

**МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ І НАУКИ УКРАЇНИ**  
**МИКОЛАЇВСЬКИЙ НАЦІОНАЛЬНИЙ АГРАРНИЙ УНІВЕРСИТЕТ**

**ІНЖЕНЕРНО-ЕНЕРГЕТИЧНИЙ ФАКУЛЬТЕТ**  
**КАФЕДРА ЕЛЕКТРОЕНЕРГЕТИКИ, ЕЛЕКТРОТЕХНІКИ ТА**  
**ЕЛЕКТРОМЕХАНІКИ**

**ЕЛЕКТРОТЕХНІЧНІ СИСТЕМИ ТА КОМПЛЕКСИ**

методичні рекомендації

для підготовки до лабораторних робіт 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

2024

УДК 621.3

E50

Рекомендовано до друку науково-методичною комісією Інженерно-енергетичного факультету Миколаївського національного аграрного університету від 05.02.2024, протокол № 5.

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:

Олександр Циганов – канд. тех. наук, сташ. виклд. кафедри електроенергетики, електротехніки та електромеханіки, 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, 2024

## ЗМІСТ

ВСТУП.....	4
ЛАБОРАТОРНА РОБОТА № 1. Дослідження роботи електротехнологічних потоків ліній агропромислового комплексу .....	6
ЛАБОРАТОРНА РОБОТА № 2. Дослідження електропривода вантажопідійомних машин .....	15
ЛАБОРАТОРНА РОБОТА № 3. Дослідження електропривода конвеєрного транспорту .....	27
ЛАБОРАТОРНА РОБОТА № 4. Дослідження роботи газового лазера.....	37
ЛАБОРАТОРНА РОБОТА № 5. Дослідження роботи частотного перетворювача електродвигунів.....	46
ЛАБОРАТОРНА РОБОТА № 6. Дослідження роботи електроустаткування печей опору .....	58
ЛАБОРАТОРНА РОБОТА № 7. Дослідження принципів роботи і конструкцій електрозварювальних установок .....	69
СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ.....	77
ЗАГАЛЬНІ ВИМОГИ ДО ОФОРМЛЕННЯ ЗВІТІВ З ЛАБОРАТОРНИХ РОБІТ.....	78
ДОДАТОК.....	80

## 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, підйомна-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 профільюючих 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.

## ЛАБОРАТОРНА РОБОТА № 1

**Тема:** Дослідження роботи електротехнологічних потокових ліній агропромислового комплексу

**Мета:** ознайомити здобувачів початкового рівня вищої освіти з основними потоковими лініями, які використовуються у сільському господарстві системами їх керування та автоматизації

### *1.1 Теоретичні відомості*

Для комплексної механізації та електрифікації різних технологічних процесів практично в усіх галузях сільськогосподарського виробництва використовується система машин. Це сукупність різних робочих машин, механізмів та апаратів, які зв'язані між собою згідно з продуктивністю, швидкістю руху й тривалістю дії для завершеного технологічного або виробничого циклу. При цьому через механізми зв'язку одна машина задає роботу іншій і таким чином забезпечується поточність виробництва, умови його автоматизації і безпеки експлуатації. Система машин забезпечує найкраще використання коштів, впровадження інтенсивних технологій виробництва продукції тваринництва, різке підвищення продуктивності праці, економію паливно-енергетичних ресурсів, поліпшує умови праці.

Ручне керування машинами, які працюють у потоці, малоефективне: обслуговуючий персонал не в змозі своєчасно реагувати на роботу кожної з них. Автоматизація контролю і керування технологічним процесом є обов'язковою умовою підвищення ефективності використання машин.

Однак концентрація машин і устаткування, їх розміщення, взаємозв'язок і певна послідовність їх роботи, яка зумовлює введення централізації та автоматизації керування, разом з тим ставить нові вимоги до електропривода та електропостачання.

Схеми автоматичного керування електроприводами поточкових ліній включають керування кількома двигунами (кількість їх може бути більше десяти), тому можливі різні схеми пуску. Найпростіша з них — одночасний пуск 2-4 двигунів. Це стосується, як правило, двигунів невеликої потужності. За умов одночасного пуску пусковий струм визначається сумою пускових струмів окремих електродвигунів. Найраціональнішим для групи двигунів невеликої потужності є лавинний пуск. Вмикання двигунів відбувається послідовно з витримкою часу спрацьовування магнітного пускача, який вмикає кожний наступний двигун. У цьому випадку пусковий струм знижується порівняно з одночасним пуском на 15–20 %. За наявності значної кількості електродвигунів пуск здійснюється з витримкою часу, яка дорівнює або більше часу розгону попереднього електродвигуна. Витримка часу або обирається оператором інтуїтивно, або у ланцюзі керування монтується відповідні реле часу. Можливі схеми пуску наведені на рис. 1.1.

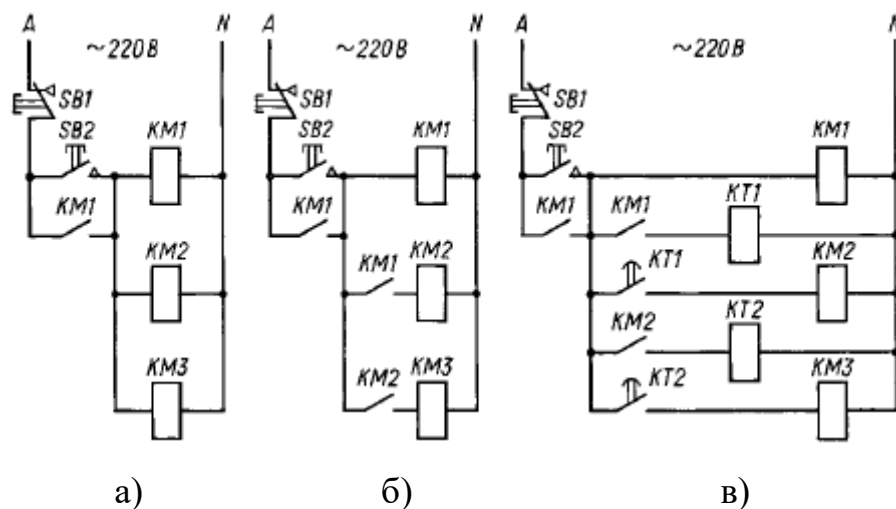


Рис. 1.1 – Схема пуску електродвигунів у поточковій лінії: а) одночасний пуск; б) лавинний пуск; в) пуск з витримкою часу

Електроустаткування установки забезпечує:

- керування установкою у двох режимах — налагоджувальному та автоматичному, аварійну зупинку;

- передпускову звукову сигналізацію;
- керування у автоматичному режимі двома лініями — подрібнення і завантаження;
- керування системою аспірації;
- автоматичне встановлення засувки залежно від обраної під завантаження секції наддозаторного бункера;
- блокування, яке передбачає за умов зупинки однієї з машин зупинку попередніх;
- звільнення лінії подрібнення від залишків продукту при зупинці;
- зупинку лінії завантаження при завантаженні обраної секції бункера-нагромаджувача або бункера білково-вітамінно-мінеральних домішок (БВД);
- світлову сигналізацію роботи машин;
- сигналізацію завантаження бункерів та їх секцій продуктом;
- безступінчасте регулювання швидкості двигуна механізму дозування у діапазоні 50 - 70 об/хв;
- блокування пуску двигунів установки за умов відкритої камери дробарки;
- захист всього електрообладнання від струмів короткого замикання та перевантажень.

### ***1.1.2. Електропривід кормороздавача РКА-2000***

Кормороздавач РКА-2000 використовується для роздавання гранульованих кормів. Згідно з технологією (рис. 1.2, *a*) корм з бункера-сховища 1 похилим шнеком 6 та горизонтальним транспортером 3 подається до проміжних бункерів 7. Штанги з шайбами здійснюють зворотно-поступальний рух на відстань 0,44 м і переміщують корм від проміжних бункерів в обидва боки.



Електрична схема (рис. 1.2, б) забезпечує ручне та автоматичне керування роздаванням кормів. Ручне керування здійснюється встановленням перемикачів *SA3*, *SA5*, *SA7* у положення "Ручне".

При автоматичному керуванні вказані перемикачі необхідно встановити у положення "Автоматичне". У цьому випадку команди на вмикання та вимикання подаються двопрограмним реле часу *KT*.

Перша програма *KT.1* подає живлення на проміжне реле *KL7*, яке своїми замикаючими контактами вмикає через пускач *KM5* освітлення свинарника.

Контактами *KT.2* згідно з другою програмою подається живлення на проміжне реле *KL6*, замикаючі контакти якого вмикають мережі котушок магнітних пускачів *KM1*, *KM2*, *KM3*. Указані пускачі вмикають відповідно електродвигуни шнека *M1*, скребкового транспортера *M2* та кормороздавача *M3*. Коли проміжні бункери 7 будуть повністю заповнені кормом, розмикаються контакти датчика рівня *SL*, котушки пускачів *KM1* та *KM2* втрачають живлення й електродвигуни *M1* та *M2* зупиняються. Реверсивний привід двигуна *M3* здійснює зворотно-поступальний рух штанг. У крайніх положеннях команду на зміну напрямку обертання електродвигуна дають кінцеві вимикачі *SQH* та *SQB*.

Тривалість роботи визначається часом замкненого стану контактів програмного реле часу *KT2*. За умов перевантаження мережі штанги спрацьовує кінцевий вимикач перевантаження і двигун *M3* привода кормороздавача вимикається, спрацьовує аварійне реле *KH* і загоряється сигнальна лампа *HL3*.

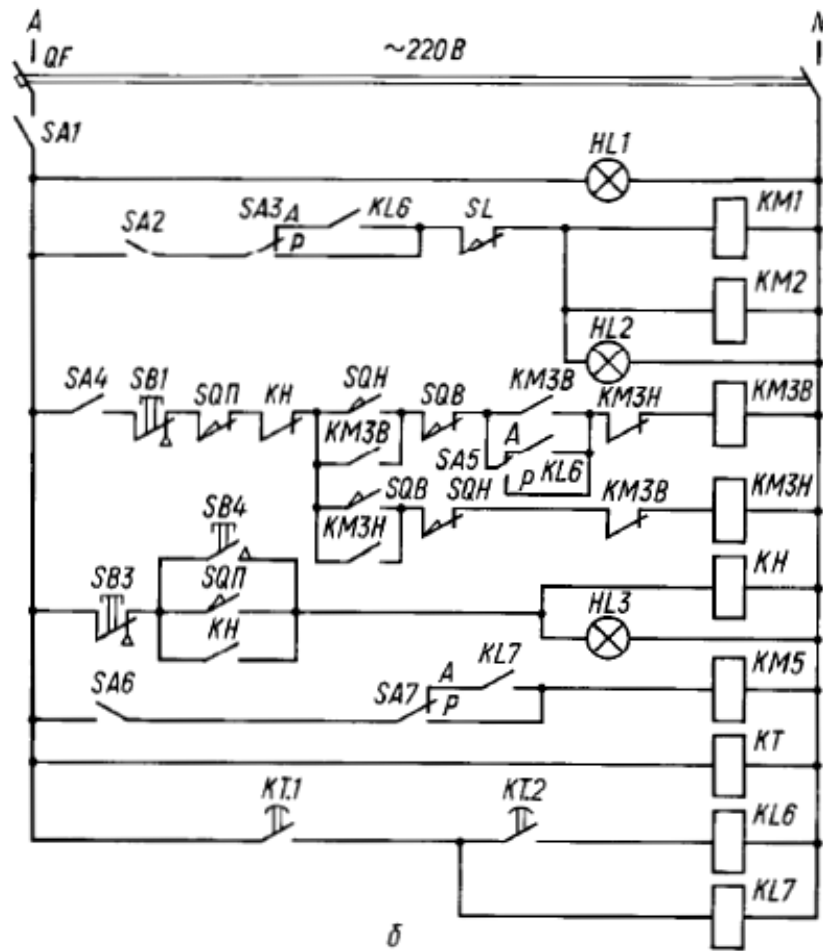
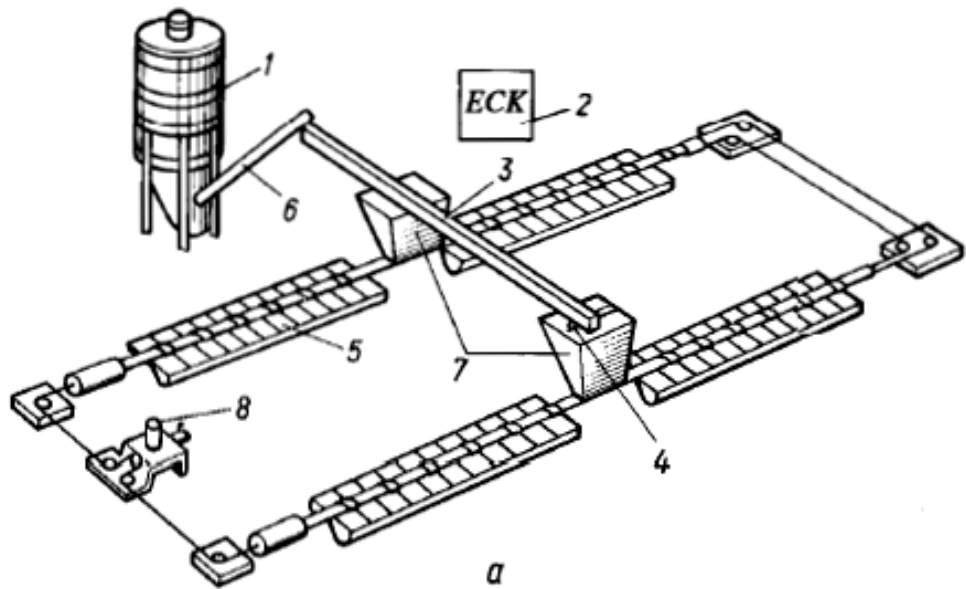


Рис. 1.2 – Електропривід кормороздавача РКА-2000: *a* - технологічна схема: 1 - бункер-сховище; 2 - електрична станція керування; 3 - горизонтальний транспортер; 4 - датчик рівня; 5 - кормороздавач; 6 - шнек; 7

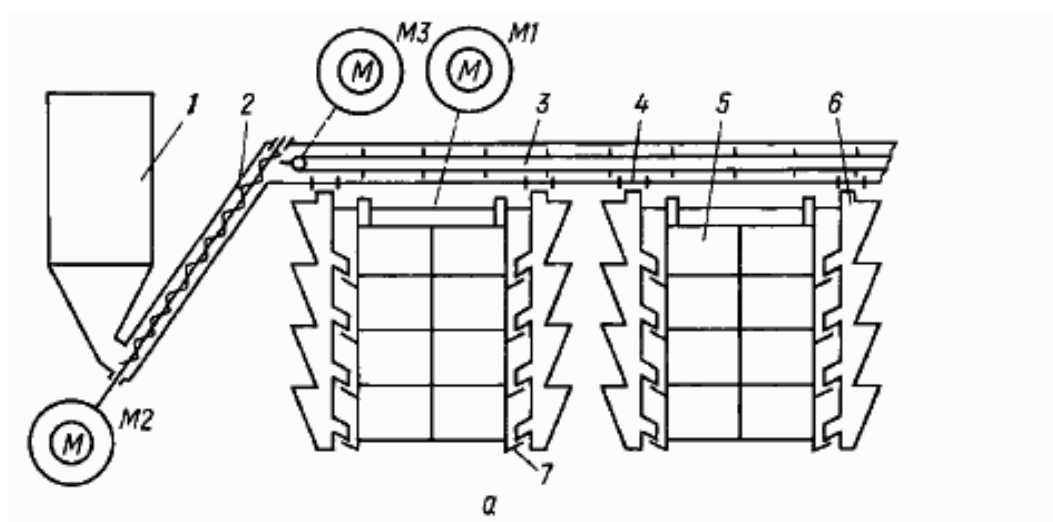
- проміжні бункери; 8 - натяжний пристрій; б - принципіальна електрична схема керування.

Автоматизований привід кормороздавача дає можливість роздавати корм згідно з заданою програмою у кілька прийомів малими дозами, що дає змогу значно підвищити приріст тварин.

### 1.1.3. Електропривід потокових ліній на птахофермах

Для комплексної механізації та часткової автоматизації виробничих процесів у великих птахівницьких господарствах для утримання курей-несучок широко використовуються комплекти устаткування на базі одно- та багатоярусних кліткових батарей. Вони складаються з окремих уніфікованих машин і пристроїв, які забезпечують роздавання корму, подавання питної води, збирання яєць, прибирання та видалення посліду. Комплекти відрізняються якістю і компонованням складових частин.

Технологічну схему роздавання корму у багатоярусних кліткових батареях типу КБН наведено на рис. 1.3.



