнюватиме:

$$t_{зк} = 2\varepsilon_{ш}\varepsilon_0 \left( E_{пр.ш} - \frac{E_k}{\varepsilon_{ш}} \right) / J ,$$

Тут введено поправочний коефіцієнт рівний 2, який враховує перехід від початкової форми до інтенсивному зворотному коронному розряду, який надає істотний вплив на процеси в електрофільтрі.

Наявність зворотного коронного розряду негативно впливає на процес очищення газу в електрофільтрі в силу наступних причин:

1. Через появу в міжелектродному проміжку об'ємного заряду протилежного знаку знижується напруженість поля біля поверхні осаджувального електрода.
2. Відбувається часткове розрядження і навіть перезарядження частинок порошку, що наближаються до осаджувального електрода.
3. Посилюється вторинне винесення частинок з поверхні шару в результаті їх перезарядження.

При інтенсивному зворотному коронному розряді процес осадження може повністю припинитися. Найбільше поширення набули три способи боротьби з цим шкідливим явищем:

1. Кондиціонування топкових газів, наприклад, введенням аміаку, що приводить до зниження питомого об'ємного опору нижче критичного рівня.
2. Імпульсне живлення коронуючих електродів, що знижує потік іонів до поверхні шару. Зменшення густини струму приводить до уповільнення наростання напруги на шарі і, отже, до зменшення ймовірності виникнення зворотної корони.
3. Знакозмінне живлення електрофільтру дозволяє змінювати полярність постійної напруги на коронуючих електродах електрофільтру на протилежну в момент, коли напруга на шарі наблизиться до напруги виникнення зворотної корони. Таким чином, на осаджувальному електроді формується загальний шар пилу, що складається з тонких протилежно заряджених шарів пилу, що в кінцевому підсумку знижує напруженість електричного поля в шарі пилу і зменшує ймовірність виникнення зворотної корони.

Конструкція електрофільтрів. Використовуються електрофільтри, які мають різну конструкцію. Вони бувають трубчасті (рис 19.5, а) і пластинчасті (рис 19.5, б).

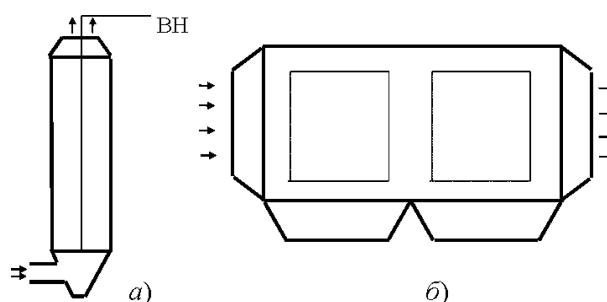


Рис. 19.5 – Конструкції електрофільтрів, де а) - трубчастий; б) - пластинчастий

Трубчасті електрофільтри – апарати з вертикальним потоком газу. Підлягають очищенню газів, які проходять всередині трубчастих осаджувальних електродів, по осі яких розташовуються коронуючі дроти. Шар пилу періодичним струшуванням електродів видаляється в пило-збірник, що знаходиться в нижній частині електрофільтру.

Пластинчасті електрофільтри – апарати з осаджувальним електродом у вигляді пластин, розташованих на деякій відстані один від одного. Між пластинами розташовані коронуючі електроди, укріплені на рамах.

В одному корпусі електрофільтру може бути розташовано декілька незалежних послідовно розташованих систем електродів, або, як прийнято їх називати в практиці газоочистки, електричних полів.

Величезну роль в досягненні максимальної ефективності пиловловлення грає конструктивне виконання коронуючих і осаджувальних електродів.

Коронуючі електроди можна розділити на дві групи (рис. 19.6). До першої групи відносяться електроди, які не мають фіксовані коронуючі точки. При негативній короні – негативної полярності коронуючих електродів – світні точки розташовуються вздовж електрода на різних відстанях один від одного залежно від стану поверхні електрода. Типові види електродів цієї групи: круглий діаметром 2÷4 мм, квадратний із стороною 3÷4 мм і штикового перетину, який вписується в квадрат зі стороною 4÷5 мм (рис. 19.6, а).

До другої групи належать електроди з фіксованими точками розряду по їх довжині. Типовими видами цих електродів є колючий дріт, пилкоподібні і голчасті електроди (рис. 19.6, б). Електроди другої групи при однаковій напрузі та міжелектродній відстані забезпечують значно більший струм корони, ніж електроди першої групи. Легше забезпечується необхідна механічна міцність. Вданий час набули широкого поширення коронуючі електроди стрічково-голчастого типу. Вони легко виготовляються шляхом штампування і при наявності достатньої механічної міцності володіють хорошими електричними характеристиками.

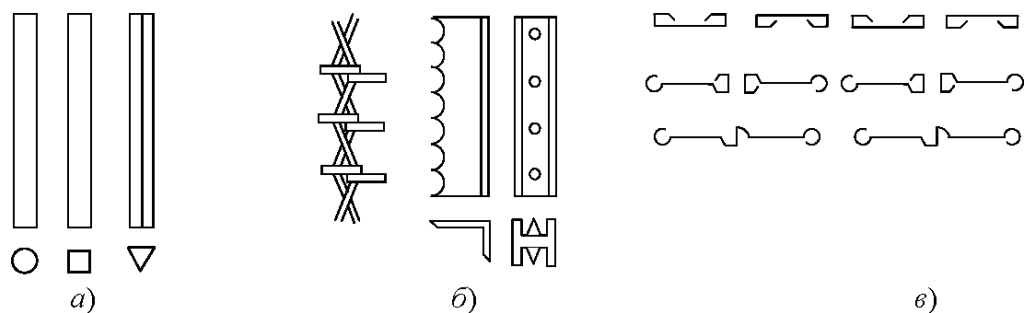


Рис. 19.6 – Електроди електрофільтрів, де а) – гладкі коронуючі електроди; б) – коронуючі електроди з фіксованими точками розряду; в) – осаджувальні електроди

Осаджувальні електроди електрофільтрів також мають різноманітну форму: вони мають гладку поверхню без гострих кутів, необхідну для забезпечення високої напруженості електричного поля, і порожнини, що дозволяють струшувати пил з мінімальним вторинним винесенням (рис. 19.6, в).

Для успішної роботи електрофільтрів має важливе значення установка коронуючих проводів точно по осі між осаджувальними пластинами. До теперішнього часу застосовувалися апарати з відстанню між осаджувальними електродами 275 мм. Крок між коронуючими проводами становить  $100 \div 200$  мм. Є тенденція до збільшення відстані між осаджувальними електродами до 450 мм і навіть до 600 мм. Дослідно-промислові випробування таких електрофільтрів показали, що, незважаючи на передбачення теорії, зниження ступеня очищення не відбувається, тому що істотно зростає пробивна напруга проміжків.

#### **Завдання на самостійне опрацювання та підготовку**

1. Самостійно відновити матеріал по основним поняттям та визначенням;
2. Самостійно опрацювати матеріал з опису: Промислові електротехнологічні установки для знесолення і зневоднення нафтопродуктів.

### **ТЕМА №20. ТЕХНОЛОГІЇ З ВИКОРИСТАННЯМ ПЛАЗМО-ХІМІЧНИХ ТА ОЗОНОВИХ РЕАКЦІЙ**

Мета: ознайомити здобувачів початкового рівня вищої освіти з плазмо-хімічними процесами та їх використання, основи плазмохімічних перетворень та озонових процесів.

#### **План лекції**

- 20.1. Плазмо-хімічні процеси та їх використання. Основи плазмохімічних перетворень
- 20.2. Процеси електросинтезу та промислові генератори озону Електросинтез озону
- 20.3. Області використання озонових технологій

#### **Хід проведення лекційного заняття**

- I. Організація групи;
- II. Мотивація навчальної діяльності. Оголошення теми й мети;
- III. Викладення та обговорення нового матеріалу.
- IV. Оголошення завдання на самостійне опрацювання та підготовку.

#### **20.1. Плазмо-хімічні процеси та їх використання. Основи плазмохімічних перетворень**

До цього моменту розглядалися атоми і молекули в повітрі, їх збудження, дисоціація, іонізація не акцентуючи увагу на хімічні перетворення, які відбуваються з цими частинками. Далі розглянемо процеси хімічних перетворень, які відбуваються з різними атомами, молекулами, активними радикалами і іонами, які виникають в процесі формування та розвитку електричного розряду в газі.

Всі фізико-хімічні процеси, які відбуваються в плазмі газового розряду, можна розділити на три часові інтервали:

1.  $\Delta t \approx 10^{-15}$  с – на цьому інтервалі часу завершуються процеси збудження атомів і молекул електронним або фотонним ударом;

2.  $\Delta t \approx 10^{-13}$  с – на цьому інтервалі часу завершуються процеси іонізації і дисоціації атомів і молекул;

3. Третій інтервал часу має змінну тривалість аж до  $\Delta t \approx 10^{-3}$  с в залежності від складу газу, температури і тиску – це стадія хімічних процесів і реакцій.

Швидкість більшості хімічних реакцій зростає з підвищенням температури. Це пов'язано з тим, що далеко не кожне зіткнення молекул реагуючих речовин призводить до хімічної реакції між ними. Для того щоб утворилися нові молекули, необхідно попередньо послабити або розірвати зв'язки між атомами в молекулах вихідних речовин. Для цього потрібно витрата певної кількості енергії. Підвищення температури означає збільшення хаотичного руху молекул. Залежність константи швидкості реакції від температури передає напівемпіричне рівняння Арреніуса:

$$k_p = A e^{-E_a/RT},$$

де  $A$  – деяка константа, що залежить від вступаючих у реакцію речовин;  $R$  – газова стала;  $T$  – температура;  $E_a$  – так звана енергія активації реакції.

Енергією активації називають надлишкову енергію, яка повинна бути повідомлена молекулам для того, щоб їх зіткнення могло привести до утворення нової речовини (тобто відбулася хімічна реакція між цими частинками). Величина енергії активації залежить від виду реагуючих частинок і від їх енергетичного стану. Так, для реакцій між валентно-насиченими молекулами (атоми в молекулі мають повністю заповнену зовнішню електронну оболонку) енергія активації близька до енергії дисоціації і становить  $100 \div 200$  кДж/моль.

Реакції атомів (або радикалів) з молекулами протікають з проміжними значеннями енергії активації ( $40 \div 100$  кДж/моль). Реакції між атомами і радикалами (або між радикалами) відбуваються з енергією активації близькою до нуля.

Таким чином, хімічні реакції йдуть успішно тоді, коли реагенти набувають певну кількість енергії, і головною особливістю плазмохімічних реакцій є те, що в газорозрядній плазмі під дією різних зовнішніх впливів атоми і молекули мають можливість перейти в активні частинки: радикали, іони або збуджені частинки. Ця обставина дозволяє подолати потенціальний бар'єр для абсолютно нових елементарних хімічних реакцій, що забезпечує утворення абсолютно нових хімічних сполук, що ніколи не утворюються в даних умовах, або дозволяють створити зміну у швидкостях оборотних хімічних реакцій і тим самим створити умови для напрацювання таких продуктів реакції, які при нормальних умовах мають вкрай низькі рівноважні концентрації.

Наведемо практично важливі приклади використання плазмохімічних реакцій. Найбільше поширення набув електросинтез озону, тобто перетворення молекул кисню  $O_2$  в молекули озону  $O_3$ . Плазма газового розряду використовується для його отримання вже близько ста років. Весь цей час йшов безперервний процес пошуку більш раціональної форми газового розряду і умов протікання хімічних реакцій. Тому ці реакції на сьогоднішній день найбільш досліджені і є основою для подальших розробок.

Більше десятків років ведуться дослідження по застосуванню плазми газового розряду для очищення газових викидів теплових електричних станцій від оксидів азоту і сірки. Створено пілотні установки, ведуться активні дослідження і пошуки нових технічних рішень.

В останні роки розпочато роботи щодо використання плазми імпульсного газового розряду для очищення газових викидів лакофарбових, гальванічних і просочувальних виробництв від парів розчинників і компаундів на заміну енергоємних технологій високотемпературного допалювання.