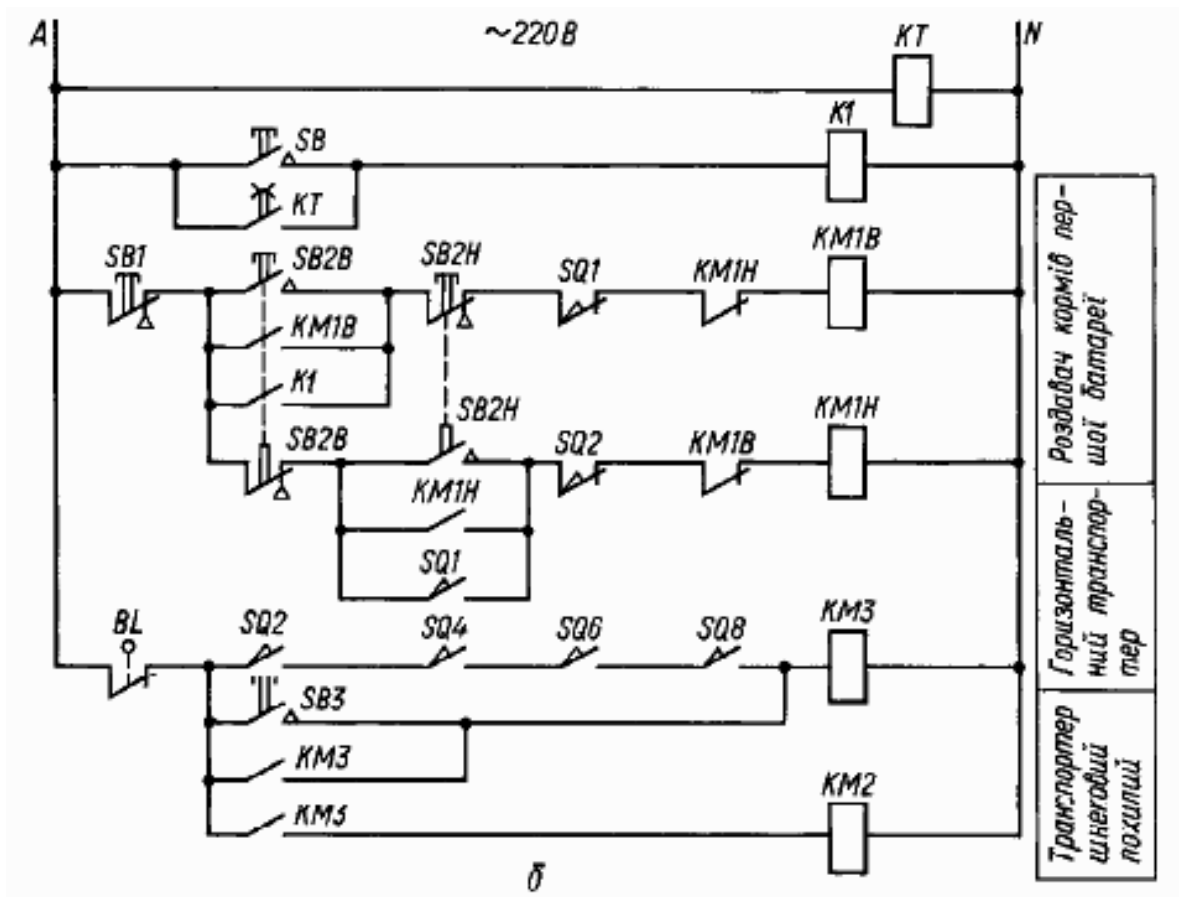


Рис. 1.3 – Електропривід роздавання корму на птахофермах: а - технологічна схема роздавання корму; б - електрична схема керування; 1 - бункер; 2 - шнековий транспортер; 3 - горизонтальний поперечний транспортер; 4 - вивантажувальне вікно; 5 - навісний кормороздавач; 6 - приймальний бункер; 7 - годівниця

Сухий корм до пташників підвозять спеціальним автокормовозом-завантажувачем і заповнюють бункер типу БСК-10 для зберігання сухих кормів. Похилим шнековим транспортером 2 і горизонтальним поперечним транспортером 3 корм подається до приймальних бункерів навісних кормороздавачів двобічної дії, і після заповнення усіх приймальних бункерів привід похилого шнека та горизонтального транспортера зупиняється. Наповнені навісні кормороздавачі переміщуються вздовж пташника, роздають корм до годівниць, а скребками одночасно видаляється послід.

Кормороздавачі та скребки для видалення посліду приводяться у дію від електродвигуна *M1* потужністю 0,6 кВт через редуктор та систему передач. При зворотному русі роздавача корм продовжує заповнювати годівниці, а скребки для видалення посліду здійснюють холостий хід. У кінці пташника встановлено транспортер, який видаляє послід за межі будівлі з одночасним завантаженням у транспортні засоби.

Електрична схема керування роздавання корму і прибирання посліду (рис. 1.3, б) може працювати у ручному та автоматичному режимах. У ручному режимі керування електродвигунами *M1*, *M2*, *M3* відбувається за допомогою натискання відповідних кнопок "Пуск" та "Стоп" (*SB1*, *SB2В*, *SB2Н*, *SB3*).

При автоматичному керуванні вмикання роздавача здійснюється програмним реле часу *КТ*. У вихідному положенні кормороздавачів А, Б, В, Г замкнені контакти кінцевих вимикачів *SQ4*, *SQ5*, *SQ6*, *SQ7*. Якщо приймальні бункери останнього роздавача не заповнені кормом, то контакти фотореле *ВL* замкнені і котушка магнітного пускача *КМ3* одержує живлення і вмикає двигун *M3* горизонтального скребкового транспортера 3. Одночасно замикаючі контакти *КМ3* подають напругу на котушку пускача *КМ2*, який вмикає двигун *M2* привода похилого шнекового транспортера.

При роботі завантажувальної лінії йде по чергове заповнення бункерів кормороздавачів, починаючи з першого. Після заповнення останньої секції останнього бункера 1 розмикаються контакти фотореле *ВL* і двигуни *M2* та *M3* зупиняються.

У визначений час контакти програмного реле часу *КТ* замикаються, вмикається проміжне реле *К1*. Замикаючі контакти *К1* подають напругу на котушку магнітних пускачів *КМ 1В* (*КМ2В*, *КМ3В*, *КМ4В*), які вмикають електродвигуни *М1А* (*М1Б*, *М1В*, *М1Г*) навісних роздавачів, і всі роздавачі починають переміщуватися вздовж пташника і роздавати корм.

На електричній схемі наведено електродвигун *M1* кормороздавача А. Аналогічно йде керування роздавачами Б, В, Г.

Одночасно з роздаванням корму йде прибирання посліду. Коли роздавач доходить до кінця приміщення, упори скребоків четвертих ярусів натискають на кінцеві вимикачі *SQ1*, *SQ3*, *SQ5*, *SQ7* і привід реверсується.

При зворотному русі роздавання кормів у годівниці триває. У вихідному положенні упори скребоків третього ярусу натискають на кінцеві вимикачі *SQ2*, *SQ4*, *SQ6*, *SQ8*, кормороздавачі вимикаються підготовленими до наступного завантаження.

### ***1.3 Порядок виконання роботи***

1. Ознайомитися з короткими теоретичними відомостями по вивченню будови, принципів дії та технічних характеристик деяких технологічних ліній агропромислового комплексу.
2. Відповісти на контрольні питання.
3. Оформити звіт відповідно до вимоги захисту та виконання лабораторної роботи.
4. Зробити висновок про виконану роботу.

### ***1.4 Контрольні питання***

1. Які схеми пуску електродвигунів застосовують при автотоматизації потокової ліній?
2. Пояснити принцип роботи електричної схеми керування кормороздавачем РКА-2000?
3. Пояснити принцип роботи електричної схеми керування роздачі корму на птахофермах?

## ЛАБОРАТОРНА РОБОТА № 2

**Тема:** Дослідження електропривода вантажопідйомних машин

**Мета:** ознайомити здобувачів початкового рівня вищої освіти з принципом дії схеми керування та методи перевірки електромеханічних характеристик асинхронного електроприводу механізму підйому

### *2.1 Теоретичні відомості*

До вантажопідйомних машин відносять підйомні крани, кран-балки, талі, лебідки. За характером технологічного процесу вони є машинами циклічної дії. Спільним для цих установок є режим роботи, при якому технологічний процес складається з ряду повторюваних однотипних циклів, кожний з яких є закінченою операцією завантаження робочого органу, переміщення його з вихідної точки в пункт призначення і розвантаження.

Основними механізмами вантажопідйомних машин є механізми підйому і пересування (повороту) (рис. 2.1).

Сили тертя в кранових механізмах обумовлюють реактивні моменти, а сили тяжіння мас, що рухаються вертикально або похило - активні. При цьому зведений до вала двигуна статичний момент  $M_c$  є алгебраїчною сумою моменту  $M_g$ , обумовленого вагою переміщуваного вантажу, і моменту втрат на тертя  $M_m$  (рис. 2.2). Момент  $M_g$  залежить від величини рухомих мас (вантажів та вантажозахватного пристрою), момент  $M_m$  - від ККД кінематичних ланок механізму, який у свою чергу є функцією ваги вантажу. При номінальному завантаженні  $G_{ном}$  величини ККД визначаються за довідковими даними. При завантаженні  $G$ , меншому за номінальне, ККД можна визначити за експериментальними кривими, наведеними на рис. 2.3.

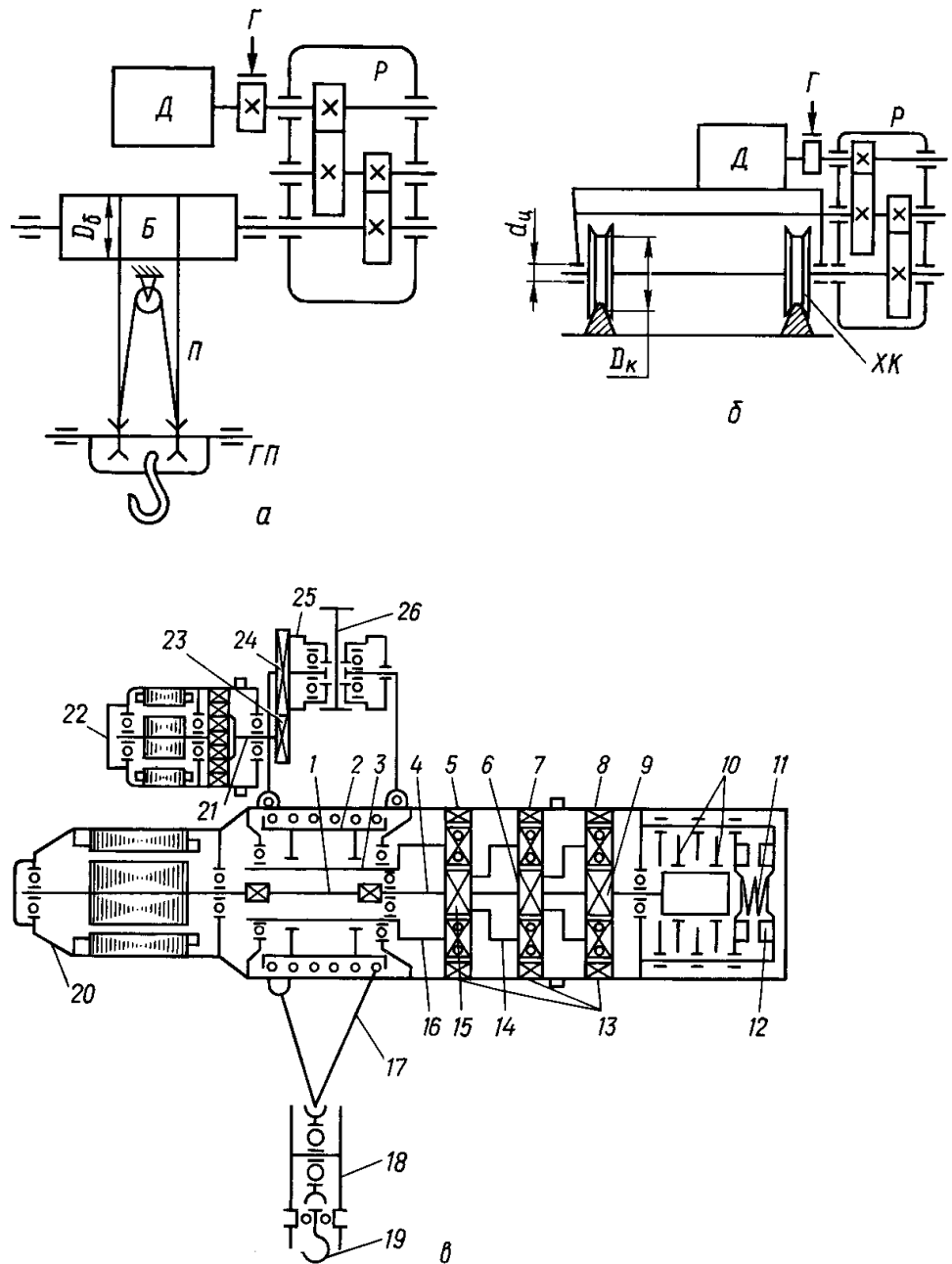


Рис. 2.1 – Кінематичні схеми кранових механізмів: а - однокінцевої підйомної лебідки; б - механізму переміщення; Д - двигун; Г - гальмо; Р - редуктор; Б - барабан; П - поліспаст; ГП - гакова підвіска; ХК - ходове колесо; в - талі ТЗП-1; 1 - проміжний вал; 2 - робочий барабан; 3 - порожнистий вал; 4 - робочий вал; 5, 7, 8 - сателіти; 6, 9, 15 - сонячні шестерні; 10 - гальмівні диски; 11 - гальмівна пружина; 12 - електромагніт; 13 - блочні шестерні; 14, 16, 21 - водила; 17 - канат; 18 - підвіска; 19 - гак; 20 -



електродвигун підйому вантажу; 22 - електродвигун переміщення візка; 23,  
24 - шестерні; 25 - коток; 26 - монорейка

У рух механізми приводяться, як правило, реверсивним електроприводом, розрахованим для роботи в повторно-короткочасному режимі. У кожному циклі є неусталені режими роботи електропривода: пуски, реверси, гальмування, що суттєво впливають на продуктивність механізму, динамічні навантаження привода і механізму, ККД установки, нагрівання двигунів.

Щоб втрати електроенергії в електродвигунах були меншими, потрібно, щоб зведений до вала двигуна момент інерції системи був невеликим. Робочі швидкості механізмів кранів, що використовуються в сільському господарстві, знаходяться в межах 0,5 - 2 м/с, тому основну частку в зведеному моменті інерції становить момент інерції ротора двигуна. Цим обумовлюються застосування в приводах кранових механізмів двигунів з малими моментами інерції ротора.

Кранові двигуни повинні мати велику перевантажувальну здатність, щоб забезпечити: 1) достатній механічний момент при розгоні; 2) необхідний пусковий момент для подолання короткочасних механічних перевантажень, що виникають при відриві вантажів.

Механічні характеристики електроприводів кранових механізмів повинні відповідати вимогам технологічних операцій, що виконує кран:

а) для підйому і опускання вантажів з високою швидкістю характеристики 1 повинні бути жорсткими (див. рис. 2.2);

б) плавний пуск двигуна при реостатному керуванні та роботу на проміжних швидкостях забезпечують м'які характеристики 2;

в) для доводок вантажів при підйомі або спуску з наступною точною зупинкою характеристики 3 повинні бути жорсткими при малих швидкостях;

г) для привода механізмів, що працюють з різними перевантаженнями, наприклад грейферних, використовуються приводи з екскаваторною характеристикою 4;

д) у ряді випадків для механізмів переміщення основною вимогою до механічних характеристик електропривода є підтримання постійного прискорення при розгоні, що забезпечується характеристикою 5.

За розглянутими графіками можна вибрати тип привода для забезпечення потрібного набору характеристик. Набори 1 і 2 забезпечуються асинхронним електродвигуном з фазним ротором при реостатному регулюванні роторного кола. Характеристики 1, 2 і 3 мають приводи з двигуном постійного струму паралельного збудження при реостатному регулюванні (2) та шунтуванні якоря (3). Набори 1, 3, 4 забезпечують складні приводи, наприклад асинхронний двигун з фазним ротором і дроселями насичення в колі статора, або електропривод постійного струму, що живиться від генератора чи тиристорного перетворювача.

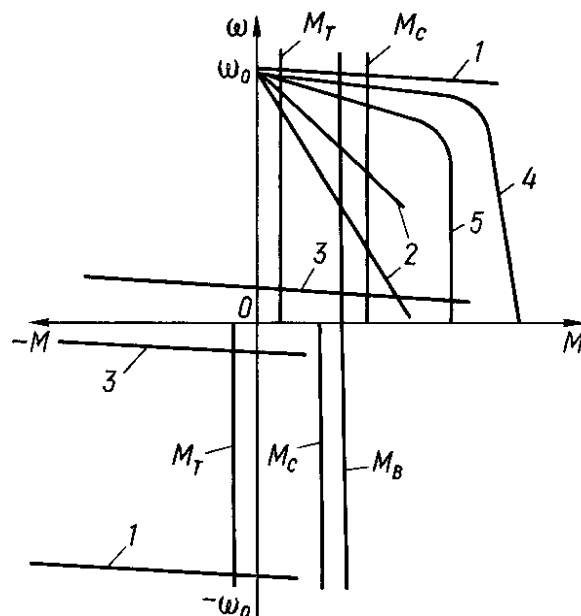


Рис. 2.2 – Механічні характеристики електроприводів кранових механізмів

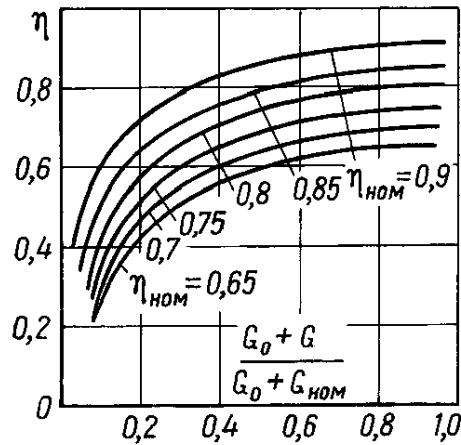


Рис. 2.3 – Залежність ККД механізму від величини навантаження

Вантажопідйомні машини працюють у різних умовах навколишнього середовища - запилених, вологих приміщеннях, на відкритому повітрі, в умовах різких змін температури. Для забезпечення високої експлуатаційної надійності це необхідно враховувати при виборі електрообладнання за ступенем захищеності від дії навколишнього середовища.

### 2.1.2. Автоматизація кранових електроприводів

Електрообладнання кранів повинно забезпечувати надійну високопродуктивну і безпечну роботу. Системи керування передбачають:

- реверсивне керування електродвигунами;
- регулювання швидкості обертання в заданих межах;
- електромеханічне гальмування при зупинках;
- електричне гальмування при роботі на опускання вантажу;
- обмеження ходу вантажозахватного пристрою вгору та пересування моста і візка в обидва боки;
- нульове блокування кіл керування;
- електричні блокування, що запобігають невірному вмиканню апаратів;

- захист від коротких замикань і перевантажень максимальними струмовими реле. У приводах кран-балок і талів передбачають захист тільки від коротких замикань автоматичними вимикачами.

Усі кранові механізми обладнуються гальмами закритого типу, що діють при вимиканні живлення двигуна. Всі неструмоведучі металеві частини електрообладнання повинні бути електрично з'єднані з металевою фермою крана, а та, в свою чергу, - з заземлюючим контуром через підкранові рейки.

Електродвигунами талів і кран-балок керують за допомогою реверсивних магнітних пускачів і пускових кнопок, підвішених на гнучкому броньованому кабелі. Напруга до контактів контакторів підйому *KM1* (рис. 2.4), спуску *KM2*, переміщення вперед і назад *KM3*, *KM4* і до кола керування підводиться через автоматичний вимикач *QF* і кабель або контактні проводи. Для підйому вантажу натискають на кнопку для спуску - на кнопку *SB2*. При цьому спрацьовує контактор *KM1* або *KM2* і електромагніт *YA* гальма. Гальмо розстопорює ротор двигуна, який починає обертатися. Після відпускання кнопки контактор вимикається і ротор двигуна гальмується. При натисканні на кнопки *SB3* або *SB4* таль рухається вліво або вправо. Рух підйомного пристрою вгору обмежується кінцевим вимикачем *SQ1*, рух талі вліво або вправо - кінцевими вимикачами *SQ2* або *SQ3*. Блокування контакторів реверсивних пускачів здійснюється двоконтактними кнопками керування, допоміжними розмикаючими контактами контакторів та пристроями механічного блокування пускачів. Замикаючі контакти пускових кнопок не шунтують відповідними замикаючими контактами контакторів, щоб запобігти роботі талі після відпускання оператором підвісної кнопкової станції.

Керування механізмами підйомних кранів здійснюють за допомогою силових контролерів або командоконтролерів.

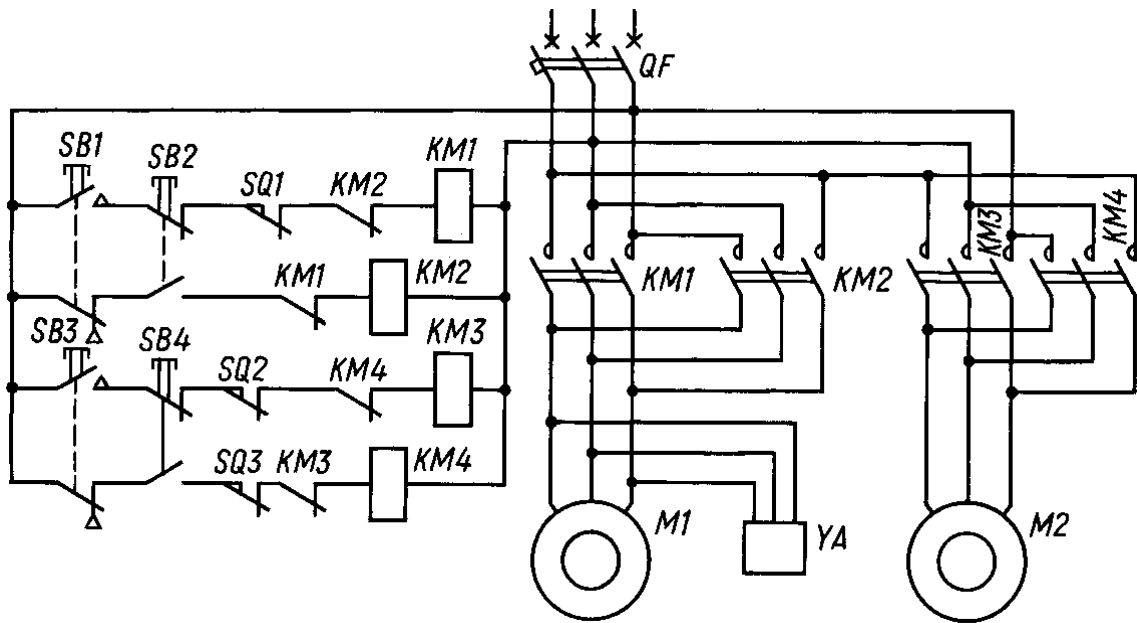


Рис. 2.4 – Схема керування електродвигуном талі

Характерні особливості схем керування електроприводами механізмів підйому з асинхронними двигунами з фазним ротором можна вивчити по схемі керування за допомогою командоконтролера типу ТСА (рис. 2.5).

Особливостями схеми є: несиметрична відносно нульового положення діаграма замикань командоконтролера, яка забезпечує при підйомі і опусканні вантажів різні механічні характеристики електропривода відповідно до несиметричного характеру навантаження підйомної лебідки; використання режиму однофазного вмикання двигуна для поліпшення умов регулювання швидкості при опусканні.

Для запуску механізму підйому вмикають рубильник  $QS$ , а командоконтролер  $SA1$  ставлять у положення "0". При цьому спрацьовує реле  $KV$ , яке одним контактом подає напругу на кола керування, а другим - самоблокується. Через випрямляч  $VD1 - VD4$  одержує живлення реле часу  $KT2$ , яке розмикає контакт у колі котушок контакторів прискорення  $KMV3$  і  $KMV4$ . При установці контролера в положення 1 "Підйом" вмикаються контактори  $KMF$ ,  $KMM$ ,  $KY$  і  $KM2$ . Через головні контакти  $KMM$  і  $KMF$  подається напруга на статор двигуна, а контактор  $KY$  вмикає електромагніт

гальма, який розстопорює ротор. Через контакти *KY* і *KMM*, що замкнулися, одержує живлення котушка реле часу *KT1*. Головні контакти контактора противмикання *KM2* шунтують перший ступінь реостата *R* у колі ротора двигуна. Таким чином, у положенні 1 "Підйом" двигун працює на характеристиці  $1n$  (рис. 6).

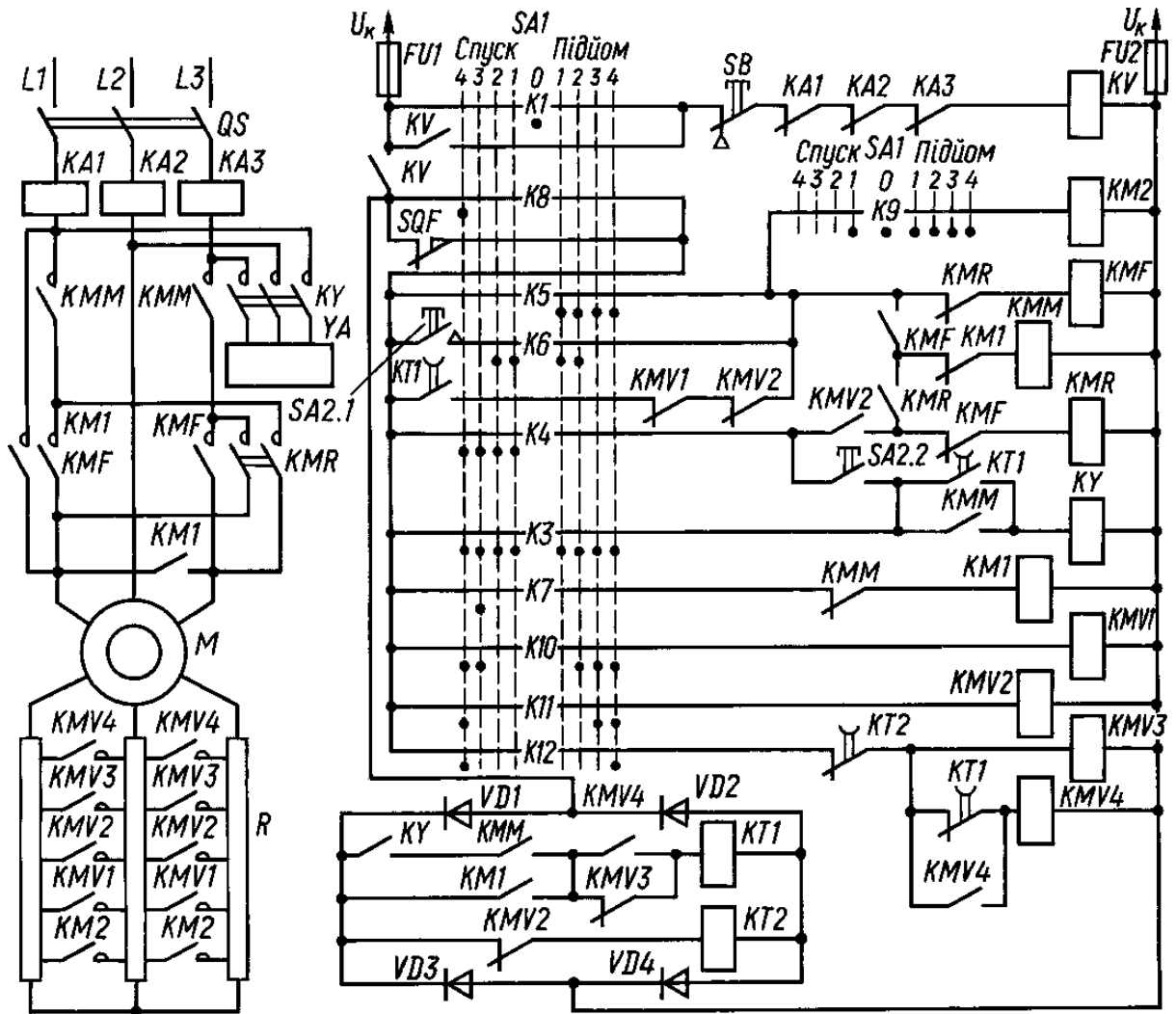


Рис. 2.5 – Схема керування електродвигуном підйому крана за допомогою командоконтролера типу ТСА

Перестановкою командоконтролера (див. рис. 2.5) в положення 2, 3 і 4 "Підйом" послідовно вмикають контактори прискорення *KMV1* - *KMV4*, які головними контактами шунтують відповідні ступені реостата *R*, і двигун

працює на регулювальних характеристиках  $2n$  і  $3n$  та на основній характеристиці  $4n$  (див. рис. 2.6).

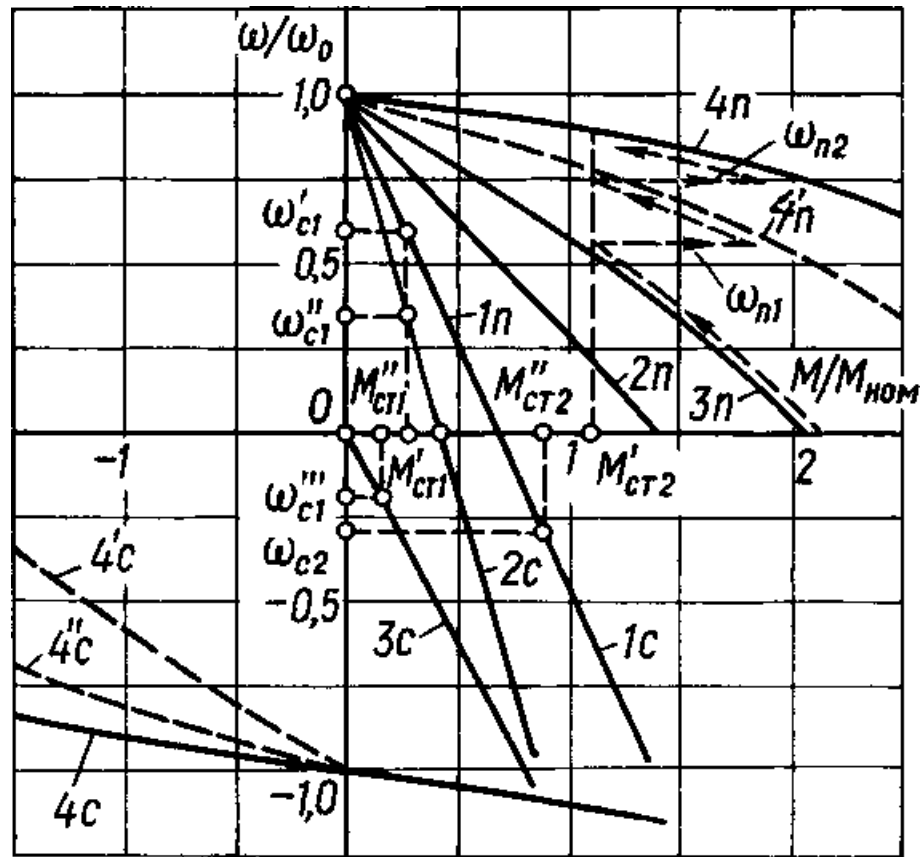


Рис. 2.6 – Механічні характеристики електропривода, керованого командоконтролером типу ТСА

При роботі на основній характеристиці в колі ротора залишається увімкненим невеликий опір, який забезпечує зміну пускового струму ротора в заданих межах при наявній кількості контакторів прискорення.

Для опускання вантажу командоконтролер ставлять у положення 3 "Спуск". Через контакт  $K7$  одержує живлення контактор однофазного вмикання  $KM1$ . Останній головними контактами вмикає двигун за схемою однофазного живлення статора, а допоміжним контактом подає напругу на реле часу  $KT1$ , яке після цього залишається увімкненим у всіх інших положеннях "Спуск". Реле  $KT1$  вмикає контактори  $KMF$  і  $KY$ . Електромагніт

гальма  $YA$  вмикається в мережу, і колодки гальма звільняють гальмівний шків. Через контакт  $K10$  одержує живлення контактор прискорення  $KMV1$ , який головними контактами шунтує частину реостата  $R$ . Двигун працює на гальмівній характеристиці  $3c$ .

При переведенні командоконтролера в положення 2 "Спуск" контактори  $KMV1$  і  $KM1$  вимикаються, а контактор  $KMM$  спрацьовує. Оскільки раніше був увімкнений контактор  $KMF$ , статор двигуна вмикається в мережу в напрямку "Підйом" при повністю введеному в коло ротора опору реостата  $R$ . Двигун працює за характеристикою  $2c$ , яка призначена для гальмівного спуску середніх вантажів у режимі противмикання.

Переведенням ручки командоконтролера в положення 1 "Спуск" контактом  $K9$  вмикають контактор  $KM2$ , який головними контактами шунтує ступінь противмикання реостата  $R$ . Опір роторного кола зменшується, і двигун переходить на роботу за характеристикою  $1c$ , необхідною для гальмівного спуску важких вантажів.

Якщо ручку командоконтролера перевести з положення 3 "Спуск" у положення 4 "Спуск", спрацьовують послідовно контактори  $KMV2$ ,  $KMR$ ,  $KMM$  і  $KY$  та знеструмлюється котушка реле часу  $KT2$ . Двигун спочатку працює за характеристикою  $4'c$ . По закінченню витримки часу  $KT2$  спрацьовує контактор прискорення  $KMV3$  і робоча точка переміщується на характеристику  $4''c$ . Розмикаючий контакт  $KMV3$  вимикає струм з котушки реле часу  $KT1$ , яке з витримкою часу вмикає контактор  $KMV4$ . Двигун працює за основною характеристикою  $4c$ , на якій відбувається силовий спуск гака і гальмівний надсинхронний (у режимі рекуперативного гальмування) спуск вантажів з великою швидкістю.

Таким чином, при спусках вантажів реле часу  $KT1$  зміщує вихідне робоче положення схеми з нульового положення командоконтролера в положення 3. Це зроблено з такою метою. Наприклад, необхідно опустити невеликий вантаж з моментами статичного навантаження  $M'_{cm1}$  при підйомі і



$M''_{cm1}$  при спуску. При роботі за характеристикою  $2c$  замість спуску вантаж буде підніматися з швидкістю  $\omega'_{c1}$ . Тільки в положенні 3 "Спуск", де двигун працює в однофазному режимі, вантаж опускається з невеликою швидкістю  $\omega''_{c1}$ . Отже, реле  $KT1$  запобігає підйому легких вантажів на положеннях командоконтролера "Спуск".

При важких вантажах  $M'_{cm2}$  і  $M''_{cm2}$  вмикання привода в положення 3 "Спуск" призведе до швидкого збільшення швидкості спуску ("осідання" вантажу). Щоб цього уникнути, кранівник може до вмикання двигуна натиснути на педаль  $SA2$  і вимкнути блокування двох перших положень командоконтролера. Контакт  $SA2.1$  готує коло вмикання контактора  $KMF$ , обминаючи контакти  $KT1$ , а  $SA2.2$  — коло контактора  $KY$ . Тепер при установленні командоконтролера в положення 1 "Спуск" вмикаються контактори  $KMF$ ,  $KMM$ ,  $KY$  і  $KM2$ . Двигун працює за характеристикою  $1c$  при невеликій швидкості спуску великого вантажу  $\omega_{c2}$ . Одночасно контакти  $KY$  і  $KMM$  вмикають реле  $KT1$ , яке залишається увімкненим на всіх положеннях спуску.

Схемою передбачено автоматичний контроль протікання перехідних процесів при пуску і гальмуванні при швидкій перестановці командоконтролера з нульового положення в крайні положення і навпаки. У нульовому положенні командоконтролера реле часу  $KT1$  знеструмлене, а котушка реле  $KM2$  - під напругою. Контакт  $KT2$  розриває коло живлення котушок контакторів прискорення  $KMV3$  і  $KMV4$ .

При швидкому переставлянні командоконтролера з положення 0 у положення 4 "Підйом" спрацьовують контактори  $KMF$ ,  $KMM$ ,  $KY$ ,  $KM2$ ,  $KMV1$  і  $KMV2$ . Розмикаючий контакт  $KMV2$  знеструмлює реле часу  $KT2$ , а через контакти  $KY$ ,  $KMM$  і  $KMY3$  одержує живлення котушка реле  $KT1$ . Двигун запускається за характеристикою  $3n$  до швидкості перемикавання  $\omega_{n1}$ . Після закінчення витримки часу реле  $KT2$  його контакт замикається, спрацьовує контактор  $KMV3$  і двигун переходить на проміжну пускову

характеристику 4'n. Розмикаючий контакт *KMV3* знеструмлює реле часу *KT1*, яке починає відлік часу, достатній для прискорення двигуна до другої швидкості перемикачів  $\omega_{n2}$ . Після відпускання реле *KT1* контактор *KMV4* спрацьовує і головними контактами шунтує останній пусковий ступінь реостата *R*. Двигун переходить на основну характеристику і розганяється до ustalеної швидкості. Контактор *KMV4* одним замикаючим контактом самоблокується, а другим вмикає котушку реле *KT1*.

Контроль пуску в напрямку спуску відбувається по проміжних пускових характеристиках 4'с і 4"с, як показано вище.

При швидкому переставлянні командоконтролера з положення 4 "Спуск" у нульове контактори *KMR*, *KY*, *KMV1* - *KMV4* вимикаються і знеструмлюється котушка *KT1*. Через замкнений протягом певного часу контакт *KT1* одержують живлення котушки контакторів *KM2*, *KMF* і *KMM*. Відбувається гальмування противмиканням при одночасному накладанні механічного гальма. Після закінчення витримки часу реле *KT1* обмотка статора вимикається з мережі. Суміщення механічного та електричного гальмування запобігає "осіданню" вантажу і зменшує спрацювання механічного гальма.

При надмірному підніманні вантажу розмикається контакт кінцевого вимикача *SQF* і знімає напругу з кіл керування. Для повторного вмикання ручку командоконтролера ставлять у положення 4 "Спуск", контакт *K8* шунтує розімкнений контакт вимикача *SQF* і двигун вмикається в напрямку спуску.

Для аварійного вимикання схеми передбачена кнопка *SB*.