Озон – це друге відносно стійке з'єднання (алотропне) кисню. На відміну від молекули кисню, молекула озону складається з трьох атомів і має більш довгі зв'язки між атомами кисню (довжина зв'язку в молекулі озону 128 Å, в той час як довжина зв'язку в молекулі кисню 121 Å).

**Фізичні властивості озону.** Озон може існувати в усіх трьох агрегатних станах. При нормальних умовах озон – газ блакитного кольору. Температура кипіння озону дорівнює – 112 °С, а температура плавлення становить – 192 °С.

Слово озон в перекладі з грецького означає «пахучий» і ця назва справді відображає одну з особливостей озону, тому що його характерний запах проявляється вже при концентраціях  $10^{-7} \div 10^{-8} \%$ .

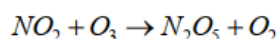
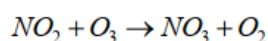
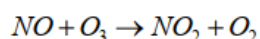
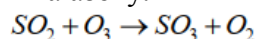
Завдяки своїй хімічній активності озон має дуже низьку граничнодопустиму концентрацію в повітрі (порівнянний з ГДК бойових отруйних речовин)  $5 \cdot 10^{-8} \%$  або  $0,1 \text{ мг/м}^3$ . **Хімічні властивості озону.**

1. Озон на відміну від атомарного кисню є відносно стійким з'єднанням. Він мимовільно розкладається при високих концентраціях, при цьому чим вище концентрація, тим вище швидкість реакції розкладання. При концентраціях озону 12÷15% озон може розкладатися з вибухом. Слід також зазначити, що процес розкладання озону прискорюється із зростанням температури, а сама реакція розкладання  $2\text{O}_3 \rightarrow 3\text{O}_2 + 68 \text{ ккал}$  екзотермічна і супроводжується виділенням великої кількості тепла.

2. Озон є одним з найсильніших природних окислювачів. Окислювальний потенціал озону становить 2,07 В (для порівняння у фтору 2,4 В, а у хлору 1,7 В).

Озон окислює всі метали за винятком золота і групи платини.

Озон доокислює оксиди сірки та азоту:



Озон окисляє аміак з утворенням нітриту амонію:



Озон активно вступає в реакцію з ароматичними сполуками з руйнуванням ароматичного ядра. Зокрема озон реагує з фенолом з руйнуванням ядра.

Озон активно взаємодіє з насиченими вуглеводнями з руйнуванням подвійних вуглецевих зв'язків.

Взаємодія озону з органічними сполуками знаходить широке застосування в хімічній промисловості і в суміжних галузях. Використання реакції озону з неграничними сполуками дозволяє отримувати штучним шляхом різні жирні кислоти, амінокислоти та полімерні матеріали. Реакції озону з ароматичними вуглеводнями – дифенілову кислоту, фталевий діальдегід і фталеву кислоту та ін.

Реакції озону з ароматичними сполуками лягли в основу технологій дезодорації різних середовищ, приміщень та стічних вод.

**Біологічні властивості озону.** Незважаючи на велику кількість досліджень механізм недостатньо розкритий.

Відомо, що при високих концентраціях озону спостерігаються ураження дихальних шляхів, легень і слизової оболонки. Тривала дія озону призводить до розвитку хронічних захворювань легень і верхніх дихальних шляхів.

Вплив малими дозами озону надає профілактичну і терапевтичну дію і починає активно використовуватися в медицині.

Озон впливає на всі мікроорганізми, руйнуючи мембрану і окислюючи протоплазму. При цьому слід відзначити, що концентрації озону, які згубні для простих мікроорганізмів, на кілька порядків нижче, ніж для більш високоорганізованих.

Озон утворюється з кисню. Існує кілька способів отримання озону, серед яких найбільш поширеними є: електролітичний, фотохімічний і електросинтез в плазмі газового розряду.

**Електролітичний метод** синтезу озону здійснюється в спеціальних електролітичних осередках. В якості електролітів використовуються розчини різних кислот та їх солі ( $H_2SO_4$ ,  $HClO_4$ ,  $NaClO_4$ ,  $KClO_4$ ).

Утворення озону відбувається за рахунок розкладання води і утворення атомарного кисню, який приєднавшись до молекули кисню утворює озон і молекулу водню. Цей метод дозволяє отримати концентрований озон, проте він дуже енергоємний, і тому він не знайшов широкого поширення.

**Фотохімічний метод** отримання озону являє собою найбільш поширений в природі спосіб. Утворення озону відбувається при дисоціації молекули кисню під дією короткохвильового УФ випромінювання. Цей метод не дозволяє отримувати озон високої концентрації. Прилади, засновані на цьому методі, отримали поширення для лабораторних цілей, в медицині і харчовій промисловості.

**Електросинтез озону** набув найбільшого поширення. Цей метод поєднує в собі можливість отримання озону високих концентрацій з великою продуктивністю і відносно невисокими енерговитратами.

## **20.2. Процеси електросинтезу та промислові генератори озону. Електросинтез озону**

В результаті численних досліджень з використання різних видів газового розряду для електросинтезу озону поширення набули апарати, які використовують три форми розряду:

1. *Бар'єрний розряд* – отримав найбільше поширення, являє собою велику сукупність імпульсних мікророзрядів в газовому проміжку довжиною  $1 \div 3$  мм між двома електродами, розділеними одним або двома діелектричними бар'єрами при живленні електродів змінною високою напругою частотою від 50 Гц до декількох кілогерц.

2. *Поверхневий розряд* – близький за формою до бар'єрного розряду, що одержав поширення в останнє десятиліття завдяки своїй простоті і надійності.

Так само являє собою сукупність мікророзрядів, що розвиваються уздовж поверхні твердого діелектрика при живленні електродів змінною напругою частотою від 50 Гц до  $15 \div 40$  кГц.



3. *Імпульсний розряд* – як правило стримерний коронний розряд, що виникає в проміжку між двома електродами при живленні електродів імпульсною напругою тривалістю від сотень наносекунд до одиниць мікросекунд.

З великого числа різних сучасних конструкцій озонаторів, що використовують електричний розряд для отримання озону, найбільшого поширення набули озонатори з так званим бар'єрним розрядом. Продуктивність однієї установки може становити від грамів до 150 кг озону на годину.

Бар'єрним розрядом називають розряд у вузькому газовому зазорі між плоскими або коаксіальними електродами, один з яких (або обидва) покритий шаром твердого діелектрика (рис. 20.1) Якщо до електродів докладено змінну напругу з амплітудою, що перевищує пробивну напругу газового проміжку, то в ньому виникає розряд, що складається з великого числа окремих іскор, дискретних в просторі і в часі. Розряд продовжується до тих пір, поки миттєве значення напруги на електродній системі не досягне  $U_{\max}$ . Особливістю бар'єрного розряду є локальне накопичення заряду на поверхні діелектричного бар'єру в процесі розвитку в проміжку кожної окремої іскри.

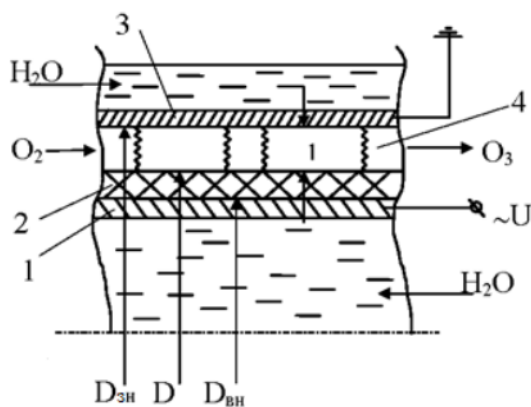


Рис. 20.1 – Електродна система озонатора, де 1, 3 – електроди; 2 – діелектричний бар'єр; 4 – зона розряду

Розглянемо детальніше вказане явище. Нехай до проміжку з бар'єром докладено змінну напругу, при якій ще немає розряду. Ця напруга розподіляється по ємностям бар'єру та газового проміжку, так що до газового проміжку прикладена напруга:

$$U_{\Gamma} = U \frac{C_{\delta}}{C_{\Gamma} + C_{\delta}},$$

де  $U$  – напруга на електродах;  $C_{\delta}$  – ємність бар'єра;  $C_{\Gamma}$  – ємність газового проміжку.

Для циліндричної системи електродів:

$$C_{\delta} = 2\pi\epsilon_0\epsilon_{\delta} \frac{L}{\ln \frac{D}{D_{\text{вн}}}}, \quad C_{\Gamma} = 2\pi\epsilon_0\epsilon_{\Gamma} \frac{L}{\ln \frac{D_{\text{зн}}}{D}},$$

де  $\epsilon_{\delta}$  і  $\epsilon_{\Gamma}$  – діелектричні проникності бар'єру і газу;  $L$  – довжина електродів;  $D_{\text{зн}}$ ,  $D$ ,  $D_{\text{вн}}$  – діаметри електродів (рис. 20.1).

Розглянемо перший напівперіод впливаючої напруги, коли електрод з діелектриком є анодом (рис. 20.2, а). Коли напруженість зовнішнього поля  $E_{\text{зовн}}$ , створена прикладеною напругою, досягне значення початкової напруженості, у проміжку

починаються інтенсивні іонізаційні процеси і створюється велика кількість лавин, які просуваються у напрямку до діелектричного бар'єра.

Розрахунки показують, що при нормальній густині газу в розрядному проміжку довжиною  $l = 1 - 3$  мм розвиток лавин може привести до створення об'ємних зарядів з густиною  $N$ , при якій виконується умова переходу лавини в стример (кількість електронів в лавині досягає  $10^8$ ). При виконанні цієї умови в якомусь місці проміжку виникає стримерний канал, головка якого доходить до поверхні електрода, покритого діелектричним бар'єром.

Відбувається пробій газового проміжку за багатолавинно-стримерним механізмом. Зовні розряд виглядає як іскра. Цьому процесу відповідає напруга  $U_{пр}$ .

В ході утворення і руху лавин і, особливо, при підході до діелектричного бар'єра головки стримера, на поверхню бар'єру осідають негативні заряди – електрони. Діаметр каналу стримера становить при розглянутих умовах  $\approx 0,1$  мм. Приблизно таких же розмірів виявляється і пляма заряду, що осів на бар'єр. Що стосується позитивних іонів, які утворилися при розвитку лавин, то, маючи набагато меншу рухливість, вони поступово зміщуються в бік металевого катода. Підходячи до нього, вони нейтралізуються. Накопичення негативного заряду на поверхні діелектричного бар'єру викликано великим об'ємним опором матеріалу бар'єру (порядку  $10^{14} \div 10^{16}$  Ом.см). Великий поверхневий опір перешкоджає розтіканню заряду по поверхні.

Утворюється заряджений диск з максимальною густиною заряду в центрі диска. Заряджений диск створює поле, що має як нормальну  $E_{ос}$ , так і тангенціальну  $E_{пов}$  складові. Під дією останньої складової вздовж поверхні бар'єру починається поверхневий розряд лавинного типу. У розглянутому нами випадку негативно зарядженого диска поверхневий розряд створює круглу пляму негативного заряду з діаметром, у багато разів перевищуючи діаметр початкового заряду. Одиночний розряд в проміжку може створити пляму діаметром до  $15 \div 17$  мм (рис. 20.2, а).

Пляма негативного заряду, що утворилася на бар'єрі після поверхневого розряду, створює в розрядному проміжку своє поле з нормальною складовою напруженості  $E_{ос}$ , спрямовану зустрічно до прикладеного зовнішнього поля. Вимірювання і розрахунки показують, що напруженість  $E_{ос}$  може досягати декількох кВ/см. У підсумку сумарне поле в проміжку  $E_{\Sigma} = E_{зн} - E_{ос}$  знижується, і іонізаційні процеси в цій частині проміжку припиняються. Розряд гасне. Весь описаний процес займає час до десяти наносекунд, за який прикладена напруга не встигає змінитися. Одночасно починається розвиток стримера в іншій частині проміжку, де процес повторюється.