Захист двигуна від коротких замикань і перевантажень здійснюється струмовими реле *KA1* - *KA3*. Кола керування від коротких замикань захищені запобіжниками *FU1* і *FU2*. Схемою передбачене також нульове блокування, яке виконують паралельно увімкнений контакт *K1* та реле *KV*.

### ***2.3 Порядок виконання роботи***

1. Ознайомитися з короткими теоретичними відомостями по вивченню будови, принципів дії та технічних характеристик електропривода вантажопідійомних машин.
2. Відповісти на контрольні питання.
3. Оформити звіт відповідно до вимоги захисту та виконання лабораторної роботи.
4. Зробити висновок про виконану роботу.

### ***2.4 Контрольні питання***

1. Пояснити кінематику кранових механізмів.
2. Режими роботи кранових механізмів.
3. Механічні характеристики електроприводів кранових механізмів.
4. Пояснити схему керування електродвигуном кранових механізмів.
5. Пояснити схему керування електродвигуном підйому крана за допомогою командоконтролера типу ТСА.

## **ЛАБОРАТОРНА РОБОТА № 3**

**Тема:** Дослідження електропривода конвеєрного транспорту

**Мета:** ознайомити здобувачів початкового рівня вищої освіти з принципом дії та будовою деяких видів транспортерів агоропромислового комплексу

### ***3.1 Теоретичні відомості***

Це найбільш прогресивний вид транспорту, який надає можливість досягти високої продуктивності і надійності роботи, а висока ступінь автоматизації забезпечує низьку трудомісткість. Цей вид транспорту успішно застосовують для доставки самих різноманітних вантажів, корисної копалини

на досить значні відстані. Вибір конвеєра для заданої схеми визначається його продуктивністю і залежить від кута встановлення, довжини, напрямку та умов транспортування, властивостей вантажу. Залежно від призначення конвеєри поділяють на вантажні і вантажо-людські; за тривалістю роботи конвеєри бувають стаціонарними, напівстаціонарними і пересувними. За конструкцією тягового і несучого органу конвеєри поділяють на скребкові, стрічкові і пластинчасті.

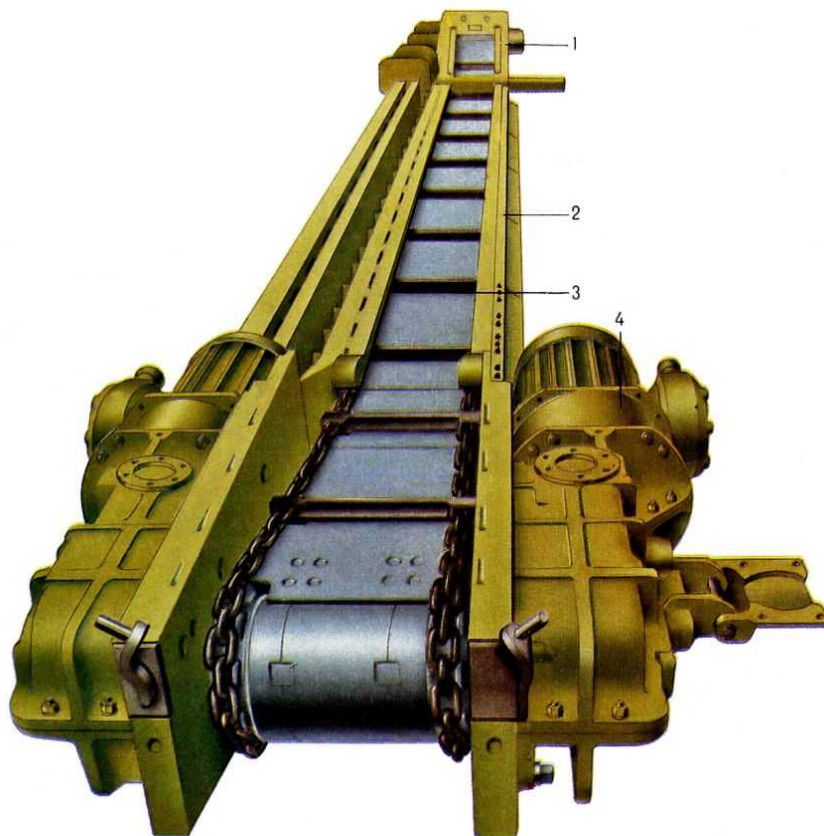


Рис. 3.1 – Скребковий конвеєр СП:1- натяжний пристрій; 2- рештчастий став; 3- тяговий ланцюг зі скребками; 4- приводний орган

Скребкові конвеєри, принцип переміщення вантажів – волочіння. Область застосування : в гірничовидобувній промисловості для переміщення корисної копалини та гірських порід , в енергетичній, будівельній промисловостях. Умовні позначення: скребкові конвеєри позначаються: С, СП, СР, СК. Аббревіатура скребкового конвеєра означає: С – скребковий, СП -

конвеєр скребковий, пересувний, вигинаючийся. Цифра після СП означає ширину рештака. Наприклад СП-87 – ширина 87 см. СР- скребковий розбірний; СК- скребковий консольний. Загальний вигляд скребкового конвеєра показаний на рис. 3.1.

На рис. 3.2 наведена блок-схема скребкового конвеєра.

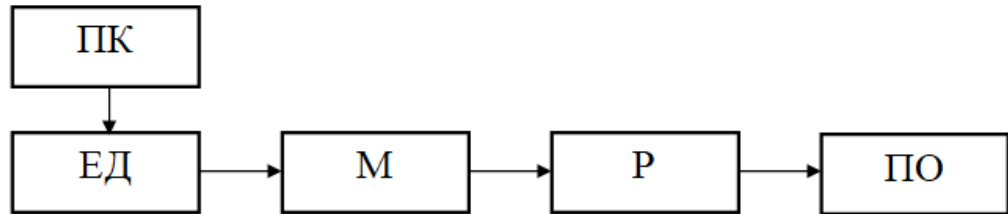


Рис. 3.2 – Блок-схема приводу: ПК - пристрій керування; ЕД - електродвигун; М - муфта; Р - редуктор; ПО-приводний орган

Скребкові конвеєри складаються з: привода, металевого жолоба, зібраного з окремих секцій - рештаків, тягових ланцюгів з пластинами-скребками, апаратури управління і керування. Продуктивність скребкового конвеєра розраховується за формулою:

$$Q = 60 \cdot V_k \cdot S_{n.n.} \cdot \gamma, \text{ м/хв.}$$

де  $V_k$  - швидкість руху полотна, м\сек,  $S_{n.n.}$  - площа поперечного перерізу вантажу на транспортному органі  $\text{м}^2$ ,  $\gamma$  - насипна маса корисної копалини,  $\text{т/м}^3$ .

Сучасний скребковий конвеєр виготовляється гнучким і може переміщувати вантажі відповідно гіпсометрії траси транспортування не знижуючи при цьому продуктивності роботи. Конвеєр має міцну конструкцію, здатну витримувати високі динамічні навантаження від розташованого на ньому видобувного комбайна.

Скребкові конвейери СП призначаються для транспортування корисних копалин з кутом нахилу в діапазоні від 0 до 25...35 градусів, та довжиною транспортування до 200-300 метрів. Продуктивність таких

конвеєрів досить висока: від 260 (конвеєр СП-63) до 600 т/годину і більше (СП 87-ПМ)

Стрічкові конвеєри являються основним типом машин безперервного транспорту, які набули широкого застосування в різних галузях промисловості, завдяки своїм високим експлуатаційним якостям: високій продуктивності, можливістю транспортування вантажів на велику відстань, простоти конструкції, високій надійності, відносно невеликій вазі.

Область застосування: стрічкові конвеєри застосовують для переміщення насипних та штучних вантажів на горизонтальних та похилих ділянках транспортування (з кутами нахилу вгору або вниз до 16... 18 градусів).

Перевагами стрічкових конвеєрів являються: велика довжина транспортування від одного привода, легкість обслуговування, безшумність при роботі, невелика питома витрата електроенергії, можливість автоматизації.

Принцип дії: У стрічкових конвеєрів стрічка служить водночас вантажонесучим та тяговим органом. Рух тягового органу (стрічки) конвеєра здійснюється за рахунок фрикційного зв'язку стрічки з приводним барабаном. До недоліків цих конвеєрів відносяться: їх висока вартість, невеликий термін служби стрічки, обмежений кут нахилу.

Загальний вигляд стрічкового конвеєра показаний на рис. 3.3.

Обмеження області застосування стрічкових конвеєрів пов'язано з наступними факторами:

1. Крупністю та абразивністю транспортуемого матеріалу;
2. Обмеження кута підйому при використанні нормальної гладкої стрічки;

(до 16 - 20° в залежності від властивостей транспортування матеріалу і конструкції роликів ставу);

3. Необхідність прямолінійного встановлення конвейерного става в плані, що не дозволяє використовувати конвеєри на криволінійних ділянках.



Рис. 3.3 – Загальний вигляд стрічкового конвеєра

Стрічкові конвеєри класифікуються :

1. За призначенням :

- для підземних гірничих роботах ( шахт, рудників);
- для відкритих гірничих робіт (кар'єрів, розрізів );
- для інших галузей промисловостей.

2. За видом вантажів:

- для насипних вантажів;
- для штучних вантажів.

3. За формою поперечного розрізу:

- з плоскою стрічкою;
- з стрічкою у формі жолобу.

4. За конструкцією приводу і кількістю приводних барабанів

- з одним, двома, трьома приводними барабанами

Стрічкові конвеєри складаються: з привода, стрічки, натяжної станції, розвантажувальної головки, конвеєрного става з роликоопорами, а також завантажувального пристрою.

Привод стрічкового конвеєра. Привод конвеєра здійснює передачу тягового зусилля стрічці. Основними елементами приводу є приводні, розвантажувальні, відхиляючі барабани і силові агрегати. Елементи приводу, змонтовані на несучій конструкції, складають приводну станцію.

Приводна станція стрічкового конвеєра (рис. 3.4) складається з основної рами 1, приводного барабана 2, розвантажувального барабану 3, електродвигуна 4, редуктора 5, відхиляючого барабана 6.

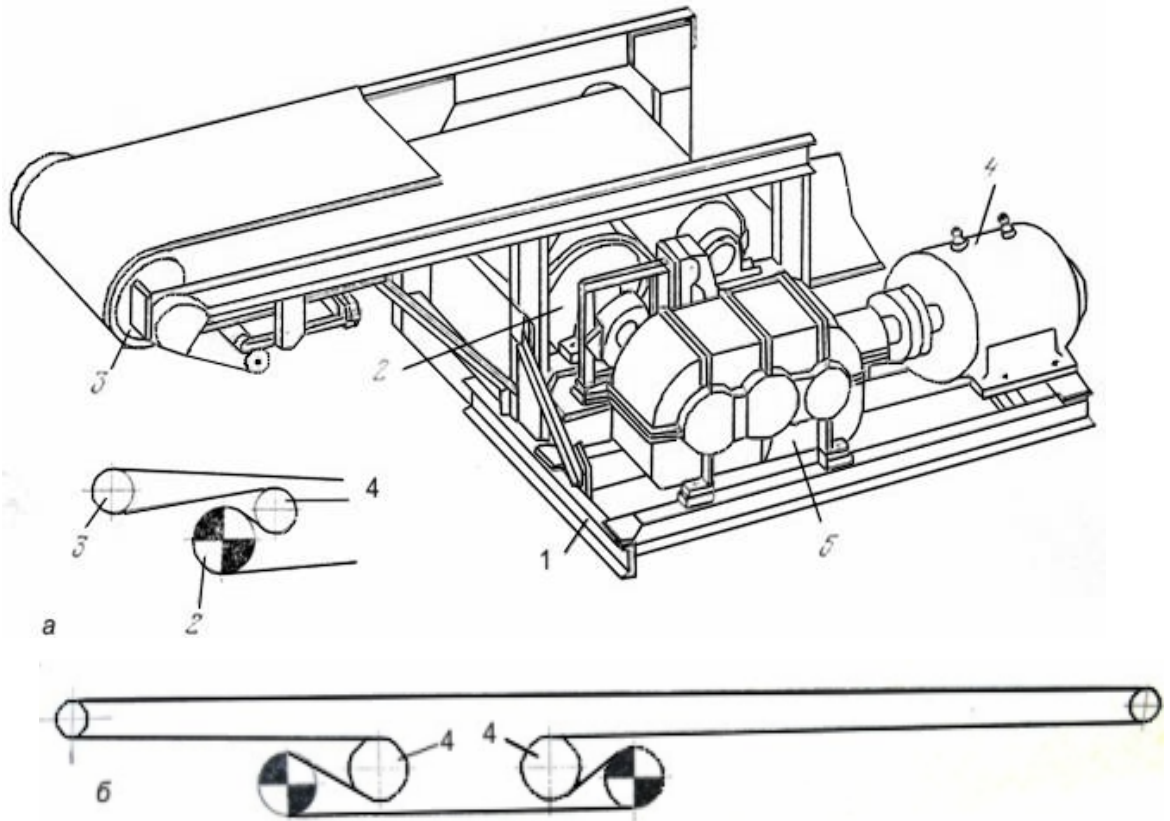


Рис. 3.4 – Конструкція та схеми приводу стрічкових конвеєрів. а) - з одним приводним барабаном; б) - з двома приводними барабанами. 1 - рама; 2- електродвигун; 3 - редуктор; 4- приводний барабан; 5- відхиляючий; барабан; 6- розвантажувальний барабан; 7- натяжний барабан.



Приводні барабани. Приводні барабани призначені для передачі тягового зусилля від барабана до стрічки за рахунок фрикційного зчеплення. Діаметр барабану залежить від довжини конвеєра, числа прокладок в стрічці, типу тканини. Конструкції стрічкових конвеєрів, в залежності від довжини, продуктивності, кута нахилу мають від одного до 3-х приводних барабанів.

В якості вантажонесучого тягового органу застосовуються стрічки з високими розривними властивостями на розрив двох типів :

- гумово-тканинні стрічки;
- гумово- тросові стрічки.

На рис 3.5. показані схеми будови конвеєрних стрічок. На конвеєрах застосовуються стрічки з прокладками з бавовняних та синтетичних тканин (а, б), а також з тросовою основою (в).

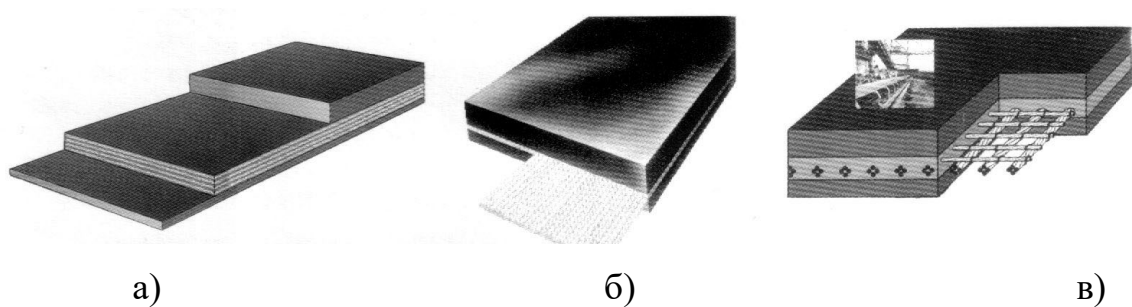
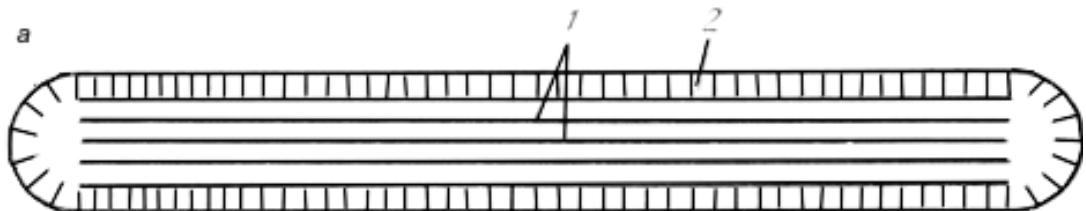


Рис. 3.5 – Схема будови конвеєрних стрічок

Для стрічкових конвеєрів найчастіше використовуються гумовотканинні і гумовотросові стрічки. Конструкції і будова стрічок показані на рис. 3.6.



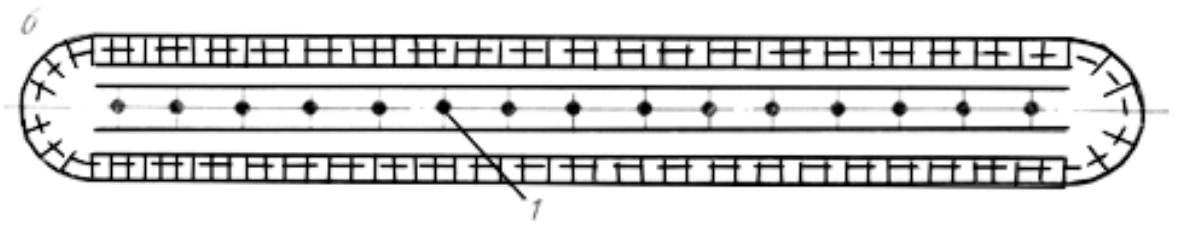


Рис. 3.6 – Конструкції гумовоотканинної (а), і гумовотросової (б) стрічок

Основними частинами конвеєрної стрічки є каркас (1) і захисне покриття (2). Призначення каркаса – сприйняття поздовжніх і поперечних навантажень, а захисного покриття – захист каркасу від механічних пошкоджень.

Каркас гумовотканинних стрічок - *Ш, 2Ш, ПВХ* (рис. 3.5, а) складається з пошарово прокладених прокладок 1. Призначення прокладок – передача тягового зусилля від приводного барабана. Захисний шар гуми (обкладка) 2 наноситься на каркас зверху, знизу і з боків. Верхній шар гуми – робочий, який товщий ніж нижній (неробочий).

Для транспортування гірської маси у вітчизняних легких конвеєрах використовують стрічки з каркасом, який містить 72 % бавовни і 28 % лавсану. Подовження (розтягування) таких стрічок при робочих навантаженнях складає 3,5-5,0 %.

Гумовотросові стрічки - РТЛ, РТЛО використовують на магістральних конвеєрах великої довжини. Вони мають високу міцність (до 30 кН/см і більше) і мале відносне подовження (до 0,25 %). В гумовотросовій стрічці (рис. 3.5, б) основою служать сталі канатики – троси 1. Недоліком гумовотросових стрічок є велика маса і трудоємність з'єднання стиків при поривах та з'єднаннях стрічок.

Середня частина стрічкових конвеєрів, яка називається ставом, складається з коротких, з'єднаних між собою проміжних секцій з роликкооперами. Стрічка переміщується по спеціальним роликкооперам

конвеєрного става. Ролики зменшують тертя стрічки під час її руху і надають стрічці оптимальну жолобчасту форму. Для підтримки і переміщення стрічки на конвеєрах при ширині стрічки до 2 м, використовують трьохроликові опори (рис. 3.7), з кутом нахилу бокових роликів від 20° до 30°. а при ширині стрічки більше 2 м - п'ятироликові.

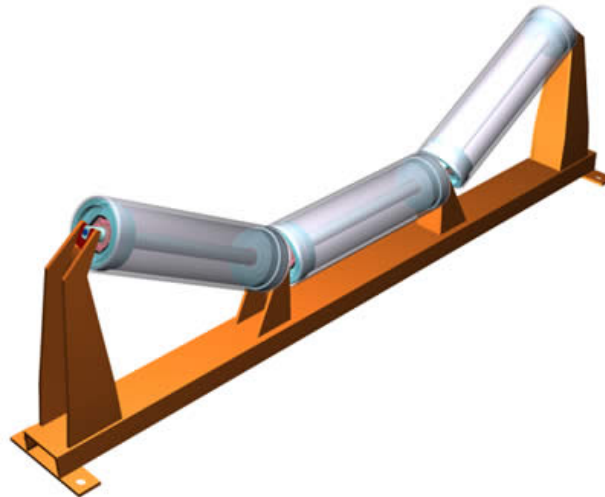


Рис. 3.7 – Роликоопори конвеєрного става

Продуктивність стрічкових конвеєрів від 200 до 6500 т/годину. Довжина конвеєрів може сягати від сотень метрів на підземних гірничих підприємствах до кількох тисяч метрів на потужних відкритих розробках (кар'єрах).

Продуктивність стрічкового конвеєра залежить від ширини й швидкості переміщення стрічки. Продуктивність стрічкового конвеєра можна визначити за формулою:

$$Q = 60 \cdot V_k \cdot S_{n.n.} \cdot K_1 \cdot K_2, \text{ т/хв.}$$

де  $S_{n.n.}$  - площа поперечного переріз у вантажу на стрічці;  $V_k$  - швидкість руху полотна стрічки;  $K_1$  - коефіцієнт, який залежить від кута установки конвеєра;  $K_1 = 1$  при кутах до 6 град,  $K_1 = 0,95$  при кутах від 6 до 18 градусів;  $K_2$  - коефіцієнт, який враховує умови експлуатації;  $K_2 = 0,90$  - для напівстаціонарних установок.

Пластинчасті конвеєри що згинаються мають той же принцип дії що і стрічкові. Область застосування: пластинчасті конвеєри застосовують для транспортування крупнокускових абразивних гірських порід та матеріалів. Загальний вигляд пластинчатого конвеєра наведений на рис. 3.8.



Рис. 3.8 – Пластинчастий конвеєр

Продуктивність пластинчатого конвеєра можна визначаться за формулою:

$$Q = 3600 \cdot V \cdot F \cdot \gamma, \text{ т/год.}$$

де  $F$  - площа поперечного перерізу вантажу на жолобі,  $\text{м}^2$ ;  $V$  - швидкість руху скребків,  $\text{м/сек}$ ;  $\gamma$  - насипна маса корисної копалини,  $\text{т/м}^3$ .

Пластинчасті конвеєри складаються з привода, натяжного пристрою, несучої стрічки яка виготовлена з металевих пластин, шарнірних ланцюгів, роликів, зірочок приводного пристрою. Основна перевага - можливість застосування для криволінійних виробок. Недоліки (металомісткість та енергоємність, складність конвеєра, невисока надійність) зменшують їх широке використання.

### ***3.3 Порядок виконання роботи***

1. Ознайомитися з короткими теоретичними відомостями по вивченню будови, принципів дії та технічних характеристик електропривода конвеєрного транспорту.
2. Відповісти на контрольні питання.
3. Оформити звіт відповідно до вимог захисту та виконання лабораторної роботи.
4. Зробити висновок про виконану роботу.

### ***3.4 Контрольні питання***

1. Пояснити та зобразити блок-схему скрепового конвеєру.
2. Пояснити принцип дії та класифікацію стрічкових конвеєрів.
3. Будова та принцип дії приводу стрічкового конвеєра та барабану.
4. Охарактеризувати пластинчасті конвеєри у порівнянні з іншими видами конвеєрів.

## **ЛАБОРАТОРНА РОБОТА № 4**

**Тема:** Дослідження роботи газового лазера

**Мета:** ознайомити здобувачів початкового рівня вищої освіти з принципом дії та будови газового лазера

### ***4.1 Теоретичні відомості***

Світлові промені високої інтенсивності, сфокусовані за допомогою системи дзеркал або лінз, дозволяють отримати у фокусі дуже високі температури (до 4000 К). Як джерело випромінювання може бути використане сонце, електрична дуга, вольфрамові нитки лампи розжарювання, вугільні та графітові нагрівачі, газорозрядні лампи високого тиску та плазмові вимикачі. Світлова енергія високої концентрації

використовується в технологічних цілях для обробки отворів, зварювання, термообробки, різання матеріалів та інших цілей. Однак такі оптичні печі не набули широкого розповсюдження в промисловості через складність і малу ККД. Становище змінилося, коли на початку 60-х років ХХ ст. були створені джерела світла іншого типу, що отримали назву оптичних квантових генераторів (ОКГ) або лазерів.

Унікальність властивостей лазерного випромінювання:

1. Мінімальна розбіжність променя.
2. Висока міра когерентності.
3. Висока міра монохроматичності.
4. Здатність до концентрації енергії у часі та просторі.

Все це зумовило широке застосування ОКГ у багатьох галузях науки і техніки.

Газовий лазер (г. л.) - лазер з газоподібним активним середовищем. Трубка з активним газом вміщується в оптичний резонатор, що в простому випадку складається з двох паралельних дзеркал, одне з яких є напівпрозорим.

Випущена в якому-небудь місці трубки світлова хвиля при розповсюдженні її через газ посилюється за рахунок актів вимушеного випускання, що породжують лавину фотонів. Дійшовши до напівпрозорого дзеркала, хвиля частково проходить через нього.

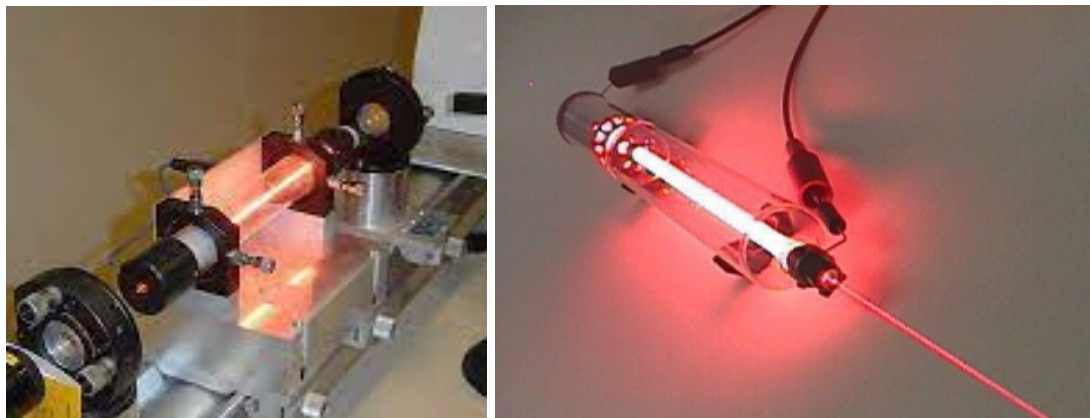


Рис. 4.1 – Зображення газового лазера

Ця частина світлової енергії випромінюється зовні. Інша ж частина відбивається від дзеркала і дає початок новій лавині фотонів. Всі фотони ідентичні по частоті, фазі і напрямку розповсюдження. Завдяки цьому випромінювання лазера може мати надзвичайно велику монохроматичність, потужність і різку спрямованість.

Практичне застосування лазери отримали в основному в двох напрямках: перший напрямок пов'язують з застосуваннями, в яких лазерне випромінювання, високої потужності використовується для цілеспрямованого впливу на речовину. Сюди відносять лазерну обробку матеріалів (наприклад, зварювання, термообробку, різання, пробивання отворів), лазерне розділення ізотопів, застосування лазерів в медицині і т. д; другий напрямок пов'язують з так званими інформативними застосуваннями лазерів - для передачі та обробки інформації, для здійснення контролю і вимірів.

Фізичні основи генерації оптичного випромінювання розглянемо у наближенні дворівневої схеми. Нехай макроскопічна система складається із  $N$  однакових частинок (атомів, молекул). Кожен з атомів системи може перебувати або в стаціонарному стані з енергією  $E_1$ , або у стаціонарному стані з енергією  $E_2$ , т. е. енергетична система кожного з атомів системи має вигляд, представлений на рис. 4.2.

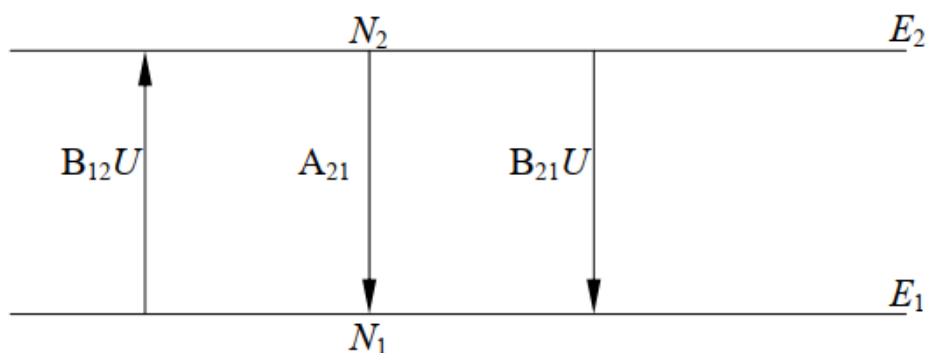


Рис. 4.2 – Стан системи атомів генерації оптичного випромінювання

Нехай  $N_1$  атомів в даний час мають енергію  $E_1$ , а  $N_2 = N - N_1$  – енергію  $E_2$ . Тоді  $N_1$  – населеність першого, основного рівня,  $N_2$  – населеність другого, збудженого рівня. Якщо розглянута система знаходиться в термодинамічній рівновазі з навколишнім середовищем, то співвідношення населення описується розподілом Больцмана:

$$\frac{N_2}{N_1} \approx e^{-\frac{E_2 - E_1}{kT}}$$

де  $T$  – температура,  $k = 1,38 \cdot 10^{-23}$  Дж;  $k$  – постійна Больцмана.

Як видно з формули, у разі термодинамічної рівноваги за будь-яких значень температури  $N_2 < N_1$ . Якщо  $N_2 > N_1$ , то таке співвідношення населення є інверсним (інверсна населеність). Стан системи у разі є нерівноважним.

Згідно з квантовою теорією випромінювання Ейнштейна, між рівнями 1 і 2 можуть спостерігатися оптичні переходи трьох типів:

1. Спонтанні (самовільні) переходи ( $2 \rightarrow 1$ ) із збудженого стану в основний із випромінюванням кванта світла з частотою:

$$\nu_{21} = \frac{E_2 - E_1}{h},$$

2. Вимушені переходи ( $2 \leftarrow 1$ ) з основного стану до збудженого, що відбуваються в результаті поглинання зовнішнього випромінювання з частотою:

$$\nu_{12} = \frac{E_2 - E_1}{h},$$

3. Вимушені переходи ( $2 \rightarrow 1$ ) із збудженого стану в основне з випромінюванням світла з частотою, що розраховується за формулою (Спонтанні (самовільні) переходи), що відбуваються в результаті збудження на систему зовнішнього випромінювання тієї ж частоти, що й частота випромінювання.



Спонтанні переходи у різних атомах системи протікають незалежно друг від друга. Внаслідок цього фотони, випущені в результаті спонтанних переходів, нескорелювані між собою за напрямом, фазою та поляризацією. Навпаки, фотони, випущені в результаті вимушених переходів, за напрямом, фазою і поляризацією ідентичні фотонам зовнішнього випромінювання, що змушує. У цьому полягає основна відмінність спонтанних та вимушених переходів. Частота фотона, що випускається, не залежить від типу переходу, оскільки вона визначається лише різницею комбінуючих рівнів:

$$\Delta E = E_2 - E_1,$$

Квантові переходи в різних атомах системи випадкові часу, їх кількісного описи вводиться поняття ймовірності переходу. Число спонтанних переходів  $2 \rightarrow 1$  за час  $dt$  пропорційно населеності збудженого рівня в даний момент часу  $N_2(t)$  та інтервалу часу  $dt$ . Зміна населеності збудженого рівня  $dN_2$  обумовлена наявністю спонтанних переходів, дорівнює кількості цих переходів. Тоді:

$$dN_2 = -A_{21} \cdot N_2(t)dt,$$

Коефіцієнт пропорційності  $A_{21}$  називається ймовірністю спонтанного переходу даної системи чи коефіцієнтом Ейнштейна для спонтанних переходів. Розмір ймовірності спонтанних переходів неоднакова щодо різних переходів у реальної багаторівневої квантової системі (атомі, молекулі) і від властивостей даної системи. Наприклад, для різних переходів в атомі

$$A = 10^8 - 10^{-2}, \text{ c}^{-1}$$

Зміну населеностей рівнів, обумовлену наявністю вимушених переходів, можна записати як:

$$dN_2 = -B_{21}IN_2(t)dt + B_{12}IN_1(t)dt;$$

$$dN_1 = B_{21}IN_2(t)dt - B_{12}IN_1(t)dt,$$

де  $B_{12}$  та  $B_{21}$  - коефіцієнти Ейнштейна для вимушених переходів з поглинанням та випромінюванням, відповідно;  $I$  - об'ємна щільність енергії

зовнішнього (вимушеного) випромінювання;  $B_{12}I$  і  $B_{21}I$  - імовірності вимушених переходів з поглинанням і випромінюванням.

Розглянемо у наближенні дворівневої схеми процеси поглинання посилення світла. Інтенсивність світла, що пройшло через речовину, пов'язана з інтенсивністю падаючого на речовину випромінювання за законом Бугера:

$$I = I_0 e^{-x\alpha},$$

де  $I_0$  та  $I$  – інтенсивності плоскої монохроматичної світлової хвилі на вході в шар поглинаючої речовини товщиною  $\alpha$  і на виході з нього;  $x$  – лінійний коефіцієнт поглинання світла речовиною.

Якщо  $N_2$  не дорівнює 0, то під дією падаючого випромінювання, крім переходів із поглинанням фотонів, відбуватимуться і вимушені переходи з випромінюванням. Так як вимушено випущені фотони не відрізняються від фотонів падаючого світла, відбувається часткова компенсація убитку фотонів в минулому пучку.

Експериментально вимірюваний коефіцієнт поглинання пропорційний різниці населення основного та збудженого рівнів при  $B_{12} = B_{21}$ :

$$x = \frac{h\nu_{21}}{C} \cdot (N_1 B_{12} - N_2 B_{21}),$$

Це також справедливо і для не вироджених рівнянь:

$$x = \frac{h\nu_{21}}{C} \cdot B_{12} (N_1 - N_2),$$

Розглянемо три випадки:

1.  $N_2 < N_1$  число вимушених переходів з випромінюванням меншого числа поглинальних переходів  $x > 0, 1 < I_0$  Спостерігається поглинання світла.

2. При збільшенні об'ємної щільності падаючого випромінювання  $I$ , коли спонтанними переходами можна знехтувати, відбувається вирівнювання

населення основного і збудженого рівнів. Це призводить до зменшення коефіцієнта поглинання.

При  $N_2=N_1$  вимушені переходи з випромінюванням повністю компенсують спад фотонів у минулому пучку, обумовлений поглинальними переходами. У цьому випадку  $x = 0,1$ ,  $I = I_0$ . Середовище не поглинає світла. Звідси впливає також принципова неможливість створення інверсної заселеності у дворівневій системі при оптичному збудженні.

3. Нехай у системі якимось способом (не оптичним) створено інверсну населеність  $N_2>N_1$ . Вимушені переходи з випромінюванням переважають над поглинальними переходами. Це призводить до того, що  $I > I_0$ , тобто спостерігається посилення світла. Для опису цього процесу вводиться поняття негативного коефіцієнта поглинання:

$$x = \frac{h\nu_{21}}{C} \cdot B_{12}(N_1 - N_2) \leq 0,$$

або коефіцієнт поглинання:

$$x_{yc} = -x = \frac{h\nu_{21}}{C} \cdot B_{12}(N_2 - N_1),$$

Принцип дії ОКГ. Основними елементами ОКГ є активне середовище (середовище з інверсною населеністю) та резонатор. Найпростіший оптичний резонатор і двох плоских паралельних дзеркал, одне з яких повністю відбиває випромінювання, друге є частково прозорим (рис. 4.3).

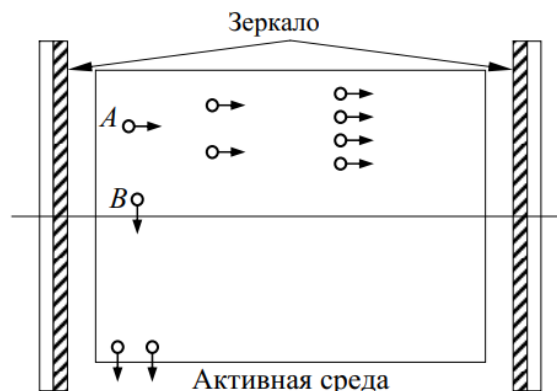


Рис. 4.3 – Оптичний резонатор

Середовище з інверсною населеністю здатне когерентно посилювати випромінювання «затравкою», для процесу генерації служить спонтанне випромінювання фотонів атомами середовища. Фотони, розповсюджуючись в активному середовищі, викликають вимушені переходи з випромінюванням в інших збуджених атомах. Вторинні фотони за напрямом розповсюдження, фазою та поляризацією збігаються з первісними. Таким чином, в активному середовищі відбувається когерентне посилення світлового потоку. Нехай збуджені атоми, розташовані в точках А і В, випромінюють фотони в результаті спонтанного переходу  $2 \rightarrow 1$ . Чим більший шлях, що проходить фотонами в активному середовищі, тим більше посилення. Для напрямків, перпендикулярних до осі резонатора, посилення виявляється найменшим, для спрямування вздовж осі – найбільшим.