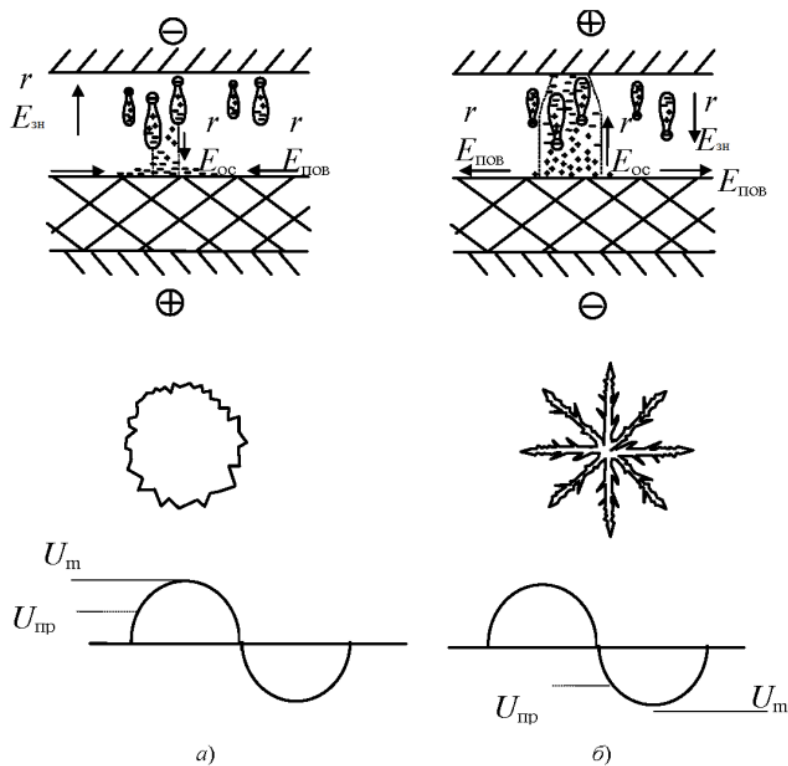


Рис. 20.2 – Розвиток розряду в проміжку озонатора

Утворення в різних точках іскор і їх згасання буде продовжуватися до тих пір, поки прикладена напруга не досягне максимального значення  $U_m$ . Після цього розряд в проміжку припиняється. Осцилограма струму через проміжок виглядає так, як показано на рис. 20.3, де на криву струму зміщення  $I_{зм}$  накладені імпульси струму окремих іскор.

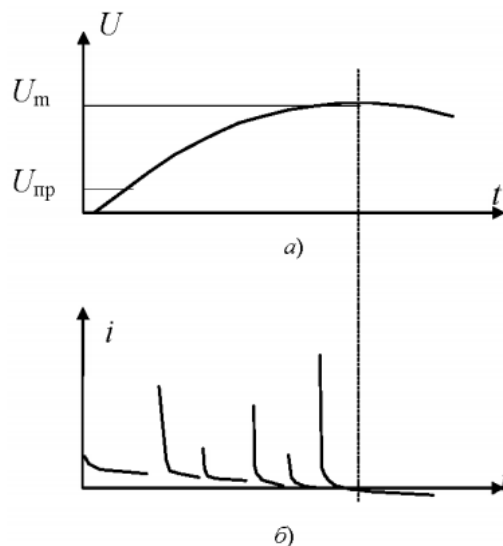


Рис. 20.3 – Осцилограми струму і напруги, де а) осцилограма напруги на електродах; б) осцилограма струму через озонатор

Розглянемо тепер напівперіод, коли електрод з діелектричним бар'єром є катодом. При цьому знову розглядається найперший напівперіод, при якому розвиток розряду в проміжку починається при відсутності заряду на діелектрику.

Розвиток розряду йде в цьому випадку в напрямку металевого електрода. Знову утворюється стример, але при підході його головки до аноду всі електрони йдуть у метал.

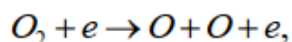
Накопичення заряду на аноді не відбувається. Але розвиток розряду йде і в сторону катода, до якого переміщуються позитивно заряджені іони. Підходячи до бар'єра, вони осідають на ньому, утворюючи позитивний заряд, який є причиною виникнення поверхневого розряду. В даному випадку поверхневий розряд носить стримерний характер і на поверхні бар'єру залишається пляма у вигляді зірочки (Рис. 20.2, б), максимальна напруженість поля  $E_{oc}$ , також становить кілька кВ/см. В результаті сумарна напруженість поля в проміжку знижується і розрядні процеси в цій частині проміжку припиняються. Діаметр зірочок одиночних розрядів досягає  $20 \div 25$  мм. Коли напруга на проміжку досягає  $U_m$ , розряд припиняється.

Інакше йде справа, коли розряд розвивається в проміжку, в якому на діелектричному бар'єрі вже є заряд, що залишився від попереднього напівперіоду. Оскільки поверхневий опір матеріалу бар'єру дуже великий, заряд не встигає релаксувати за час одного періоду. Розподіл зарядів на поверхні до початку розряду в даний напівперіод залишається практично тим же, як в момент закінчення розряду в попередній напівперіод. Це означає, що в новий напівперіод поле осівших зарядів складається із зовнішнім полем, посилюючи його. Тому в місцях, де розташовані плями або зірочки осівших зарядів, напруженість поля досягає початкової  $E_n$  раніше, ніж в іншій частині проміжку. Розвиток іонізаційних процесів і розрядів виявляються «прив'язаними» до місць розряду в попередній напівперіод.

Утворення в різних точках іскор і їх згасання буде продовжуватись до тих пір, поки прикладена напруга не досягне максимального значення  $U_m$ . Після цього розряд в проміжку припиняється. Осцилограма струму через проміжок виглядає так, як показано на рис. 20.3, де на криву струму зміщення  $I_{zm}$  накладені імпульси окремих іскор.

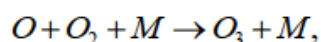
Картина розряду в проміжку стає ще більш складною після тривалого впливу змінної напруги. Але є певні закономірності, які проявляються в усіх випадках: у кожен напівперіод розряд має вид окремих, швидко затухаючих іскор. Розряд починається, коли напруга, прикладена до електродної системи, менше розрядної напруги газового проміжку. У кожен напівперіод утворюються імпульси струму, число і амплітуда яких є статистичними величинами.

В процесі розвитку кожної окремої іскри відбуваються електрохімічні реакції, результатом яких є утворення озону і його розкладання. Процес утворення озону складається з декількох етапів, хоча в загальному випадку число реакцій, пов'язаних з утворенням озону і його розкладанням, перевищує 70, існують основні, без проходження яких отримання озону неможливо. Основною реакцією є процес дисоціації молекул кисню при взаємодії з вільним електроном:



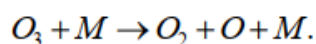
постійна часу цього процесу дуже мала і становить одиниці наносекунд.

Наступний етап полягає в утворенні молекули озону:



в якій бере участь третя частинка  $M$ : молекула, іон, електрон чи атом в нейтральному або збудженому стані. Дослідження показують, що утворення озону потребує часу до 10 мкс.

Крім утворення озону, при русі частинок газу відбувається розкладання молекул  $O_3$  по реакції:



Ця реакція йде тим інтенсивніше, чим вище температура газу.

Утворений в зоні розряду озон дифундує в сусідні області. В результаті проходження робочого газу через розрядну зону озонатора на виході виходить озоноповітряна або озono-киснева суміш з концентрацією озону ( $10^{-1} \div 10$ ) г/м<sup>3</sup>, при цьому одержувана кількість озону залежить від перевищення інтенсивності утворення над інтенсивністю розкладання.

Розглянутий механізм розвитку розряду в однорідному полі проміжку з діелектричним бар'єром на електроді дозволяє встановити ті особливості, через які бар'єрний розряд став одним з основних джерел озону. Головна особливість – дискретність розрядних процесів в просторі і в часі. Протягом частини кожного напівперіоду впливаючої напруги розряд розподілений по всьому проміжку. Це дозволяє інтенсивно охолоджувати всю розрядну зону охолодженням електродів, що особливо важливо для запобігання термічного розкладання вже утвореного озону. Бар'єрний розряд, крім того, є найбільш раціональною формою розряду і для утворення озону. Бар'єр виступає в ролі струмообмежувального опору для кожної окремої іскри, що запобігає утворенню великого струму, тобто втратам енергії на розігрів розрядного каналу. Разом з тим, в такому розряді процеси дисоціації молекул кисню йдуть з найбільшою інтенсивністю, що забезпечується маючим місце розподілом по енергіях вільних електронів.

Утворення іскри в кожній області проміжку, де напруженість поля перевищить пробивну і затухання цієї іскри через спад напруженості поля, викликаного осілими зарядами, підтримує на електродах практично незмінну напругу на газовому проміжку  $U_T$  протягом усього часу горіння розряду в даний напівперіод. Тому середня напруженість поля в газовому проміжку протягом усього часу горіння розряду лише незначно відрізняється від початкової. Сталість напруженості забезпечує при розряді стабільний розподіл електронів по енергіях, що важливо для проходження електрохімічних реакцій утворення озону.

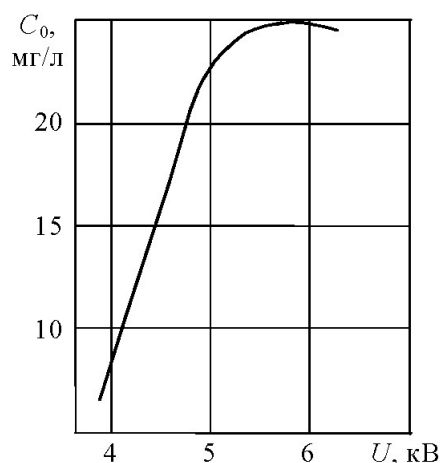


Рис. 20.4 – Вихід озону в залежності від напруги частоти  $f = 1500$  Гц; витрата газу  $V_T = 1$  л/хв

З ростом прикладеної напруги час горіння розряду в кожен напівперіод збільшується, збільшується число іскор і зростає вихід озону. Однак майже пропорційне зростання виходу озону з ростом напруги триває до певної межі (рис. 20.4).

З ростом числа іскор збільшується температура розрядної зони, посилюється розкладання озону. Робота озонатора при перегріві стає неефективною. Тому робочий

режим озонатора повинен лежати в області лінійної частини кривої залежності концентрації озону  $C_{O_3}$  від напруги.

Наведений вище опис процесів в озонаторі відображає тільки фізичну картину в газовому проміжку. Для електричного кола, що включає джерело живлення і озонатор, останній представляє складне навантаження, яке змінюється при кожному запалюванні розряду. Аналіз процесів в еквівалентному електричному колі, що містить озонатор, дозволяє зв'язати фізичні процеси з електричними величинами, що визначають ці процеси.

В еквівалентній електричній схемі озонатор може бути представлений двома послідовно включеними ємностями: ємністю газового проміжку і ємністю бар'єру, як це було визначено раніше.

Нехай до озонатора прикладено змінну напругу:

$$U = U_0 \sin \omega t ,$$

До початку розряду в газовому проміжку, тобто при напрузі  $U_r < U_{пр}$ , прикладена напруга розподіляється по ємностям газового проміжку і бар'єру:  $U = U_r + U_{\delta}$ , причому

$$U_{\delta} = U \frac{C_r}{C_r + C_{\delta}} ; \quad U_r = U \frac{C_{\delta}}{C_r + C_{\delta}} ,$$

Струм через озонатор дорівнює:

$$i = U_0 \omega \frac{C_{\delta} C_r}{C_r + C_{\delta}} \cos \omega t ,$$

Коли напруга на газовому проміжку стане достатньою для його пробію, в проміжку починається розряд, напруга на газовому проміжку стає рівною напрузі горіння розряду  $U_{гор}$  і не змінюється поки горить розряд. Тоді напруга на діелектричному бар'єрі може бути визначена як:

$$U_{\delta} = U_0 \sin \omega t - U_{гор} ,$$

Струм через озонатор при розряді:

$$I = \frac{d}{dt} (C_{\delta} U_{\delta}) = U_{\omega} C_{\delta} \cos \omega t$$

Так як  $\varepsilon_{\delta} > \varepsilon_r$ , то сумарна ємність озонатора менше ємності бар'єру, і при виникненні розряду струм стрибком зростає.