На рис. 4.3 це схематично показано збільшенням числа стрілок у світлових потоках, що посилюються. Дійшовши до напівпрозорого дзеркала, світловий потік частково відобразиться, частково пройде крізь дзеркало назовні. При поширенні відбитої частини фотонів в активному середовищі відбувається подальше посилення світлового потоку. Після відбиття від другого дзеркала процес повторюється і фотони, що проходять крізь напівпрозоре дзеркало, утворюють промінь, що виходить з лазера. Для отримання стаціонарної генерації необхідно, щоб посилення на шляху, пройденому фотонами між двома відображеннями, компенсувало відповідні втрати (дифракція, розсіювання та поглинання в середовищі резонатора, втрати при відображенні від дзеркал).

У газовому лазері робочим тілом є гази або суміші газів (Ar, CO<sub>2</sub>, CO<sub>2</sub>N<sub>2</sub>He). Досить широкого поширення набули гелій-неонові лазери. Вони випромінюють монохроматичний пучок потужністю до кількох десятків міліватів, працюють в імпульсному та безперервному режимах, прості та порівняно безпечні в експлуатації. Принципова схема гелій-неонового ОКГ зображено на рис. 4.4.

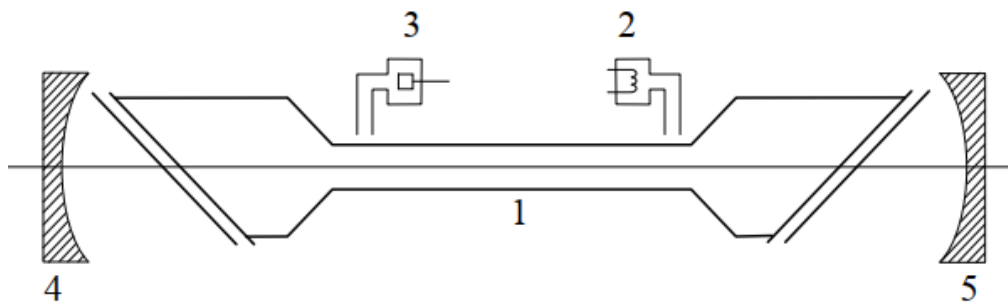


Рис. 4.4 – Гелій-неоновий лазер: 1 - газорозрядна скляна трубка, діаметром кілька міліметрів та завдовжки від кількох десятків сантиметрів до 1,5 м і більше; 2 - катод, що розжарюється низьковольтним джерелом живлення; 3 - анод; 4 та 5 - дзеркала резонатора

Напруга між анодом і катодом 1-2,5 кВ, розрядний струм становить кілька міліампер. Тиск гелію в трубці приблизно дорівнює 1 мм рт. ст., тиск неону – 0,1 мм рт. ст.

За генерацію лазерного випромінювання відповідальні атоми неону (рис. 4.5). Генерація може розвиватися в каналах 2-1 ( $\lambda = 1150$  нм), 3-1 ( $\lambda = 632,8$  нм) або 3-4 ( $\lambda = 3390$  нм). Заселення рівнів 2 і 3 здійснюється шляхом непружних зіткнень з електронами газорозрядної плазми та збудженими атомами гелію.

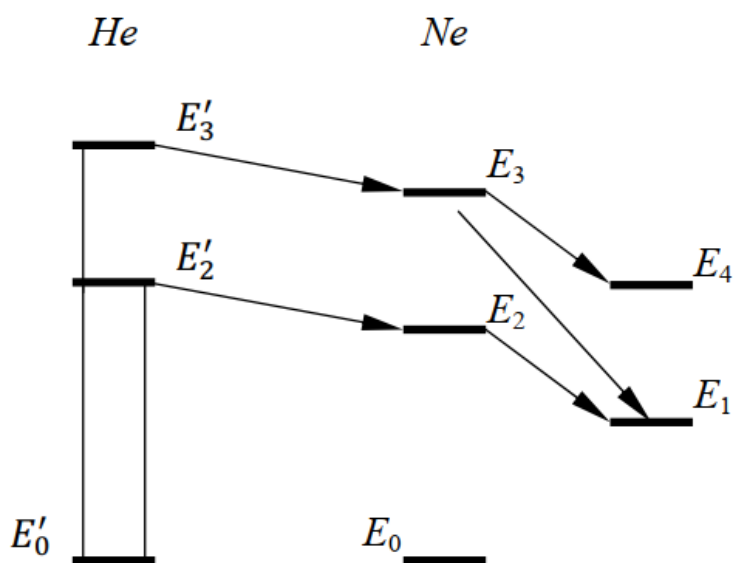


Рис. 4.5 – Рівні лазерного випромінювання

Численні варіанти гелій-неонового лазера знайшли дуже різноманітні застосування в біологічних дослідженнях, в системах лазерного зв'язку, в голографії, машинобудуванні та багатьох інших галузях природознавства та техніки.

#### ***4.3 Порядок виконання роботи***

1. Ознайомитися з короткими теоретичними відомостями по вивченню будови, принципів дії та технічних характеристик газового лазера.
2. Відповісти на контрольні питання.
3. Оформити звіт відповідно до вимог захисту та виконання лабораторної роботи.
4. Зробити висновок про виконану роботу.

#### ***4.4 Контрольні питання***

1. Який газ використовується у лазерах?
2. Як працюють газові лазери?
3. Навіщо потрібен газовий лазер?
4. Що таке лазер простою мовою?
5. Будова та принцип дії газового лазера?

### **ЛАБОРАТОРНА РОБОТА № 5**

**Тема:** Дослідження роботи частотного перетворювача електродвигунів

**Мета:** ознайомити здобувачів початкового рівня вищої освіти з принципом дії та будови частотного перетворювача, його особливостей

#### ***5.1 Теоретичні відомості***

Застосування перетворювачів енергії в електроприводі обумовлене в основному необхідністю регулювання швидкості обертання електродвигунів.

У більшості первинних джерел електроенергії (промислова та побутова мережі змінного струму, контактна мережа електротранспорту, акумулятор) рівень вихідної напруги та його частота є незмінними. Зміна швидкості обертання двигуна постійного струму звичайно здійснюється шляхом зміни рівня напруги, що подається до обмотки якоря. Для цього поміж двигуном та живильною мережею вмикають спеціальний перетворювач електричної енергії – керований випрямляч. При застосуванні двигунів змінного струму з тією ж метою використовують перетворювачі частоти (ПЧ, частотні перетворювачі, «частотники»). Саме такі перетворювачі останніми роками розвивалися найбільш динамічно і фактично змінили лице сучасного електропривода.

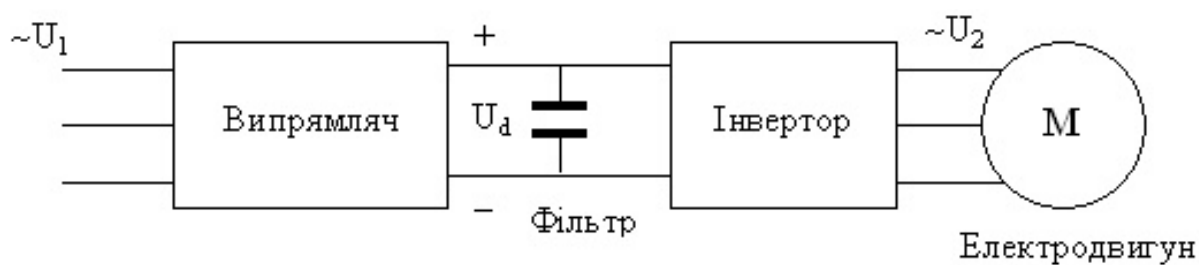


Рис. 5.1 – Загальна структура перетворювача частоти

Більшість сучасних перетворювачів частоти мають два каскади перетворення енергії та складаються з випрямляча, згладжувального фільтра та інвертора (рис. 5.1). Випрямляч перетворює енергію змінного струму на енергію постійного струму, фільтр згладжує пульсації вихідної напруги випрямляча, а інвертор здійснює зворотне перетворення, перетворюючи енергію постійного струму на енергію змінного струму, проте з регульованими рівнем напруги та його частотою.

Випрямлячі частоти. У більшості випадків випрямляч живиться від трифазної мережі змінного струму, проте ми розглянемо принцип його дії на прикладі однофазного випрямляча, що використовується в малопотужних

перетворювачах частоти (рис. 5.2). Процеси у випрямлячі показані на рис. 5.3.

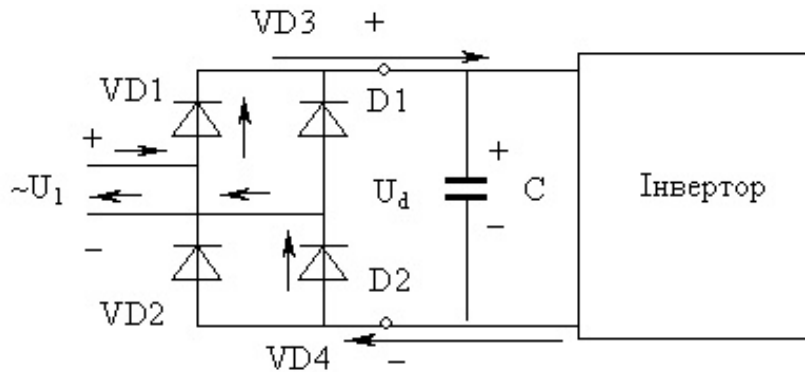


Рис. 5.2 – Схема однофазного випрямляча

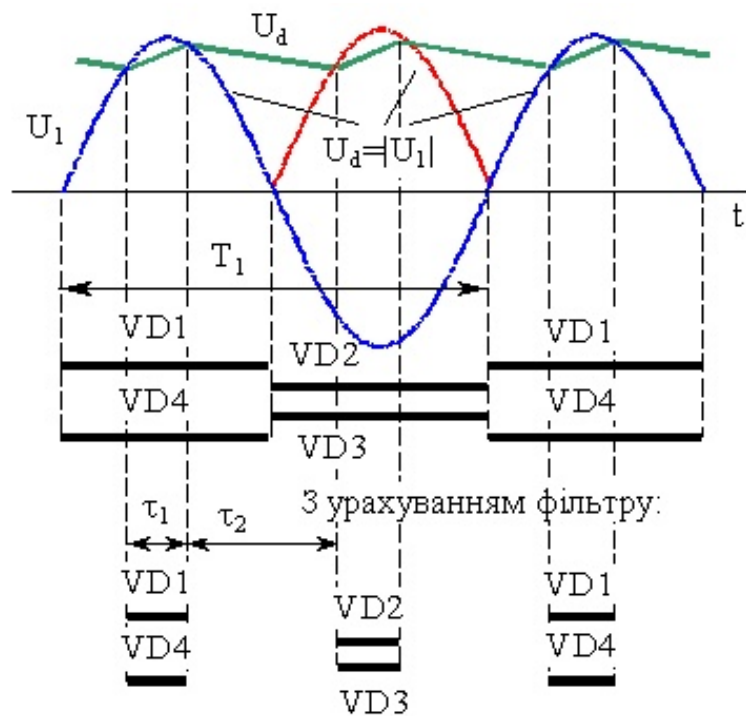


Рис. 5.3 – До принципу дії випрямляча

Випрямляч складається з 4 діодів VD1...VD4. Напряга джерела живлення  $U_1$  знакозмінна синусоїдальна, що змінюється з частотою  $f_1=50$  Гц (синя лінія на рис. 5.3). Для відкриття діода необхідно, щоб до його аноду (нижня клемма діода на рис. 5.2) був прикладений позитивний потенціал, а до катоду (верхня клемма) – від’ємний. Тому, живильна напруга позитивна



(полярність позначена на рис. 5.2), можуть відкритися лише діоди VD1 та VD4.

Якби конденсаторний фільтр C був відсутній, струм протягом половини періоду T1 протікав би від позитивного полюсу джерела U1 діодом VD1, інвертором, діодом VD4 до від'ємного полюсу джерела (за стрілкою на рис. 5.2). При цьому на вихід випрямляча через відкриті діоди подавалася б напруга, що чисельно дорівнює  $U_d=U_1$  (на вихідній клемі D1 випрямляча наявний позитивний потенціал, на клемі D2 – від'ємний). На другій половині періоду, коли полярність напруги живлення від'ємна, відкриваються діоди VD2 та VD3. До виходу випрямляча через них надходить напруга зі входу, але з протилежним знаком (червона лінія  $U_d=U_1$  на рис. 5.2). Завдяки цьому, не зважаючи на зміну знаку напруги живлення, полярність напруги на клемі D1 та D2 не змінюється, а форма його в функції часу має вигляд випрямленої синусоїди.

Якщо врахувати наявність на виході випрямляча конденсаторного фільтра C, характер процесів буде дещо іншим. Конденсатор заряджений від випрямляча з полярністю, вказаною на рис. 5.2. Доки напруга на конденсаторі менша від напруги мережі U1, протягом часу  $\tau_1$  триває дозарядження конденсатора через якусь пару діодів (залежно від полярності U1). Як тільки напруга на конденсаторі (зелена лінія на рис. 5.3) сягне рівня напруги мережі, діоди закриваються, а конденсатор розряджається на інвертор (інтервал часу T2). Наявність конденсатора зменшує пульсації випрямленої напруги та збільшує його середнє значення. Це позитивно впливає на роботу інвертора.

Частотний інвертор. До обмоток електродвигуна змінного струму має подаватися знакозмінна напруга з середнім за період значенням, що дорівнює нулю. Найчастіше використовують трифазні двигуни, що мають три обмотки статора. Тому і інвертор має бути трифазним та перетворювати знакопостійну вхідну напругу на три знакозмінні вихідні. Ми, проте,

розглянемо більш простий однофазний інвертор, на виході якого формується лише одна знакозмінна напруга. Спрощена схема інвертора наведена на рис. 5.4.

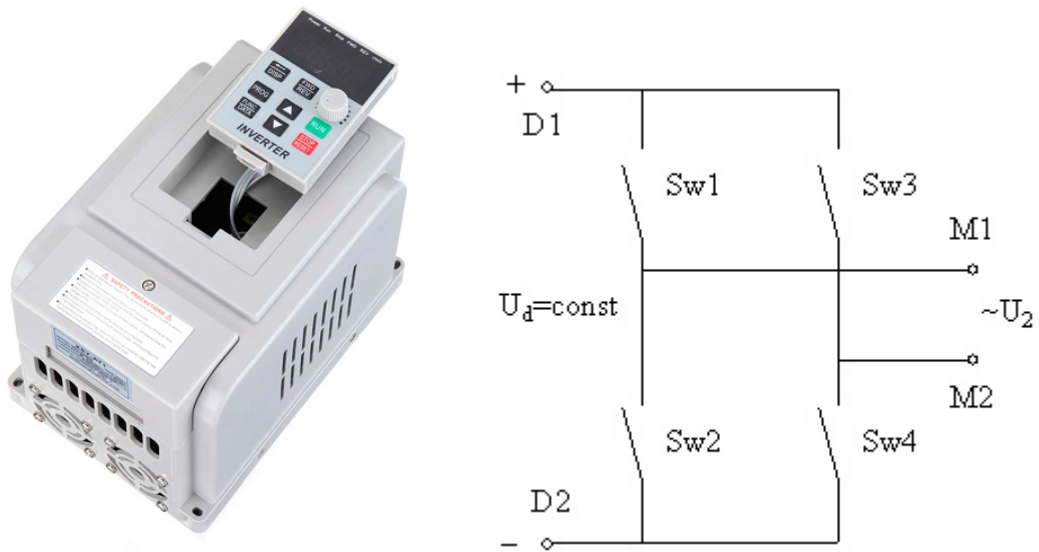


Рис. 5.4 – Силова схема інвертора

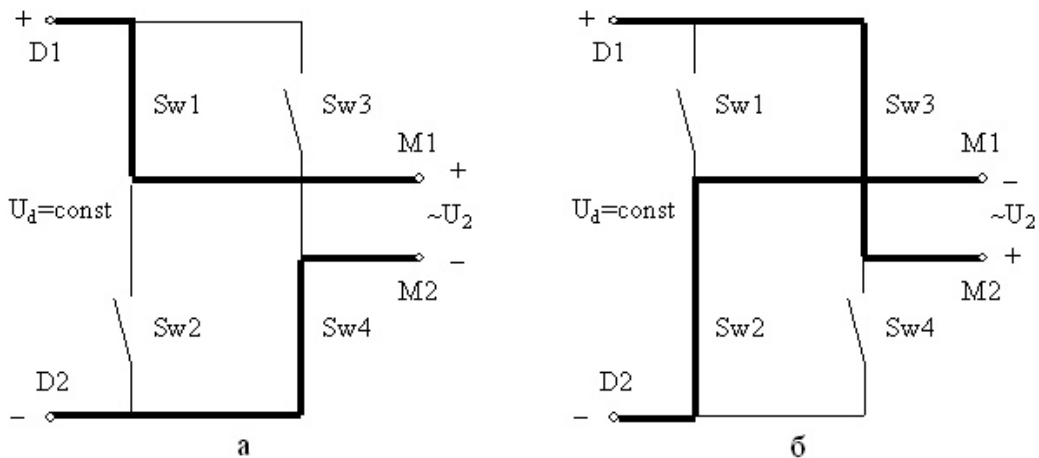


Рис. 5.5 – Стани інвертора (а - увімкнуті Sw1 та Sw4; б - увімкнуті Sw2 та Sw3)

До вхідних клем D1 та D2 подано незмінну напругу  $U_d$  з виходу випрямляча. Керовані напівпровідникові ключі Sw1...Sw4 (звичайно транзисторні або тиристорні) замикаються попарно по чергову (Sw1 із Sw4

або Sw2 із Sw3). Кожна пара ключів підключає вихідні клеми інвертора M1 і M2 до виходу випрямляча з тією чи іншою полярністю (рис. 5.5). Завдяки цьому на виході інвертора формується знакозмінна напруга  $U_2$ , хоча на вході напруга знаку не міняє. Оскільки тривалості роботи пар ключів однакові, позитивні півперіоди ідентичні від'ємним, а середня за період  $T_2$  напруга дорівнює нулю (рис. 5.6, а). Таким чином, інвертор виконує функцію своєрідного перемикача. Змінюючи одночасно тривалості роботи ключів, можна отримати на виході інвертора напругу іншої частоти (рис. 5.6, б).