Як вже говорилося вище, крива струму через озонатор при розряді має складну форму, що враховує імпульси струму окремих розрядів. Тому зазвичай користуються поняттям середнього струму через озонатор при розряді, відповідному двохнапівперіодній схемі випрямлення:

$$I_{сеп} = (U_0 - U_{гор}) \frac{2}{\pi} \omega C_{\delta} ,$$

Дуже важливою характеристикою, що визначає не тільки інтенсивність іонізаційних процесів в газовому проміжку, а й ефективність утворення озону, є активна потужність розряду  $P$ , із зростанням якої вихід озону зростає. Правильна оцінка активної потужності при роботі озонатора дозволяє визначити ефективність роботи пристрою в цілому.

Розрахунок активної потужності в колі змінного струму проводиться за рівнянням:

$$P = \frac{1}{t} \int i U dt = \frac{1}{2\pi} \int i U d(\omega t) ,$$

Якщо цей інтеграл розбити на ділянки, відповідно інтервалам, коли розряд в проміжку є і коли його немає, і на кожній ділянці використовувати свої рівняння для напруги та струму, то можна отримати рівняння для активної потужності виду:

$$P = U_{гор} \left[ \frac{2(U_0 - U_{гор})C_0\omega}{\pi} - \frac{2U_2\omega C_2}{\pi} \right],$$

де перший доданок в квадратних дужках відповідає середньому по схемі двохнапівперіодного випрямлення струму через озонатор при горінні розряду, а другий доданок – середньому струму в момент запалювання розряду, коли напруга на проміжку стає рівною пробивній. З невеликою похибкою це напруга можна вважати рівною напрузі горіння розряду. Струм, що відповідає цій напрузі, називають критичним.

Тоді рівняння для потужності набуває виду:

$$P = U_{гор} (I_{сер} - I_{кр}),$$

Це рівняння використовується для визначення потужності при побудові вольт-амперної характеристики озонатора.

Метод полягає в тому, що вимірюють випрямлений за схемою двохнапівперіодного випрямлення струм через озонатор при змінній напрузі, прикладеної до електродів, і будують вольт-амперну характеристику  $I = f(U)$ . До початку розряду ця характеристика має вигляд прямої з нахилом, обумовленої опором всього озонатора (рис. 20.5). Після запалювання розряду струм визначається в основному ємністю бар'єру, і нахил прямої змінюється. Точка зламу відповідає критичному режиму, при якому струм дорівнює  $I_{кр}$ . Якщо продовжити розрядну частину вольт-амперної характеристики до перетину з віссю напруги, то точка перетину дає напругу горіння розряду  $U_{гор}$ .

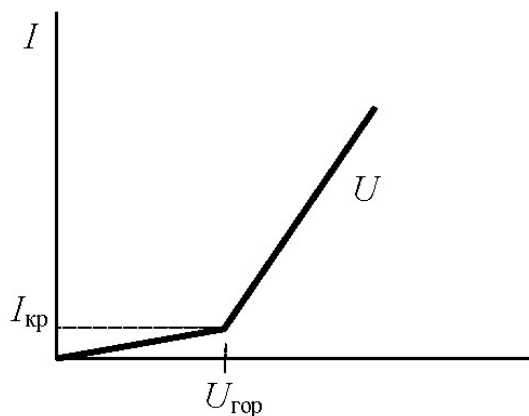


Рис. 20.5 – Вольт-амперна характеристика озонатора

Знаючи значення  $I_{кр}$  і  $U_{гор}$ , можна знайти потужність для будь-якого значення напруги за відповідним значенням  $I_{сер}$ .

Основними параметрами, що визначають ефективність роботи бар'єрного озонатора, є: напруга на електродах  $U$ ; газовий зазор  $l$  (ця величина визначає характер розряду і його інтенсивність); діелектрична проникність матеріалу бар'єру  $\epsilon_0$ ; частота  $f$  впливаючої напруги і витрата газу  $V_r$ , що визначає концентрацію озону в газовій суміші з озонатора.

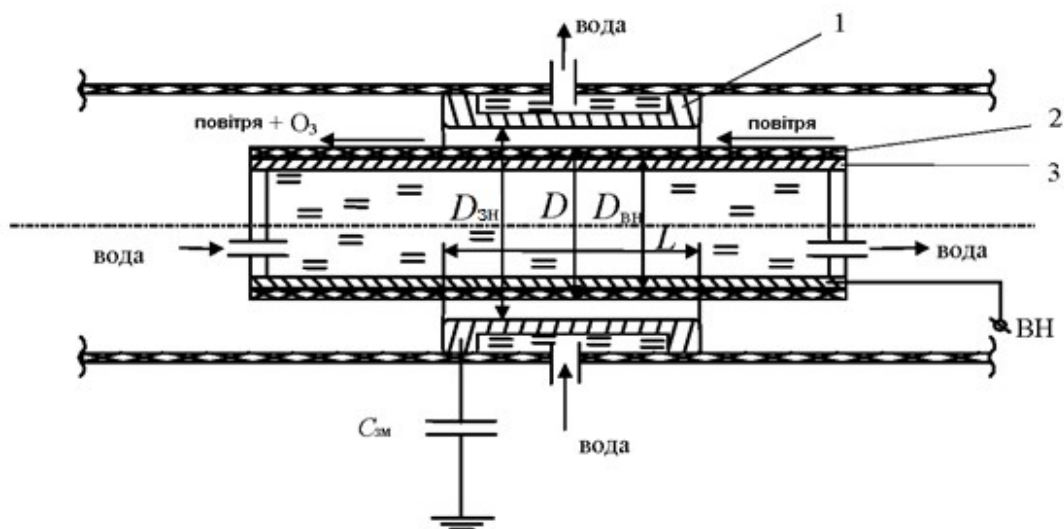


Рис. 20.6 – Трубчастий бар'єрний озонатор, де 1 – зовнішній електрод; 2 – бар'єр із скло-емалі; 3 – внутрішній електрод

Для виведення озону, який утворився, з розрядного проміжку необхідно створити рівномірний потік газу через розрядну зону. Найбільш зручно це здійснюється в коаксіальній системі електродів, так званого, трубчастого озонатора (рис. 20.6).

Від швидкості протікання газу через озонатор, або від витрати газу  $V_r$  (л/хв) залежить час перебування кожного одиничного об'єму газу в зоні розряду. Це означає, що число розрядів, що розвиваються в кожному одиничному об'ємі газу при русі його вздовж озонатора залежить від  $V_r$ , тобто концентрація озону на виході з озонатора залежить від витрати газу.

З витратою газу пов'язана продуктивність озонатора:

$$G = C_{O_3} \cdot V_r,$$

вимірювана в грамах (або кілограмах) озону на годину. Поряд з концентрацією озону в повітрі на виході озонатора  $C_{O_3}$  (г/л) продуктивність  $G$  є важливою характеристикою озонатора.

Наступною важливою величиною, що визначає ефективність роботи озонатора, є питомі витрати енергії на отримання озону:

$$W = \frac{P}{G}, \text{ кВт} \cdot \text{год/кг}$$

Ця величина має особливо важливе значення для промислових озонаторів з продуктивністю до 150 кг/год.

### 20.3. Области використання озонових технологій

В даний час 95 % питної води в Європі проходить озонну підготовку. У США йде процес переведення з хлорування на озонування.

В останні 20 років області застосування озону значно розширилися і в усьому світі ведуться нові розробки. В таблицю 20.1 зведені та класифіковано основні технологічні застосування озону. Слід звернути увагу на те, що настільки бурхливого розвитку технологій з використанням озону сприяє його екологічна чистота. На відміну від інших



окислювачів озон в процесі реакцій розкладається на молекулярний і атомарний кисень і граничні оксиди. Всі ці продукти, як правило, не забруднюють навколишнє середовище і не призводять до утворення канцерогенних речовин, як наприклад при окисленні хлором або фтором.

Таблиця 20.1

**«Основні області технологічного застосування озону»**

| Очищення природних і стічних вод              | Очищення газових викидів                                  | Сільське господарство і харчова промисловість      | Медицина і ветеринарія  | Хімічна промисловість                                     | Побутові застосування                                    |
|---|---|--|---|---|--|
| Централізовані системи підготовки питної води | Очищення газових викидів ТЕС від оксидів азоту і сірки    | Підготовка води і кормів для тваринництва          | Озонотерапія і профілактика профзахворювань                               | Видобуток рідкісних металів та їх виділення з стічних вод | Кондиціонування повітря приміщень                        |
| Автономні системи підготовки питної води      | Очищення повітря приміщень лакофарбової і інш. виробництв | Дезінфекція тари, приміщень і обладнання           | Застосування в хірургії та післяхірургічній профілактиці                  | Синтез нових полімерів                                    | Очищення води в плавальних басейнах                      |
| Очищення промислових стічних вод              | Санація повітря приміщень промислових підприємств         | Зберігання та транспортування продуктів харчування | Стерилізація медичного інструменту та обладнання                          | Органічний синтез і біотехнології                         | Консервування харчових продуктів                         |
| Очищення біологічно забруднених вод           |   | Промислове інтенсивне рибництво                    | Санація повітря приміщень для боротьби з внутрішньолікарневими інфекціями | Відбілювання целюлози і тканин                            | Дезодорування повітря в рефрижераторах, пілососах і т.д. |

**Підготовка питної води.** Застосування озону для підготовки питної води відноситься до найраніших використань окислювальних і дезінфікуючих властивостей озону. Спочатку озон використовувався тільки для знезараження, потім його стали застосовувати для видалення запаху, зміни кольоровості води та усунення домішок.

*Знезараження* – це видалення з води бактерій, спор, мікробів і вірусів (інактивація). Для видалення бактерій у воду вводять дезінфікуючу речовину. Чим більше дезінфікуючої речовини введено, тим ефективніше її вплив на бактерії. Доза дезінфікуючої речовини (мінімальна кількість дезінфікуючої речовини в міліграмах, яку необхідно для інактивації одного літра оброблюваної води) варіюється в залежності від вмісту у воді органічних речовин, від температури води і від величини активної реакції

води з дезінфікуючою речовиною – рН. На рис. 20.7 наведено графік залежності кількості бактерій, що містяться у воді, від величини дози впливаючої дезінфікуючої речовини (в нашому випадку хлору  $D_{Cl}$  і озону  $D_{O_3}$ ).

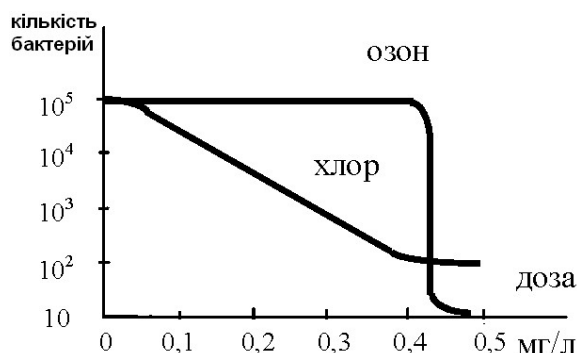


Рис. 20.7 – Кількість бактерій у воді в залежності від дози дезінфектанту

З графіка видно, що при використанні хлору, чим більше його дозування в оброблювану воду, тим менша кількість бактерій виживає. Для озону виявляється різка бактерицидна дія при досягненні критичної дози озону рівною  $0,4 \div 0,5$  мг озону в газі на літр оброблюваної води. Причому, відбувається повна інактивація води.

Механізм впливу окислювача полягає в руйнуванні бактерій шляхом інактивації бактерійних протеїнів, тобто дифузією через мембрану клітини в цитоплазму з ураженням життєвих центрів бактерій.

Дослідження механізму озонування бактерій показали, що дія його відбувається швидко за умови підтримки потрібної концентрації розчиненого озону в воді протягом певного часу. Якщо озон ефективно впливає на бактерії, то хлор виробляє тільки вибіркоче отруєння життєвих центрів бактерій, причому досить повільне через необхідність тривалого часу для дифузії в цитоплазмі.

Час необхідний для зниження концентрації бактерій до допустимої величини, яка характеризується Колі-індексом, називається часом інактивації.

Для хлору час інактивації становить 30 хв при утриманні залишкового хлору у воді в межах  $C_{вCl} = 0,05 \div 0,2$  мг/л.

Для озону цей час становить 12 хв при утриманні розчиненого озону в воді:  $C_{вO_3} = 0,1 \div 0,3$  мг/л.

У Франції для інактивації води прийнято час рівний 4 хв при концентрації озону в воді  $C_{вO_3} = 0,4$  мг/л.

Враховуючи, що час інактивації в сильній степені залежить від концентрації залишкового озону в воді, в США введено в практику використання так званого СТ – фактора [мг/л·хв], який встановлює зв'язок між необхідним часом інактивації і концентрацією розчиненого озону в воді.

Таблиця 20.2

**«Залежність СТ-фактора від степеня інактивації води та її температури (рН=6÷9)»**

| Рівень інактивації | Температура води, °С |   |    |    |    |    |
|--------------------|----------------------|---|----|----|----|----|
|                    | 0,5                  | 5 | 10 | 15 | 20 | 25 |
|                    |                      |   |    |    |    |    |

|     |      |      |      |      |      |      |
|-----|------|------|------|------|------|------|
| 0,5 | 0,53 | 0,44 | 0,37 | 0,27 | 0,2  | 0,13 |
| 1,0 | 1,13 | 0,67 | 0,53 | 0,47 | 0,35 | 0,2  |
| 2,0 | 2,2  | 1,33 | 1,13 | 0,87 | 0,67 | 0,53 |
| 3,0 | 3,0  | 2,0  | 1,67 | 1,3  | 1,0  | 0,67 |

З табл. 20.2 видно, що чим вище рівень (порядок зниження кількості бактерій у воді) інактивації води, тобто менша кількість бактерій повинна залишитися в воді, тим більше повинно бути значення СТ-фактора. Крім того, чим вище температура води, тим менше СТ-фактор. Наприклад, при температурі води + 25 °С і залишковій концентрації озону у воді 1 мг/л для інактивації на три порядки необхідний час обробки води озоном, рівний 0,67 хв.

Крім великої здатності знищення бактерій озон має високу ефективність у знищенні спор, цист (щільні оболонки, що утворюються навколо одноклітинних організмів, наприклад, джгутикових і корененіжок, при їх розмноженні, а також в несприятливих для них умовах) і багатьох інших патогенних мікробів.

*Обезбарвлення* – це видалення з води органічних і хімічних речовин, офарблюючих воду. В залежності від кольоровості вихідної води потрібно більшу або меншу кількість озону для знебарвлення води.

Для південних районів, де вихідна кольоровість води значно більше, потрібно вже доза озону, рівна 8 мг/л (див. рис. 20.8).

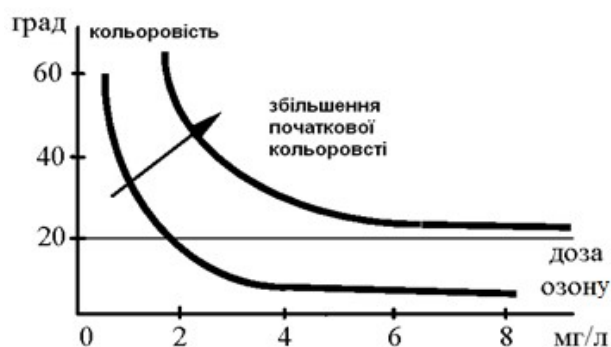
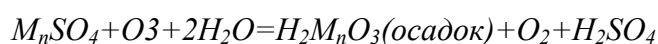


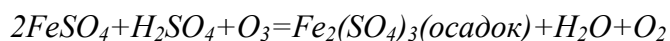
Рис. 20.8 – Залежність знебарвлення води від дозування озону

Фізичний механізм впливу озону при знебарвленні води полягає, поперше, в розкладанні речовин до найпростіших  $H_2O$  і  $CO_2$ , по-друге, в коагуляції (об'єднанні) речовин з подальшим випаданням їх в осад.

Ефективне знебарвлення води озонуванням є одним з визначальних критеріїв у виборі озону в якості діючого реагенту при підготовці питної води.

**Видалення заліза та марганцю.** У природних водах найбільш часто зустрічається залізо в двовалентній формі, що знаходиться в розчиненому стані. Марганець в природній воді зазвичай супроводжує залізо. Обидві ці речовини надають воді кольоровість і характерний присмак. Озон легко окисляє солі заліза і марганцю з утворенням нерозчинних речовин, які видаляються відстоюванням або фільтрацією. Хімічні реакції сульфідів заліза і марганцю з озоном можна записати у вигляді:





Якщо залізо і марганець містяться у формі органічних сполук або колоїдальних частинок (з розміром  $0,1 \div 0,01$  мкм), то знезалізнення і деманганація води звичайними способами не вдається. В цьому випадку необхідно попереднє окислення цих комплексних органічних сполук, що приводить до їх розщеплення, після чого стає можливим видалення заліза і марганцю одним із звичайних методів. Окислюючи комплексні сполуки, озон перетворює розчинні солі в нерозчинні, тому необхідно подальше фільтрування води для звільнення її від осадків, що випадають.

Слід зазначити, що хоча озонування і не є найбільш економічним методом знезалізнення і деманганації, але застосування озону з цими цілями виправдано в двох випадках: по-перше, коли звичайні способи видалення з води заліза і марганцю не дають результатів або ведуть до недостатніх результатів, по-друге, коли необхідно одночасне усунення запахів, присмаків і кольоровості води.

**Усунення присмаків і запахів води.** Неприємні присмаки і запахи в деяких природних водах викликаються присутністю сполук мінерального і органічного походження, що знаходяться в розчиненому або колоїдному стані. Ці присмаки за своїм походженням можуть бути:

- а) мінерального походження, тобто викликаються наявністю заліза, марганцю, сірководню і загальної підвищеною мінералізацією;
- б) природного органічного походження – гумінові кислоти, органічні речовини, що надходять зі стоками, водорості і найчастіше планктон;
- в) міського походження – продукти розпаду органічних речовин в міських стоках;
- г) промислового походження – різні хімічні стоки, миючі засоби, вуглеводні, гудрон і ін. смоли;
- д) сільськогосподарського походження – пестициди, гербіциди, мінеральні добрива.

Озон окисляє названі вище сполуки, приводячи до їх розщеплення, що супроводжується зникненням присмаків і запахів. Таким чином відбувається нейтралізація речовин шляхом свого роду «холодного спалювання».

Наприклад, при окисленні сірководню спостерігається виділення сірки:



Завдяки більш високій окисній здатності, озон в змозі діяти на такі сполуки, які не піддаються впливу інших хімічних реагентів. Обробка води надмірною кількістю озону не тягне за собою ніяких небажаних явищ: надмірний озон, будучи нестійким, знову перетворюється в кисень протягом декількох хвилин. Озонування не створює додаткових або змішуючих з'єднань, тоді як хлор дає з деякими речовинами складні сполуки, що викликають появу досить різких запахів. Наприклад, при обробці хлором води, що містить домішки фенолів, утворюється хлорфенол, що має вельми неприємний присмак і запах. Нарешті, при обробці озоном вода насичується киснем, що призводить до ефекту джерельної води.

Розглянемо принципову технологічну схему установки для комплексного очищення питної води. В даній установці реалізована традиційна схема очищення води озонуванням і фільтруванням. Схема установки показана на рис. 20.9.

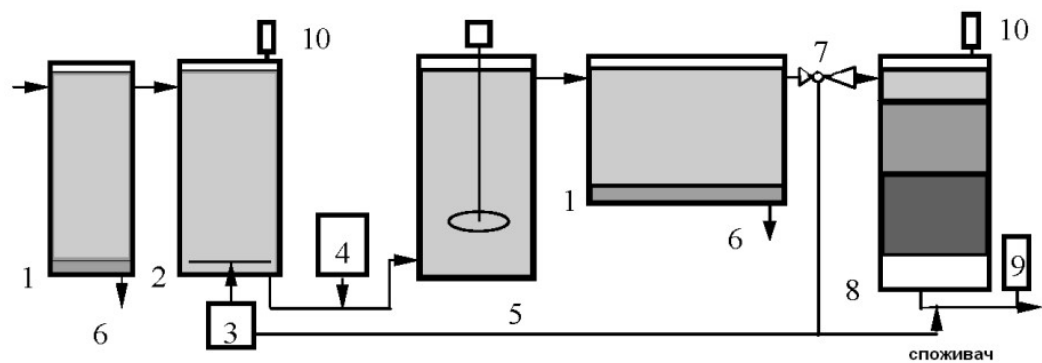


Рис. 20.9 – Схема підготовки питної води, де 1 – відстійник; 2 – контактний апарат; 3 – генератор озону; 4 – коагулянт; 5 – камера змішування; 6 – видалення відстою; 7 – ежектор; 8 – фільтр; 9 – консервант; 10 – деструктор озону

Перед надходженням в установку з води, що забирається у водоймі, спочатку вхідним фільтром грубого очищення, а потім у відстійнику 1 видаляються механічні домішки. Далі вода надходить на обробку реагентами. Зазвичай використовується схема з перед- та постозонуванням.

Передозонування води здійснюється після видалення механічних домішок і виконується в контактному апараті 2. Озон в контактний апарат надходить від генератора озону 3.

Передозонування має на меті проведення первинного знезараження води, видалення кольоровості, окислення і переведення в колоїдний стан розчинених металів. Одночасно озонування води сприяє реалізації процесу флокуляції (явище слабого пластоутворення – колоїдальної каламутності вод). Нерозчинні речовини, які утворилися, видаляються з води відстоюванням в спеціальних апаратах – відстійниках 1. Часто для посилення процесу флокуляції після передозонування в воду додають спеціальні речовини – коагулянти 4, які сприяють процесу злиття частинок у великі агломерати і більш швидкого випадання їх в осад. До таких речовин відносяться сульфат алюмінію і хлорне залізо. Для поліпшення змішування коагулянтів з водою в камерах змішування 5 здійснюють інтенсивне перемішування води і коагулянту. Після відстійника вода з рештою забруднень, що залишилися в ній, піддається повторному озонуванню, метою якого є проведення проміжної дезінфекції та окислення органічних речовин.

У нашому прикладі введення озону в воду здійснюється за допомогою ежектора 7. Вода з розщепленими органічними речовинами надходить у фільтр 8, який може бути або комбінованим з піщаним та вугільним завантаженням, або складається з двох фільтрів, завантажених відповідно піском і активованим вугіллям.

Встановлено, що комбіноване очищення «озонування-фільтрація на активованих вугіллях» дозволяє ефективніше використовувати сорбційне завантаження фільтрів. Причиною є насичення води киснем при її озонуванні, що створює сприятливі умови для життєдіяльності бактерій в товщі вугільного завантаження, які забезпечують біологічне окислення забруднень в порах завантаження і таким чином збільшують термін використання активованого вугілля до його регенерації. Після фільтрації вода піддається озонуванню для остаточної дезінфекції та надання необхідних смакових якостей. Як змішувальні пристрої тут використовуються контактна камера або комбінація з ежектора і турбулізатора (на рис. 20.10 не показані). На виході до споживача вода консервується з

додаванням незначної кількості хлору 9, що перешкоджає розвитку бактерій у воді при її транспортуванні по трубопроводу.

**Підготовка води в плавальних басейнах.** Вимоги, що пред'являються до води в плавальних басейнах, аналогічні вимогам до питної води. У зв'язку з цим ідентичні і основні стадії обробки води: видалення домішок фільтром грубої очистки, озонування води в контактній камері, видалення суспензій, утворених у воді, піщаними і сорбційними фільтрами, консервація води хлором з дозуванням  $C_{cl} = 0,05 \div 0,1$  мг/л. Однак на відміну від попереднього випадку вода рухається по замкнутому циклу з додаванням лише 10 % свіжої води.

**Обробка стічних вод.** Механізм впливу озону на забруднення природних і стічних вод ідентичний: це – молекулярне окислення і атака активними радикалами. В значній мірі механізм окислення обумовлений дипольною молекулою озону, яка фіксується на заряджених частинках і розриває подвійні зв'язку з утворенням окислених форм. Полярний характер молекули дозволяє також використовувати озон в процесі каталітичного окислення спільно з  $Al_2O_3$ ,  $Fe_2O_3$ , ультразвуком, ультрафіолетовим випромінюванням.

Ступінь забруднення стічних вод часто характеризують показниками «хімічного поглинання кисню (ХПК)» і «біологічного поглинання кисню (БПК)», які показують яку кількість кисню в мг йде на окислення домішок в 1 л води.