Звичайно для двигунів змінного струму потрібна одночасна зміна частоти та рівня напруги живлення. Цю задачу може виконати той самий інвертор, якщо на кожному півперіоді його вихідної напруги ввести паузи (одну або декілька, як на рис. 5.7). Доки увімкнені ключі Sw1, Sw3 або Sw2, Sw4, вихідні клеми M1 та M2 інвертора замкнені через них накоротко, а його вихідна напруга  $U_2 = 0$ . Змінюючи тривалість пауз  $\tau$ , можна змінювати середню за півперіод вихідну напругу. У реальних інверторах подібних пауз набагато більше, а їхня тривалість змінюється протягом півперіоду за синусоїдальним законом (так звана широтно-імпульсна модуляція).

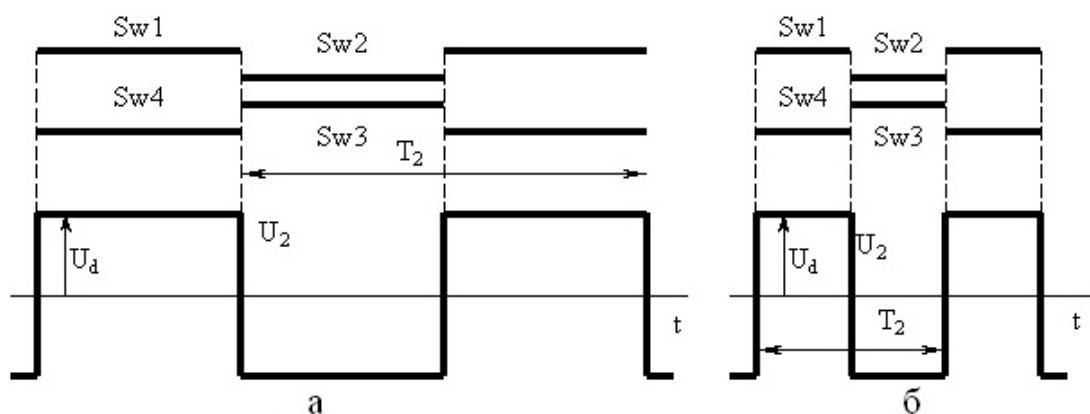


Рис. 5.6 – Вихідні напруги інвертора різної частоти

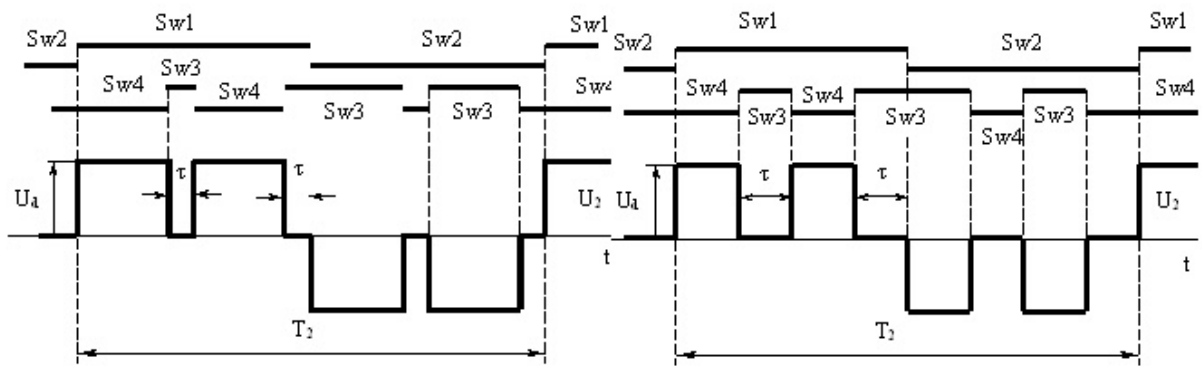


Рис. 5.7 – Спосіб зменшення вихідної напруги інвертора



Рис. 5.8 – Перетворювачі частоти малої потужності

Сучасні перетворювачі частоти різноманітні за рівнем потужності: від крихітки потужністю в кількасот ват, що вміщується у долоні (рис. 5.8, а), до перетворювача мультимегаваттного класу, що потребує для розміщення спеціального приміщення (рис. 5.9). Розрізняються вони також за призначенням та функціональними можливостями (для насосів і вентиляторів, підйомних кранів та ліфтів, побутової техніки). Для спрощення монтажу та експлуатації невеличкі перетворювачі частоти спеціальної конструкції встановлюють безпосередньо на електродвигун (рис. 5.8, б). Перетворювач малої потужності зі знятою кришкою показаний на рис. 5.10.

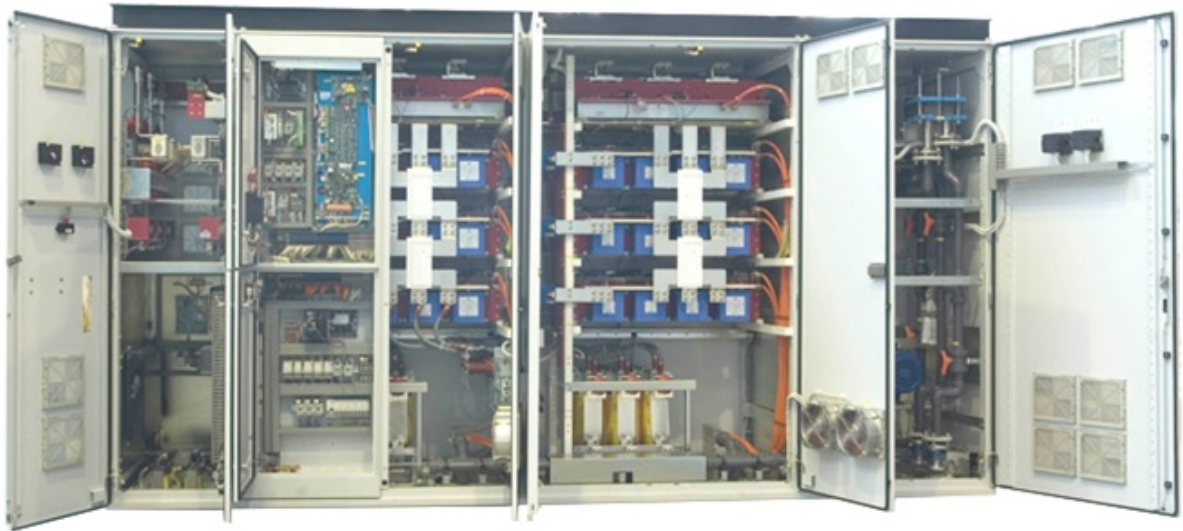


Рис. 5.9 – Потужний перетворювач частоти у вигляді шафи

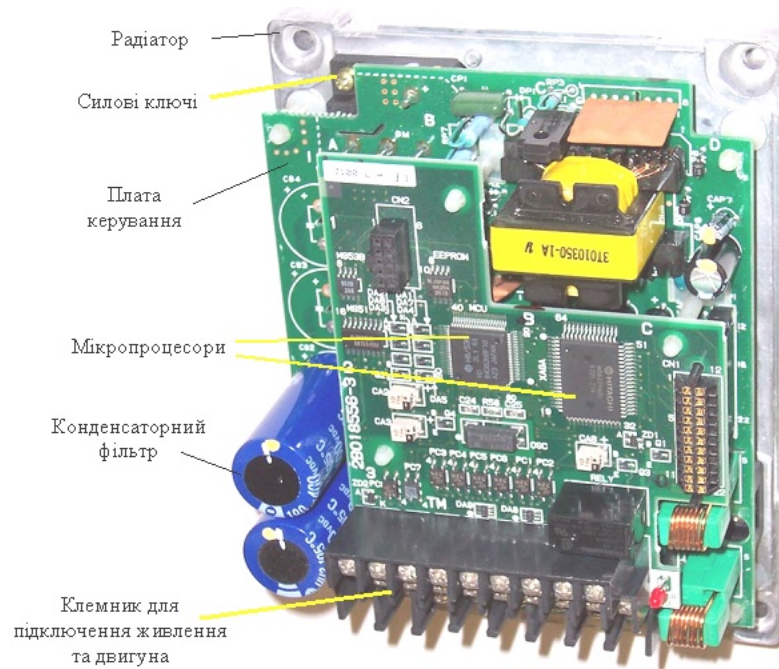


Рис. 5.10 – Перетворювач частоти зі знятою кришкою

Розглянемо частотний перетворювач більш детально, а саме на прикладі асинхронного частотного перетворювача частоти.

Асинхронний перетворювач частоти являє собою двомашинний агрегат, призначений для перетворення трифазної системи напруг та струмів

з частотою  $f_1$  в трифазну систему з іншими значеннями напруги та струмів з частотою  $f_2$ .

Схема підключення асинхронного перетворювача частоти до електромережі показано на рис. 5.11.

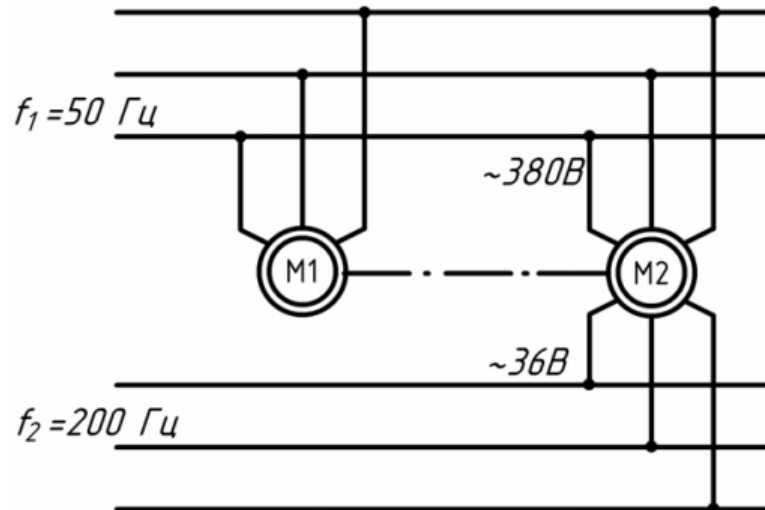


Рис. 5.11 – Схема асинхронного перетворювача частоти

Такі перетворювачі підвищеної частоти можуть бути зокрема джерелом живлення індукційних плавильних і нагрівальних установок малої та середньої потужності.

Перетворювач частоти складається з двох трифазних асинхронних машин, одна з яких, яка використовується як приводний двигун M1, має короткозамкнений ротор, а друга, M2, що працює як перетворювач частоти, має фазний ротор з контактними кільцями. Обидві машини мають загальний вал і поміщені в один корпус.

При нерухомому електродвигуні M1 магнітне поле, що обертається, статора перетворювача M2, перетинаючи обмотки свого статора і ротора, буде наводити в них ЕРС  $E_1$  і  $E_2$  однієї і тієї ж частоти  $f_1$ . Отже, перетворювач частоти працюватиме аналогічно трифазному трансформатору. Якщо приводний двигун M1 обертає ротор машини M2 зі швидкістю  $n_2$ , то

частота ЕРС Е2 в обмотці ротора зміниться і стане відмінною від  $f_1$ , внаслідок зміни швидкості обертання поля статора машини М2 по відношенню до ротора, що обертається. Відносна швидкість магнітного поля, що обертається, буде:

$$n = n_1 + n_2,$$

де  $n_1$  - швидкість обертання поля статора перетворювача М2;

При відносній швидкості  $n$  у роторі перетворювача М2 наводитиметься ЕРС Е2 з частотою:

$$f_2 = f_1 \cdot \left( 1 \pm \frac{n_2}{n_1} \right),$$

причому знак плюс відповідає обертанню ротора перетворювача М2 проти поля статора, а знак мінус їх узгодженому обертанню. Так як асинхронний перетворювач використовується зазвичай для підвищення частоти, то у зазначеній формулі ( $f_2$ ) зазвичай вказується лише один знак – плюс і вона після невеликих перетворень набуває вигляду:

$$f_2 = f_1 \cdot \left( \left( 1 \pm \frac{p_2}{p_1} \right) \cdot (1 - s) \right),$$

де  $p_1$  – число пар полюсів двигуна;  $s$  – ковзання ротора двигуна М1;  $p_2$  – число пар полюсів перетворювача М2;  $f_1$  – частота мережі живлення (50 Гц).

При роботі перетворювача частоти повна потужність його ротора Р2 складається з електромагнітної потужності Р1,2 передається обертовим магнітним полем зі статора на ротор і потужності Р2', підведеної до ротора перетворювача М2 через вал від електродвигуна М1:

$$P_2 = P_{1,2} + P_2',$$

Таким чином, вихідна потужність ротора перетворювача на підвищеній

частоті  $f_2$  створюється за рахунок перетворення потужності статора і за рахунок потужності двигуна М1.

Як показують дослідження, співвідношення потужностей  $P_{1,2}$  і  $P_2'$  визначається виразом:

$$\frac{P_{1,2}}{P_2'} = \frac{1}{\frac{f_2}{f_1} - 1},$$

Приблизна крива залежності відношення  $P_{1,2}/P_2'$  від відносної зміни частоти  $f_2$  показана на рис. 5.12.

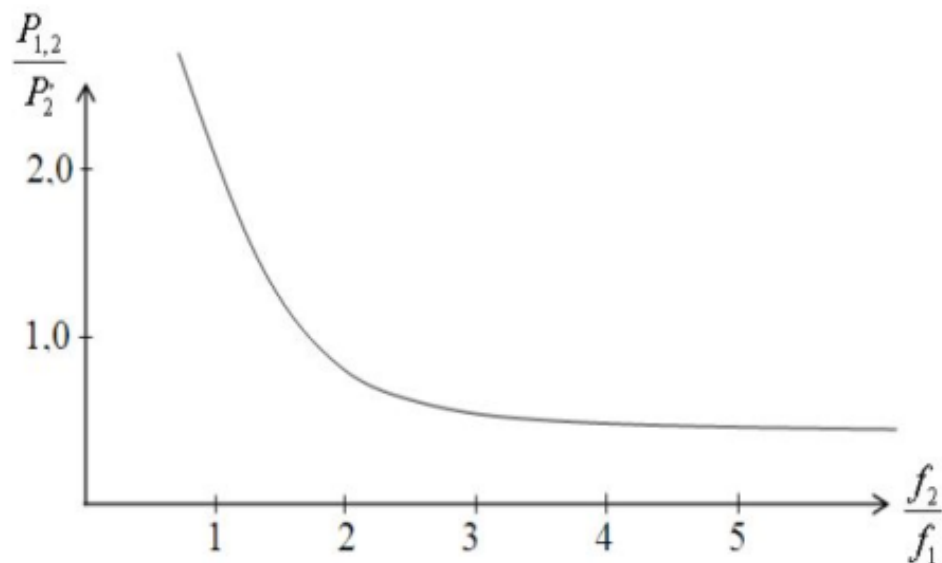


Рис. 5.12 – Зміна співвідношення потужностей  $P_{1,2}/P_2'$  при зміні частоти  $f_2$

Крива на рис. 5.12 показує, що при зростанні частоти  $f_2$  і незмінній частоті мережі  $f_1$ , частка потужності, одержувана перетворювачем М2 від двигуна М1, зростає, а частка потужності, що передається ротору зі статора перетворювача магнітним полем, що обертається, зменшується.

З рівняння ( $P_2$ ) та ( $P_{1,2}/P_2'$ ) може бути знайдено вираз для потужності приводного асинхронного двигуна М1:



$$P_2' = P_2 \cdot \left(1 - \frac{f_1}{f_2}\right),$$

і для потужності, що передається магнітним полем статора перетворювача на ротор:

$$P_{1,2} = P_2 \cdot \frac{f_1}{f_2},$$

Відповідно до виразів на рис. 5.13 наведено криві, що визначають відсоткове співвідношення величин потужностей  $P_2'$  та  $P_{1,2}$  залежно від кратності  $f_2$  по відношенню до частоти мережі  $f_1$ .

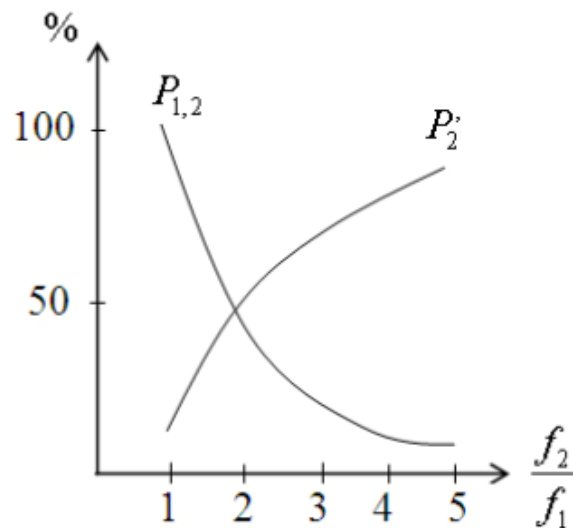


Рис. 5.13 – Відсоткове співвідношення величин потужностей  $P_2'$  та  $P_{1,2}$  залежно від співвідношення  $f_2/f_1$

Про загальні властивості перетворювача частоти, найбільш доцільні режими роботи судять за його робочими характеристиками:

$$I_1 = f(P_2); P_1 = f(P_2); \cos \varphi_1 = f(P_2);$$

$$\eta = f(P_2); U_2 = f(P_2); f_2 = f(P_2);$$

При  $U_1 = const; f_1 = const; \cos \varphi_2 = const$ , де величини з індексом «1» відносяться до мережі з частотою  $f_1$ , а з індексом «2» – до мережі із частотою  $f_2$ .

### ***5.3 Порядок виконання роботи***

1. Ознайомитися з короткими теоретичними відомостями по вивченню будови, принципів дії та технічні характеристики частотного перетворювача.
2. Відповісти на контрольні питання.
3. Оформити звіт відповідно до вимог захисту та виконання лабораторної роботи.
4. Зробити висновок про виконану роботу.

### ***5.4 Контрольні питання***

1. Який пристрій називається перетворювачем частоти і яке його призначення?
2. Чому частотне регулювання кількості обертів асинхронного двигуна є найбільш ефективним?
3. Чому регулювання частоти та напруги двигуна повинно здійснюватись за певним співвідношенням? Як називається це співвідношення?
4. Яка конструкція перетворювача є найбільш доцільною і чому: з підведенням напруги живлення промислової частоти до статора та підключенням навантаження до обмоток ротора чи навпаки?