При високих концентраціях забруднювачів, що призводять до значного споживання озону, для зниження концентрації речовин, що видаляються за допомогою озону, в початок циклу (рис. 20.10) після аерації ставиться система біологічної очистки води з використанням мікроорганізмів: бактерій, цвілевих грибів, дріжджів та ін. У цьому випадку якщо на вході БПК і ХПК  $\sim 1000$ , після аеротена  $\sim 500$ , після біофільтра  $\sim 30 \div 50$ , то після озонування  $\sim 5$ . Таким чином, озон використовується на виході очисної системи для доведення води до необхідної кондиції.

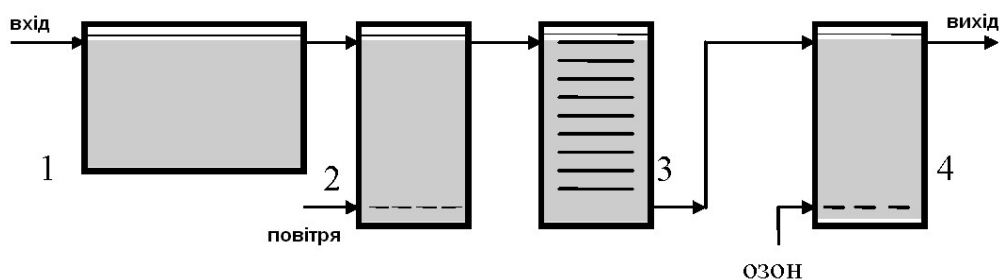


Рис. 20.10 – Біологічне очищення стічних вод з використанням озону, де 1 – відстійник; 2 – аеротен; 3 – біофільтр, 4 – контактний апарат

**Медичні технології.** Застосування озону для профілактики і лікування захворювань засновано на широкому спектрі терапевтичного впливу різних доз озону на організм. Озон діє як імуномодулюючий, протизапальний, бактерицидний, противірусний, фунгіцидний, цитостатичний, антистресовий, анальгезуючий засіб.

Озонотерапія ефективно використовується в наступних випадках: хвороби верхніх дихальних шляхів і легеневі захворювання, інфекційні хвороби (для інактивації вірусів, бактерій, лікування гепатитів), в хірургії (виразки, пролежні, гангрени, опіки), в шкірно-венерологічній практиці (екземи, дерматити), в онкології, в фізіотерапії та курортології, зуболікарській практиці, а також у гігієні та санітарії. У багатьох випадках терапевтичний

вплив озону ґрунтується на більш легкому його проникненні в хворі клітини, ніж у здорові.

Озон застосовується як при низьких концентраціях в газі (на рівні ГДК), наприклад, при лікуванні легень і верхніх дихальних шляхів, так і при високих концентраціях, наприклад, для розчинення озону у фізіологічному розчині і в дистильованій воді, або при здійсненні обробки озоном крові хворих (аутогемотерапія).

Для стерилізації медичного інструменту також застосовується вода з розчиненим у ній озоном.

У медичних установках має важливе значення висока концентрація озону в газі для прискорення процесу насичення рідини. В якості змішувача використовується барботажна камера.

**Очищення газів, що відходять.** Повітряні викиди не такі різноманітні за складом як стічні води. Вони містять майже завжди окис азоту і сірки, сірководень, летючу органіку. У ряді випадків спостерігаються викиди фтору, окису ванадію і синильної кислоти.

У зв'язку з тим, що озон реагує в рідкому середовищі набагато швидше, ніж в газовому і, крім того, в цьому випадку легше управляти процесом окислення, то практично завжди очистку повітряних викидів виконують пропусканням останніх через спеціальні поглинальні розчини, використовуючи для цієї мети поглинальні колони або інші аналогічні пристрої.

**Застосування озону в сільському господарстві.** Широкий спектр областей застосування озону в сільському господарстві: рослинництво, тваринництво, рибориство, кормо-виробництво і зберігання продуктів, зумовлює безліч озонових технологій, які умовно можна розділити на два великих напрямки. Перше має на меті стимулювати життєдіяльність живих організмів. З цією метою застосовуються концентрації озону на рівні ГДК, наприклад санація приміщень з тваринами і рослинами для поліпшення комфортності їх перебування. Другий напрям пов'язаний з придушенням життєдіяльності шкідливих організмів або з усуненням шкідливих забруднень з навколишньої атмосфери та гідросфери. Концентрації озону в цьому випадку набагато перевищують значення ГДК. До таких технологій відносяться дезінфекція тари і приміщень, очищення газових викидів птахоферм, свинарників, знешкодження стічних вод сільськогосподарських підприємств і т.д.

#### **Завдання на самостійне опрацювання та підготовку**

1. Самостійно відновити матеріал по основним поняттям та визначенням;
2. Самостійно опрацювати матеріал з опису: Технології, засновані на використанні нерівноважної плазми газового електричного розряду.

### **ТЕМА № 21. ЕНЕРГОЕФЕКТИВНІСТЬ СИТЕМ ТА КОМПЛЕКСІВ**

Мета: ознайомити здобувачів початкового рівня вищої освіти з підготовкою в галузі побудови енергоефективних систем та комплексів споживачів електроенергії на підприємствах

21.1. Нормативна документація в галузі енергозбереження і енергоефективності Закон України «Про енергозбереження», ДСТУ2155-93 «Енергозбереження»;

21.2. Обґрунтування та оцінка енергоефективності електротехнічних систем та комплексів;

21.3. Енергетичні характеристики електромеханічних систем підприємств.

Хід проведення лекційного заняття

I. Організація групи;

II. Мотивація навчальної діяльності. Оголошення теми й мети;

III. Викладення та обговорення нового матеріалу.

IV. Оголошення завдання на самостійне опрацювання та підготовку.

### **21.1. Нормативна документація в галузі енергозбереження і енергоефективності Закон України «Про енергозбереження», ДСТУ2155-93 «Енергозбереження»**

Цей Закон визначає правові, економічні, соціальні та екологічні основи енергозбереження для всіх підприємств, об'єднань та організацій, розташованих на території України, а також для громадян.

У цьому Законі вживаються такі поняття:

"енергозбереження"— діяльність (організаційна, наукова, практична, інформаційна), яка спрямована на раціональне використання та економне витрачання первинної та перетвореної енергії і природних енергетичних ресурсів в національному господарстві і яка реалізується з використанням технічних, економічних та правових методів;

"енергозберігаюча політика" — адміністративно-правове і фінансово-економічне регулювання процесів видобування, переробки, транспортування, зберігання, виробництва, розподілу та використання паливноенергетичних ресурсів з метою їх раціонального використання та економного витрачання;

"паливно-енергетичні ресурси" — сукупність всіх природних і перетворених видів палива та енергії, які використовуються в національному господарстві;

"раціональне використання паливно-енергетичних ресурсів" — досягнення максимальної ефективності використання паливно-енергетичних ресурсів при існуючому рівні розвитку техніки та технології і одночасному зниженні техногенного впливу на навколишнє природне середовище;

"економія паливно-енергетичних ресурсів" — відносне скорочення витрат паливноенергетичних ресурсів, що виявляється у зниженні їх питомих витрат на виробництво продукції, виконання робіт і надання послуг встановленої якості;

"енергоефективні продукція, технологія, обладнання" — продукція або метод, засіб її виробництва, що забезпечують раціональне використання паливно-енергетичних ресурсів порівняно з іншими варіантами використання або виробництва продукції однакового споживчого рівня чи з аналогічними техніко-економічними показниками;

"енергозберігаючі (енергоефективні) заходи" — заходи, спрямовані на впровадження та виробництво енергоефективних продукції, технологій та обладнання;

"норми питомих витрат палива та енергії" — регламентована величина питомих витрат паливно-енергетичних ресурсів для даного виробництва, процесу, даної продукції,



роботи, послуги; (Преамбулу доповнено абзацом згідно із Законом N 3260-IV (3260-15) від 22.12.2005) прямі втрати паливно-енергетичних ресурсів — втрата паливно-енергетичних ресурсів поза технологічними процесами (вид нераціонального використання паливно-енергетичних ресурсів);

"марнотратне витрачання паливно-енергетичних ресурсів" — систематичне, без виробничої потреби, не зумовлене вимогами технічної безпеки недовантаження або використання на холостому ходу електродвигунів, електропечей та іншого електрої теплоустаткування; систематична втрата стисненого повітря, води і тепла, спричинена несправністю арматури, трубопроводів, теплоізоляції трубопроводів, печей і тепловикористовуючого устаткування; недотримання вимог нормативної та проектної документації щодо теплоізоляції споруд та інженерних об'єктів, яке призводить до зниження теплового опору огорожувальних конструкцій, вікон, дверей в опалювальний сезон (вид нераціонального використання паливноенергетичних ресурсів);

"нераціональне (неефективне) використання паливноенергетичних ресурсів" — прямі втрати паливно-енергетичних ресурсів, їх марнотратне витрачання та використання паливно-енергетичних ресурсів понад показники питомих витрат, визначених системою стандартів, а до введення в дію системи стандартів — нормами питомих витрат палива та енергії;

"вторинні енергетичні ресурси" — енергетичний потенціал продукції, відходів, побічних і проміжних продуктів, який утворюється в технологічних агрегатах (установках, процесах) і не використовується в самому агрегаті, але може бути частково або повністю використаний для енергопостачання інших агрегатів (процесів);

"нетрадиційні та поновлювані джерела енергії" — джерела, що постійно існують або періодично з'являються в навколишньому природному середовищі у вигляді потоків енергії Сонця, вітру, тепла Землі, енергії морів, океанів, річок, біомаси.

Метою законодавства про енергозбереження є регулювання відносин між господарськими суб'єктами, а також між державою і юридичними та фізичними особами у сфері енергозбереження, пов'язаної з видобуванням, переробкою, транспортуванням, зберіганням, виробленням та використанням паливноенергетичних ресурсів, забезпечення заінтересованості підприємств, організацій та громадян в енергозбереженні, впровадженні енергозберігаючих технологій, розробці і виробництві менш енергоємних машин та технологічного обладнання, закріплення відповідальності юридичних і фізичних осіб у сфері енергозбереження.

Основними принципами державної політики у сфері енергозбереження є:

а) створення державою економічних і правових умов заінтересованості в енергозбереженні юридичних та фізичних осіб;

б) здійснення державного регулювання діяльності у сфері енергозбереження на основі застосування економічних, нормативотехнічних заходів управління;

в) пріоритетність вимог енергозбереження при здійсненні господарської, управлінської або іншої діяльності, пов'язаної з видобуванням, переробкою, транспортуванням, зберіганням, виробленням та використанням паливно-енергетичних ресурсів;

г) наукове обґрунтування стандартизації у сфері енергозбереження та нормування використання паливноенергетичних ресурсів, необхідність дотримання енергетичних стандартів та нормативів при використанні палива та енергії;

д) створення енергозберігаючої структури матеріального виробництва на основі комплексного вирішення питань економії та енергозбереження з урахуванням екологічних вимог, широкого впровадження новітніх енергозберігаючих технологій;

е) обов'язковість державної експертизи з енергозбереження;

є) популяризація економічних, екологічних та соціальних переваг енергозбереження, підвищення громадського освітнього рівня у цій сфері;

ж) поєднання методів економічного стимулювання та фінансової відповідальності з метою раціонального використання та економного витрачання паливно-енергетичних ресурсів;

з) встановлення плати за прямі втрати і нераціональне використання паливно-енергетичних ресурсів; и) вирішення проблем енергозбереження у поєднанні з реалізацією енергетичної програми України, а також на основі широкого міждержавного співробітництва;

і) стимулювання раціонального використання паливно-енергетичних ресурсів шляхом комбінованого виробництва електричної та теплової енергії (когенерації);

ї) поступовий перехід до масового застосування приладів обліку та регулювання споживання паливно-енергетичних ресурсів;

й) обов'язковість визначення постачальниками і споживачами обсягу відпущених паливноенергетичних ресурсів за показаннями приладів обліку споживання паливноенергетичних ресурсів у разі їх наявності;

к) запровадження системи енергетичного маркування електрообладнання побутового призначення.

Об'єктами правового регулювання законодавства про енергозбереження є відносини у сфері функціонування енергетичного господарства України, проектування, створення та впровадження наукових та конструкторських розробок, пов'язаних з підвищенням ефективності використання палива та енергії, інформаційного забезпечення народного господарства та населення з проблем енергозбереження, а також у сфері управління та контролю за використанням паливно-енергетичних ресурсів.

## **21.2. Обґрунтування та оцінка енергоефективності електротехнічних систем та комплексів**

Під енергоефективністю електротехнічних комплексів і систем електропостачання в загальному випадку розуміється раціональне і ефективне використання потужності, споживаної від джерел електроенергії, щоб зберегти установки якості мережі, яка живить промислові і побутові споживачі.

При реалізації енергетичної політики слід розрізняти економію ПЕР, що виникає внаслідок «природного» удосконалення технологічних процесів та підвищення свідомості суспільства, і ту, яка виникає внаслідок цілеспрямованої діяльності державних органів управління, зокрема завдяки цільовим інвестиціям та іншим системним економічним заходам (імпортні та експортні митні бар'єри, податкові пільги і т.п.).

*Енергозбереження* – впровадження правових, організаційних, наукових, виробничих, технічних і економічних заходів спрямованих на зменшення споживання електричної енергії споживачами і на збільшення частки енергії, що споживається від відновлювальних джерел енергії.

**Енергоефективність** – раціональне використання енергії, що дозволяє перетворювати її параметри і транспортувати до споживача з мінімальними втратами.

**Умовне паливо** – одиниця вимірювання енергоємності органічного палива (нафти, газу, вугілля), яку використовують для порівняння різних видів палива. В якості умовного палива в більшості країн СНД використовують енергетичний еквівалент від спалювання 1 кг кам'яного вугілля, який дорівнює 29,3 МДж або 8,14 кВт·год. Міжнародним енергетичним агентством (IEA) за одиницю умовного палива прийнято енергетичний еквівалент від спалювання 1 тонни нафти, який дорівнює 41,87 ГДж або 11,63 МВт·год.

**Відновлювальні джерела енергії** – джерела енергії природного походження запаси яких поновлюються з часом.

**Відновлювана енергетика** – енергетична галузь, що спеціалізується на отриманні та використанні енергії з відновлюваних джерел енергії.

**Зелений тариф** – економічний механізм, спрямований на заохочення генерації електроенергії відновлюваною енергетикою.

**Киотський протокол** – міжнародна угода про обмеження викидів в атмосферу парникових газів. Головна мета угоди: стабілізувати рівень концентрації парникових газів в атмосфері на рівні, який не допускав би небезпечного антропогенного впливу на кліматичну систему планети.

**Енергетична хартія** – міжнародна угода, спрямована на подолання економічного розділення європейського континенту. Договір до Енергетичної Хартії грає важливу роль в контексті зусиль зі створення правового поля для глобальної енергетичної безпеки, на основі відкритих, конкурентних ринків і принципів стійкого розвитку.

Індустріалізація світової економіки призвела до стрімкого збільшення споживання енергетичних ресурсів протягом останніх 100-150 років. Оскільки в структурі споживання енергетичних ресурсів найбільшу частку займають викопні джерела енергії: нафта, газ, вугілля – це призводить до їх швидкого вичерпування та поступового зростання ціни на ці енергоносії. В зв'язку з цим стало зрозуміло, що для стабільного економічного розвитку необхідно вживати заходи щодо раціонального використання енергії. Тому в більшості розвинених країн впровадження енергозберігаючих і енергоефективних (ЕЕ) технологій фінансують з державного бюджету.

Основні заходи для підвищення ЕЕ:

1. Технічні:

- використання пристроїв та устаткування з малим споживанням енергії;
- використання енергоефективних технологій для генерування та транспортуванні енергії;
- теплоізоляція будівель;
- заміна викопних джерел енергії на відновлювальні.

2. Економічні:

- введення денного і нічного тарифів;
- оплата енергії, що виробляється відновлювальними джерелами енергії за «зеленим» тарифом;
- введення прогресивної тарифікації (більше споживаш – більше сплачуєш);
- державні дотації на впровадження енергоефективних технологій.

3. Організаційні:

- встановлення лічильників;
- використання зимового і літнього часу;

- економія електроенергії.

#### 4. Правові:

- ратифікація міжнародних угод і конвенцій в галузі енергозбереження;

- розробка і впровадження національних програм з енергозбереження.

Ефект від заходів з ЕЕ:

- заощадження енергії;

- зменшення викидів шкідливих речовин;

- зменшення витрат на впровадження нових енергопотужностей.

### **21.3. Енергетичні характеристики електромеханічних систем підприємств**

#### 1. Поняття енергетичного балансу підприємства.

Енергетичний баланс підприємства – це система показників, що відображають кількісну відповідність між надходженнями та витратами всіх видів енергетичних ресурсів на промислових енергетичних об'єктах. Основні положення, щодо енергетичного балансу підприємства відображені в ДСТУ 28-04-94 "Енергетичний баланс промислового підприємства. Загальні положення, терміни та визначення".

Виділяють наступні види енергетичних балансів:

Оптимальний енергетичний баланс – баланс, що складається для визначення енергопостачання об'єкта, за яким вироблення продукції можна здійснити з мінімальними витратами, при встановлених оптимальних режимах обладнання, виборі найекономічнішого енергетичного ресурсу, встановлених економічних режимах роботи генеруючих установок;

Фактичний енергетичний баланс – баланс, що відображає реальний стан використання енергетичних ресурсів, всі виправданні та не виправдані втрати.

Енергетичний баланс в робочій формі – баланс у витратній частині якого зображається розподіл енергоресурсів, що виробляються чи надходять з інших джерел, за виробничо – територіальною та цільовою ознакою, без розподілу їх витрати на корисну складову та втрати.

Частковий енергетичний баланс – баланс, що складається для окремих видів палива, енергії чи енергетичних носіїв. Він складається в грошовій, натуральній формах, або у відсотках.

Зведений баланс – баланс, що складається із часткових балансів.

Баланс витрат на енергетичні ресурси – енергетичний баланс в грошовій формі.

Існують 3 форми складання енергетичного балансу:

Експериментальний – ґрунтується на проведенні випробувань електроустановок, замірах по обліку використання енергетичних ресурсів.

Розрахунковий – баланс, що складається на підставі фізико-хімічних функцій та залежностей.

Розрахунково – експериментальний – поєднує в собі два попередні.

Ведення аналізу енергетичного балансу – процедура, що полягає у визначенні основних споживачів енергетичних ресурсів для вироблення пріоритетних напрямків в області енергозбереження.

Виділяють прибуткову і витратну частини енергетичного балансу.

Прибуткова – характеризує структуру видобутку і виробництва всіх видів енергетичних ресурсів і енергії, надходжень їх з боку і перехідні залишки. Видаткова

характеризує структуру і напрями використання всіх видів енергії, включаючи втрати, відпуски на сторону і перехідні залишки.

Слід зазначити, що втрати неминучі в будь-якому виробництві.

Дані енергобалансу служать основою для розрахунку ряду показників. Так, відношення енергії, одержаної від електроцентралей і енергосистем, до всієї кількості енергії, спожитої на підприємстві (коефіцієнт централізації електропостачання), показує, яка частина спожитої електричної енергії вироблена на спеціалізованих енергетичних підприємствах, де вона виробляється з якнайменшими витратами.

## 2. Аналіз енергетичного балансу підприємства.

Ефективним напрямом дослідження енергетичних балансів є метод, заснований на розрахунку коефіцієнтів корисної дії (ККД) окремих енергоносіїв і всього енергетичного господарства підприємства. Розрахунок ККД проводиться за даними витратної частини балансу, складеного по цільових витратах палива і енергії.

Наступний напрям аналізу енергетичного балансу промислового підприємства полягає у визначенні зв'язку енергетики з основними показниками господарської діяльності і оцінці взаємного впливу енергетики і економіки виробництва. Цей напрям аналізу передбачає розрахунок узагальнених енергоекономічних характеристик підприємства, з яких найважливішими є: електро- і енергоозброєність праці; енерго-, електро- і теплоємність продукції; енерго-, електро- і теплозабезпеченість основних виробничих фондів; теплоелектричний і електропаливний коефіцієнти.

Електробаланс відображає відповідність надходжень та витрат в частині використання електричної енергії. Він використовується для організації робіт з економії електроенергії, необхідно знати її розподіл як по підприємству так і по окремим технологіям та агрегатам.

Електробаланс дозволяє виявити втрати та оцінити ефективність того чи іншого заходу з економії електроенергії. Всякий електробаланс складається з двох частин: приходної та витратної. В приходній частині електробаланса вказується електроенергія або потужність (активна і реактивна), що надходить від енергопостачальної організації. У витратній частині вказуються корисні (технологічно необхідні) витрати електроенергії і втрати електроенергії.

В залежності від галузі промисловості, специфіки технології та обладнання відношення окремих статей витратної частини електробалансу до його приходної змінюється, що дозволяє акцентувати увагу енергоменеджерів на необхідності реалізації енергозберігаючих заходів для зниження за окремими статтями витратної частини електробалансу.

Наступний напрям аналізу енергетичного балансу промислового підприємства полягає у визначенні зв'язку енергетики з основними показниками господарської діяльності і оцінці взаємного впливу енергетики і економіки виробництва. Цей напрям аналізу передбачає розрахунок узагальнених енергоекономічних характеристик підприємства, з яких найважливішими є: електро- і енергоозброєність праці; енерго-, електро- і теплоємність продукції; енерго-, електро- і теплозабезпеченість основних виробничих фондів; теплоелектричний і електропаливний коефіцієнти і ряд інших показників.

Завданням складання електробалансу є: виявлення і надходження витрат електроенергії по статтям, щоб чітко виділити витрати електроенергії на основну

продукцію підприємства; визначення дійсних питомих витрат електроенергії на одиницю продукції підприємства; виявлення можливостей економії електроенергії.

### 3. Система освітлення.

Хоча в загальному споживанні енергії в промисловості частка освітлення невисока, проекти по установці ефективної системи освітлення все-таки мають високу економічну ефективність. Найчастіше на даному промисловому підприємстві використовуються лампи розжарювання і ртутні лампи. Вони не є найефективнішими. Заміна на флуоресцентне освітлення або натрієві лампи звичайно має строк окупності менш 5 років при існуючих в Україні тарифах на електроенергію. За рахунок установки енергоефективних ламп можна одержати й інші дуже важливі вигоди: такі лампи знижують витрати на експлуатацію і технічне обслуговування, тому що вони служать довше, ніж традиційні лампи, і з їх допомогою можна підвищити безпеку на робочому місці за рахунок забезпечення кращого освітлення при споживанні меншої кількості енергії. Установка ефективної системи освітлення може також свідчити про те, що підприємство зацікавлене у впровадженні програми енергоефективності в цілому і готове до цього. З психологічної точки зору це треба розглядати як позитивний фактор для впровадження програми підвищення енергоефективності на підприємстві. Першим кроком до підготовки модернізації системи освітлення є оцінка потреби у освітленні. Кількість світла вимірюється в люменах або в люксах. Суспільство інженерів-світлотехніків, наприклад, рекомендує для внутрішнього освітлення виробничих приміщень рівень освітленості 500-10000 люкс, а для зовнішнього – 10-300 люкс.

Технологія освітлення лампами розжарювання є найбільш старою і самою неефективною. Вартість ламп розжарювання невисока, але втрати протягом усього періоду служби не конкурентноздатні в порівнянні з флуоресцентними лампами. Застосування флуоресцентних ламп у промисловості є гарним енергозберігаючим заходом для внутрішнього освітлення. При зовнішній освітленні ртутні лампи можуть бути замінені натрієвими лампами високого або низького тиску. Натрієві лампи низького тиску є найбільш ефективними серед інтенсивних газорозрядних ламп (до таких ламп відносять ртутні лампи, металогалогенні і натрієві лампи високого тиску). Однак натрієві лампи низького тиску забезпечують недостатню передачу кольору. Натрієві лампи високого тиску є проміжним варіантом: вони більш ефективні в порівнянні з ртутними лампами, але на 60 % менш ефективні, чим натрієві лампи низького тиску. Рівень інтенсивності освітлення натрієвими лампами високого тиску не є найвищим, але інтенсивність освітлення цими лампами вище, ніж натрієвими лампами низького тиску. Приймаючи рішення про вибір системи освітлення, необхідно належну увагу приділити баластам, оскільки вони мають безпосередній вплив на інтенсивність освітлення (і, зрозуміло, на його ефективність). Усі системи освітлення, крім ламп розжарювання, вимагають використання баластів. Існує два типи баластів для систем освітлення флуоресцентними лампами: магнітні й електронні. Останні є найбільш ефективними. Лампи з високоінтенсивним розрядом також вимагають застосування баластів, але з меншою кількістю варіантів вибору. Для того щоб одержати точні результати при оцінці витрат і вигод проекту по впровадженню систем освітлення, дуже важливо врахувати вартість як баласту, так і додаткової електричної енергії, що споживається ним.

Крім заміни системи освітлення, існує ряд інших енергозберігаючих заходів. Вимикання світла при відсутності необхідності в ньому – найпростіше рішення проблеми енергозбереження. Системи автоматичного регулювання можуть бути встановлені з

метою відключення системи освітлення при відсутності в приміщенні працівників. Використання місцевого освітлення також забезпечує економію енергії. Сконцентрувавши світло на робоче місце (звичайно, установивши систему освітлення якнайближче до робочого місця). Регулярне технічне обслуговування може підвищити рівень продуктивності і збільшити інтенсивність освітлення при мінімальних витратах. Арматура люмінесцентних ламп також може бути модернізована при використанні рефлекторів для підвищення ефективного використання освітлення.

#### 4. Модернізація електродвигунів і електроприводів.

Навряд чи знайдеться промисловий процес, де б не використовувалися електродвигуни. Вони пускають у хід багато видів устаткування, у тому числі насоси, вентилятори, повітродувки, конвеєри, млини. Оскільки двигуни широко використовуються у виробничому процесі, вони споживають значну кількість електричної енергії і можуть стати привабливим об'єктом з погляду інвестування в енергозберігаючі заходи. Цілеспрямований і систематичний збір даних по кожному двигуні, що функціонує більш 2000 годин у рік, являється початковим етапом підвищення ефективності використання двигунів на підприємстві. При обліку даних про двигуни особливу увагу слід звернути на місце розташування двигунів, призначення, частоту обертання, навантаження, паспортні дані. Відразу ж після огляду цього устаткування можна впровадити деякі заходи щодо підвищення ефективності електродвигунів на підприємстві.

Правильний вибір потужності електродвигуна дозволить скоротити споживання енергії. Найчастіше двигуни мають надмірну потужність, щоб при необхідності можна було б справитися зі значним перенавантаженням. Правильно підібрані електродвигуни повинні працювати при навантаженні 75-100 % від їхньої паспортної потужності. До того ж електродвигуни більшої потужності коштують дорожче, ніж електродвигуни меншої потужності. Зростають також витрати, оскільки електродвигуни працюють з максимальною ефективністю при навантаженні, близьким до повного.

Одна з можливостей енергозбереження – установка електродвигунів з частотно-керованим електроприводом. Вони застосовуються у випадках, коли навантаження електродвигуна коливається і він тривалий час працює з низьким навантаженням. Визначення графіка навантаження електродвигуна (відсоток навантаження від часу) має важливе значення при оцінці економічної ефективності: звичайно вигідно застосовувати частотно-керовані електроприводи для двигунів потужністю більш 10 кВт, що працюють більш 8000 годин у рік. Частотно-керовані електроприводи приводять споживання електроенергії у відповідність з рівнем навантаження, змінюючи частоту обертання електродвигуна. Застосування частотно-керованих електроприводів ефективно для вентиляторів, насосів і устаткування, частота обертання якого не є критичною. Електроприводи даного типу можуть сприяти підвищенню якості продукції, за рахунок контролю і зниження вартості технічного обслуговування.

Натяжка і регулювання пасових передач також підвищує енергоефективність. Необхідно систематично здійснювати контроль стану пасових передач. Ослаблення ременів і розрегулювання ременних приводів приводять до збільшення втрат на тертя. Це викликає додаткове споживання електричної енергії і скорочує термін служби ременного приводу. Ремінні приводи мають низьку вартість, але для ефективного функціонування існує постійна необхідність у їхньому технічному обслуговуванні. Навчання персоналу, відповідального за керування системами електродвигунів, допоможе підвищити рівень технічного обслуговування.

Заміна стандартних клинчастих ременів високоефективними ременями підвищить загальну ефективність електропроводу при більш низьких витратах у порівнянні з вартістю нового двигуна з більш високим КПД. Клинчасті ремені з зубцями і синхронні ремені більш ефективні, чим стандартні клинчасті. Високоефективні електродвигуни (з підвищеним коефіцієнтом корисної дії) також можуть скоротити витрати на енергоресурси. КПД електродвигунів визначається як відсоток електричної енергії, перетвореної в механічну енергію.

Виходячи з діючих сьогодні тарифів на електричну енергію і щодо високих капітальних витрат, необхідних для модернізації електродвигунів, замінити функціонуючі двигуни новими більш ефективними в більшості випадків не має змісту. Однак періодично на підприємствах електродвигуни все-таки приходиться замінити (до 10 % у рік). Придбання високоефективних електродвигунів для заміни старих може мати високу економічну ефективність. Часто економічно ефективною є заміна двигуна на двигуни з великим КПД, якщо КПД приводу не можна змінити в іншому місці. Коефіцієнт потужності показує, наскільки ефективно пристрій перетворить вхідну напругу і струм у корисну електричну потужність.

5. Звітність за пророблену роботу у напрямі впровадження енергозберігаючих заходів.

Кожен звітний період управління головного енергетика складає відомості про виконані на підприємстві енергозберігаючі заходи. Тут наведений приклад такого звіту, який містить у собі інформацію про енергозберігаючі заходи, місце їх впровадження та кількісні характеристики ефективності їх роботи, тобто економія по різних показниках. Необхідність такої звітності полягає в можливості оцінки ефективності проведених заходів задля планування втілення подібних у суміжних виробництвах. Або, наприклад, при проведенні поетапного втілення проекту з енергозбереження на певному підприємстві – також потрібно складання таких відомостей, які являють собою частину проекту, бо містять інформацію про отриману економію в фінансовому та енергетичному еквівалентах.

#### **Завдання на самостійне опрацювання та підготовку**

1. Самостійно відновити матеріал по основним поняттям та визначенням;
2. Самостійно опрацювати матеріал з опису енергозбереження в цивільних спорудах.



## РЕКОМЕНДАЦІЇ ЩОДО НАПИСАННЯ КОНСПЕКТУ ЛЕКЦІЇ ТА ПІДГОТОВКИ ДО ЛЕКЦІЙНИХ ЗАНЯТЬ

Конспект - найбільш розгорнута форма запису. Він обов'язково має відповідати планові тексту. Тому спочатку складають план, а потім, з опорою на цей план, - конспект. Важливий прийом конспектування - змістове «згортання» тексту, тобто його скорочення з обов'язковим зазначенням основних думок. Запорука успішності такого «згортання» - сформоване вміння переформулювати думки «своїми словами». План, тези та конспект можуть бути цитатні, вільні або змішані.

Цінність конспекту полягає в тому, що він сприяє кращому запам'ятовуванню прочитаного, дає можливість швидко встановити в пам'яті вивчене, узагальнити нагромаджений матеріал.

Здобувачу вищої освіти під час підготовки до написання конспекту необхідно:

- проаналізувати тему, подумати над його дидактичними цілями й основними проблемами, які винесені на обговорення;
- опрацювати рекомендовану навчальну, наукову та методичну літературу;
- намагатися сформулювати власну думку з кожного питання й обґрунтувати свої міркування оформивши план;
- записати запитання, які виникли під час підготовки, можна звернутися за консультацією до викладача;
- скласти розгорнутий план-конспект лекції, ретельно обдумуючи етапи, структурні елементи, навчальні питання, що виносять на розгляд.

Пошук інформації нерідко буває трудомісткий не тільки через величезну кількість літератури, але й через розкиданість даних, тобто публікацію статей певної тематики у непрофільних джерелах. Найпоширеніший спосіб пошуку інформації – у мережі Інтернет. Для цього використовують пошукові системи загального (наприклад, Google). Слід пам'ятати, що ефективність пошуку залежить від того, наскільки правильно сформульований запит і набрані ключові слова.

У всіх пошукових системах існує так званий «розширений пошук» із розгалуженою логікою запитів. Можна шукати ключові слова лише в певних частинах тексту (наприклад, заголовку), шукати точну фразу, використовувати оператори «І», «ЧИ», відкидати сторінки з певними словами, шукати лише огляди літератури тощо.

## СПИСОК ВИКОРИСТАНОЇ ЛІТЕРАТУРИ

1. Бржезицький В. О., Гаран Я. О., Троценко Є. О. Електротехнологічні установки та системи: Практикум. Київ : КПІ ім. Ігоря Сікорського, 2020. 41 с.
2. Варфоломійєв І., Непом'ящий Д., Мардзявко В. Конструкторська розробка електротехнологічного вузла установки очищення стічних вод. *Технічні науки в Україні: сучасні тенденції розвитку* : матеріали ІІ Всеукр. науково-техн. інтернет-конф., м. Київ, 21 листоп. 2020 р. 2020. С. 128–130.
3. Діагностика, захист і моніторинг електромеханічних систем: загальні положення. / КНУБА. URL: <https://org2.knuba.edu.ua/mod/book/view.php?id=36013> (дата звернення: 20.11.2022).
4. Мардзявко В. Автоматизація виробництва в елеваторному комплексі як шлях зменшення виробничих та енергетичних втрат. *Стратегія інтеграції аграрної освіти, науки, виробництва: глобальні виклики продовольчої безпеки та змін клімату* : доп. учасників міжнар. науково-практ. конф. Міжнар. форуму, м. Миколаїв, 28 трав. 2022 р. Миколаїв, 2021.
5. Мардзявко В. Аналіз організації керування обладнанням для забезпечення транспортування зернової продукції на елеваторах. *Інженерія природокористування*. 2020. Т. 4, № 18. С. 35–41.
6. Павленко Т. П., Петренко О. М., Лукашова Н. П. Електротехнологічні установки : конспект лекцій для магістрів усіх форм навчання. Харків : ХНУМГ ім. О. М. Бекет., 2018. 130 с.
7. Сабалаєва Н. О., Форкун Я. Б. Електротехніка та електропостачання : конспект лекцій. Харків : ХНУМГ ім. О. М. Бекет., 2019. 128 с.
8. Синявський О., Савченко П., Савченко В. Електропривід і автоматизація: навчальний посібник. Київ, 2018. 604 с.
9. Тимчук С. О., Сиротенко М. О., Мардзявко В. Підвищення ефективності технологічного процесу елеваторного комплексу за рахунок оптимальної маршрутизації. *Інженерія природокористування*. 2021. Т. 4, № 22. С. 82–88.
10. Хвоцан О. Електропривід і автоматизація : конспект лекцій. Миколаїв : МНАУ, 2015. 58 с.
11. Черв'яков В. Д., Леонт'єв П. В., Соколов С. В. Автоматизовані електромеханічні системи: конспект лекцій. Суми : Сум. держ. ун-т, 2022. 253 с.
12. Чорний О. П., Зачепа Ю. В., Титюк В. К. Моніторинг і діагностика електромеханічних об'єктів : навчальний посібник. Кременчуг : ЧП Щербатих, 2019. 122 с.
13. Шевченко О. Методичне забезпечення лекційного курсу з дисципліни Системи керування електропривода. Чернігів : Київ. нац. ун-ту технологій та дизайну, 2018. 77 с.

Навчальне видання

## **ЕЛЕКТРИЧНІ МАШИНИ ТА АПАРАТИ**

Методичні рекомендації

Укладачі: **Мардзявко Віталій Анатолійович**  
**Руденко Андрій Юрійович**

Формат 60x84 1/16. Ум. друк. арк. 7,0.

Тираж 20 прим. Зам. № \_\_\_\_\_

Надруковано у видавничому відділі  
Миколаївського національного аграрного університету  
54020, м. Миколаїв, вул. Георгія Гонгадзе, 9

Свідотство субекта видавничої справи ДК № 4490 від 09.06.2013 р.