## **ЛАБОРАТОРНА РОБОТА №6**

**Тема:** Дослідження роботи електроустаткування печей опору

**Мета:** ознайомити здобувачів початкового рівня вищої освіти з конструкцією печей непрямої дії, нагрівальних елементів та датчиків температури

### ***6.1 Теоретичні відомості***

Печі нагріву методом електричного опору є широким класом пристроїв, які застосовуються для сушіння, термообробки та плавки різних виробів. Розрізняють ЕПСпрямоїінепрямоїдії. У перших тепло виділяється безпосередньо в тілі, що нагрівається при протіканні через нього електричного струму, у других – тепло виділяється в спеціальних нагрівальних елементах і передається об'єкту нагріву випромінюванням, конвекцією і теплопровідністю. ЕПС непрямої дії є камерою, що складається з вогнетривкої цегли, що утворює робочий простір печі, та теплоізоляційного шару, що слугує для зменшення теплових втрат. Кладка печі поміщена в металевий кожух. У робочому просторі розміщуються нагрівальні елементи. Вони діляться на низько-, середньо- та високотемпературні.

**Низькотемпературні печі** (до 400°C) використовуються в технологічних процесах сушіння та відпуску сталевих виробів, нагріву під термічну та механічну обробку кольорових металів та сплавів та для плавки легкоплавких металів.

**Середньотемпературні** (до 1200°C) ЕПС застосовують для загартування, відпустки, нормалізації, цементації, спікання, нагрівання під кування, штампування, прокатування, пресування та інших технологічних процесів.

**Високотемпературні** (до 1250°C) призначені для дегазації, рафінування, термообробки тугоплавких металів і сплавів, виворачування монокристалів та їх обробки, нагрівання тугоплавких металів та сплавів перед пластичною деформацією.

За конструктивними ознаками та характером технологічного циклу ЕПС буваютьперіодичногоібезперервної дії. У печах **періодичеської дії** вироби завантажуються в камеру і поступово нагріваються в ній, залишаючись нерухомими. У кожний момент часу температура всіх точок пічної камери приблизно однакова (рис. 6.1).

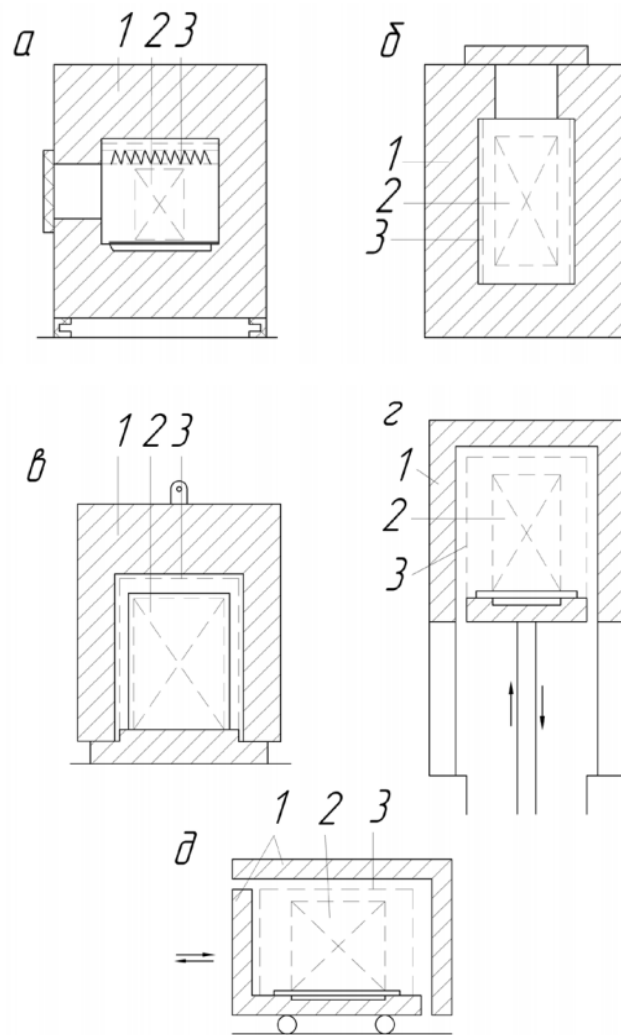


Рис. 6.1 – Основні типи печей опору періодичної дії: а - камерна; б - шахтна; в - ковпакова; г - елеваторна; д - з висувним подом; 1 - кладка печі, 2 - садок, 3 - нагрівачі

У печах **непреривної дії** виробу завантажуються з одного кінця печі і, поступово але переміщаючись уздовж неї, виходять з іншого кінця нагрітими до заданої температури. У таких печах температура підвищується від завантажувального кінця до розвантажувального печі, залишаючись незмінною в часі в кожній точці (рис. 6.2).

**Нагрівальні елементи (НЕ)** виготовляють із жаростійких матеріалів із високим питомим опором. Розрізняють металеві, металокерамічні та карборундові НЕ.

Металокерамічні та карборундові НЕ застосовують у високотемпературних ЕПС. Металеві НЕ – у низькотемпературних. За конструкцією вони діляться на зигзаг дротяний або стрічковий та спіраль (рис. 6.3). Оптимальною конструкцією НЕ з точки зору терміну служби є дротяний зигзаг. Але зигзаг через низький електричний опір підключають через понижуючі трансформатори, що призводить до додаткових втрат.

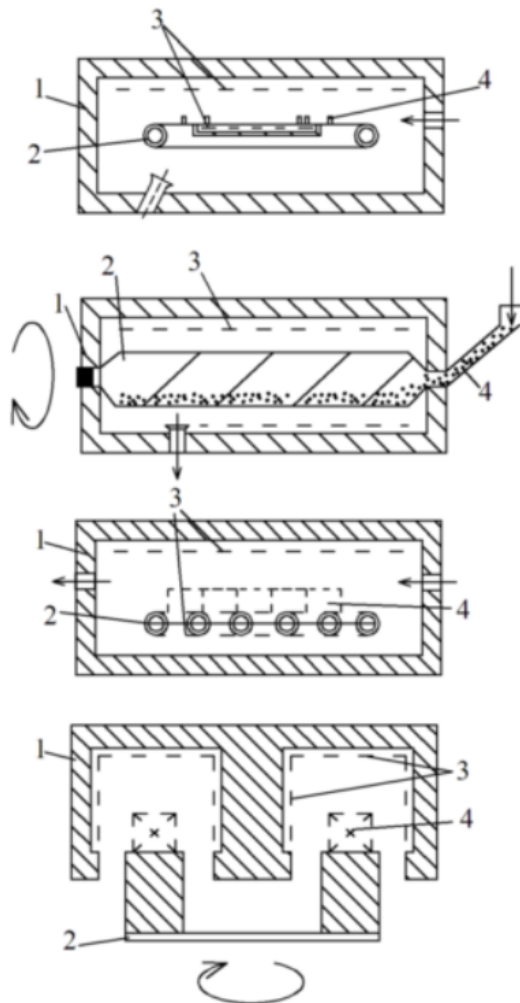


Рис. 6.2 – Основні типи печей опору методичної дії: а - конвеєрна; б - барабанна; в - рольгангова; г - карусельна; 1 - кладка печі; 2 - механізм переміщення виробів; 3 - нагрівачі; 4 - вироби, що нагріваються

Перевагою спірального НЕ є можливість його підключення безпосередньо до цехової електричної мережі, недоліком – відсутність

суворо фіксованого кроку, що може призвести до місцевих перегрівів, замиканню витків та виходу з ладу.

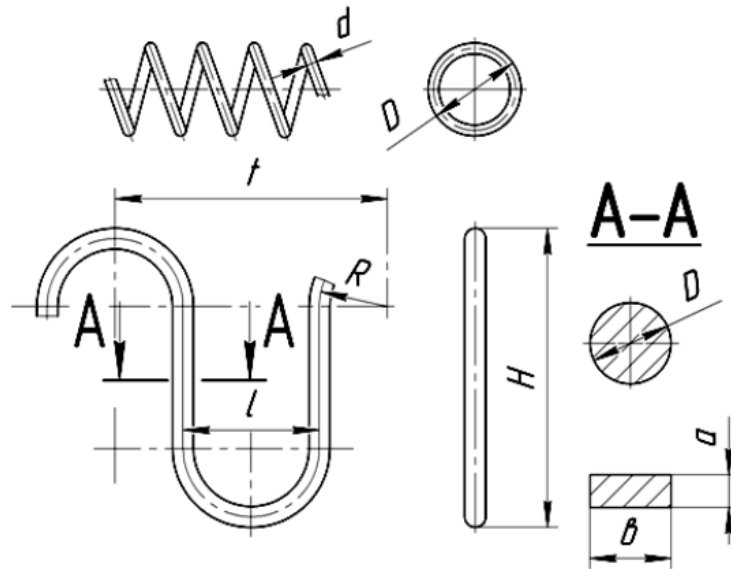


Рис. 6.3 – Конструкція нагрівальних елементів: а - дротяна спіраль; б - дротяний та стрічковий зигзаг

Принцип дії нагрівачів ЕПС ґрунтується на явищі нагріву провідника, включеного в електричний ланцюг. Кількість тепла  $Q$ , що виділяється під час проходження електричного струму, визначається відповідно до закону Джоуля-Ленца.

$$Q = I^2 R t = U I t = \frac{U^2}{R} t = 0,239 \cdot 10^{-3} I^2 R t = 0,278 \cdot 10^{-6} I^2 R t, \text{ кВТ}$$

де  $I$  - Струм, що протікає через нагрівач, А;  $R$  - Опір нагрівача, Ом,  $U$  - напруга, прикладена до нагрівача,  $t$ - Час проходження струму, с.

Теплова енергія з поверхні нагрівача за допомогою випромінювання і конвекції передається виробу, що нагрівається. Потужність, що випромінюється НЕ з одиниці поверхні, називають питомою поверхневою потужністю нагрівача  $W$ . Ідеальний НЕ отримаємо, якщо уявити, що теплові втрати відсутні і все тепло передається тілу, що нагрівається:

$$W_{\text{уд}} = C_{\text{пр}} \left[ \left( \frac{T_{\text{н}}}{100} \right)^4 - \left( \frac{T_{\text{вуд}}}{100} \right)^4 \right], \text{ кВт/м}^2$$

де  $T_{\text{н}}$ ,  $T_{\text{вуд}}$  - відповідно, температура нагрівача та виробу;  $C_{\text{пр}}$  - наведений коефіцієнт випромінювання який визначається за формулою:

$$C_{\text{пр}} = \frac{5,7}{\frac{1}{\varepsilon_{\text{н}}} + \frac{1}{\varepsilon_{\text{вуд}}} - 1},$$

де  $\varepsilon_{\text{вуд}}$ ,  $\varepsilon_{\text{н}}$  - коефіцієнти теплового випромінювання матеріалу нагрівача та виробу.

Але виробу передається не все тепло (втрати тепла, не вся поверхня НЕ бере участь у теплообміні), тому реальна питома поверхнева потужність:

$$W = C_{\text{еф}} \cdot W_{\text{уд}},$$

де  $C_{\text{еф}} = 0,3 - 0,8$  - коефіцієнт ефективності випромінювання, що залежить від розмірів НЕ, їх розташування в печі, умов тепловіддачі.

Питома поверхнева потужність визначає при заданій температурі нагріву робочу температуру НЕ, від якої залежить термін їхньої служби.

Під терміном служби НЕ розуміють час його роботи при заданій температурі, протягом якого його струмопровідний переріз зменшиться внаслідок окислення на 20%, для металевих – це близько 10 тис. годин, для металокерамічних та карборундових – близько 2 тис. годин.

Для визначення розмірів (перетину та довжини) та розміщення НЕ в камері печі виконують наступний розрахунок:

а) за робочою температурою в печі (максимальна температура нагрівання виробу  $T_{\text{изд тах}}$ ) вибирається матеріал НЕ у відповідності з технічними характеристиками. Робоча температура нагрівача приймається на  $50 - 200^\circ\text{C}$  вище за температуру виробу:

$$\left[ T_{\text{вуд}} + \left( \frac{50}{200} \right) \right] \leq T_{\text{н}},$$

б) для обраного матеріалу з урахуванням його робочої температури та температури нагрівання виробу обчислюють за формулою ( $W_{\text{ид}}$ ) питому поверхневу потужність ідеального НЕ;

в) з урахуванням коефіцієнта ефективності  $C_{\text{еф}}$ , за формулою ( $C_{\text{пр}}$ ) обчислюють питому поверхневу потужність реального НЕ;

г) у стаціонарному режимі при заданій температурі до нагрівача підводиться електрична потужність ( $P$ ).

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

яка дорівнює тепловій потужності, що віддається поверхнею нагрівача виробу:

$$P = WF = W\Pi l,$$

де  $\rho$  - питомий опір матеріалу нагрівача при робочій температурі, Ом·м;  $l$  - довжина нагрівача, м;  $S$  - переріз нагрівача, м<sup>2</sup>;  $W$  - питома поверхнева потужність нагрівача, розрахована за формулою ( $C_{\text{пр}}$ ), Вт/м<sup>2</sup>;  $F$  - площа поверхні нагрівача, м<sup>2</sup>;  $\Pi$  - периметр НЕ, м;

д) вирішуючи спільно ( $C_{\text{пр}}$ ) та ( $P$ ) і, враховуючи, що для круглого перерізу  $\Pi = \pi d$ , а  $S = (\pi \cdot d^2)/4$ , отримаємо:

$$d = \sqrt[3]{\frac{4P^2 \rho}{\pi^2 U^2 W}},$$

де  $d$  - діаметр НЕ, м.

Вибирається найближчий стандартний діаметр: 2,0; 2,2; 2,5; 2,8; 3,2; 3,6; 4,0; 4,5; 5,0; 5,6; 6,3; 7; 8; 9; 10; 11; 12; 13; 14; 15; 16; 17; 18; 19; 20 мм;

е) для нагрівачів прямокутного перерізу задаються співвідношенням сторін  $b/a = m = 10$ . Товщина смуги ( $a$ ):

$$a = \sqrt[3]{\frac{P^2 \rho}{2m(m+1) \cdot U^2 W}},$$



Вибирається найближчий стандартний переріз НЕ: 2 x 10; 1,5 x 15; 2 x 15; 2,2 x 20; 2,5 x 20; 3 x 20; 2,2 x 25; 2,5 x 25; 3 x 25; 2,2 x 30; 2,5 x 30; 3 x 30; 2,2 x 36; 2,5 x 36; 3 x 36; 2,2 x 40; 2,5 x 40; 3 x 40 мм;

ж) розраховується активний опір нагрівача, його довжина та вага:

$$G = Sl\gamma ,$$

де  $G$  - вага НЕ, кг,  $\gamma$  - щільність матеріалу НЕ, кг/м<sup>3</sup>.

Слід зважити, що розрахунок НЕ ведеться для однієї фази.

Автоматичне регулювання процесу нагріву, зокрема регулювання температури, сприяє підвищенню ефективності ЕПС. Завдання пристроїв автоматичного регулювання полягає в тому, щоб забезпечити нагрівання до заданої температури та підтримувати її на постійному рівні з точністю, яка відповідає вимогам технологічного процесу. Функціональна схема автоматичного регулювання робочої температури печі опору наведено на рис. 6.4.

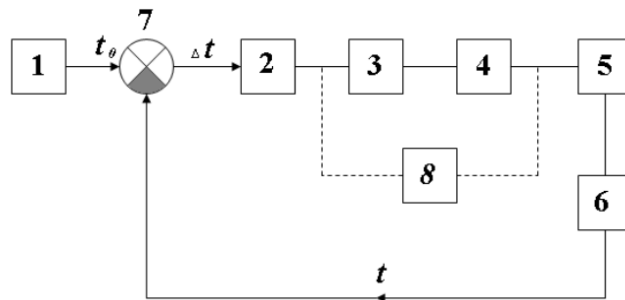


Рис. 6.4 – Функціональна схема регулювання температури: 1 - пристрій для ручного та автоматичного введення заданого значення температури; 2 - регулятор, що обчислює залежно від величини та знака відхилення температури ( $\Delta t$ ) від заданого значення величину регулюючого впливу; 3 - підсилювач потужності; 4 - виконавчий пристрій; 5 - об'єкт регулювання; 6 – датчик температури; 7 - пристрій порівняння вимірювального та заданого значень температур (для визначення відхилення  $\Delta t$ ); 8 - один із можливих

зворотних зв'язків

Як датчики температури використовують:

- термометри опору. Їх принцип роботи заснований на властивості різних матеріалів змінювати свій опір залежно від температури. Їх застосовують для вимірювання температур до 650 °С. У промисловості використовуються платинові термометри типу ТСП та мідні типу ПММ;

- термопари— два різнорідні провідники, спаяні в одній точці. При нагріванні місця спаю на вільних холодних кінцях провідників утворюється термо-ЕРС, пропорційна температурі. Застосовують хром-алюмінієві термопари ТХА – 1000°С, платино-радій-платинові ТПП – 1300°С і т.д.;

- термометри випромінювання радіаційні та фотоелектричні. Перші типу «Рапір» з межами вимірювань 100–4000°С мають телескоп, концентруючий за допомогою оптики променистий потік, випромінюваний тілом, що нагрівається. По-друге, чутливим елементом є фотоопір. Робоча температура фотоелектричних термометрів ФЕП-4 500-2000 ° С, ФЕП-60 200-1400 ° С.

Для вимірювання, запису та регулювання температури у поєднанні з датчиками температури застосовують електронні мости, термометричні мілівольтметри або електронні потенціометри.

В ЕПС може застосовуватися безперервне та ступінчасте регулювання температури. ЕПС є об'єктами з самовирівнюванням, коли кожному значенню потужності, що підводиться, відповідає своє значення температури, що встановилася. Це спрощує завдання регулювання і при будь-якому методі воно здійснюється зміною потужності, що підводиться.

Температура печей опору змінюється досить повільно, а підтримки її постійної зазвичай не потрібно відповідності між що надходила в піч і споживаною потужністю, що нагрівається тілом в кожний момент часу. Достатньо, якщо це співвідношення виконується для середніх значень потужностей задовго. Це дозволяє у багатьох випадках відмовлятися від

складних безперервних методів та застосовувати ступінчасте регулювання, яке буває дво- та трипозиційним.

При двопозиційному регулюванні спочатку включають піч на повну потужність. Після досягнення заданої температури її підтримка забезпечують періодичними включеннями та відключеннями печі є роботою по циклу повна потужність – нульова потужність.

Середня потужність, що споживається ЕПС:

$$P_{cp} = P_{ном} \frac{\tau_{вкл}}{\tau_{вкл} + \tau_{вим}} = P_{ном} \frac{\tau_{вкл}}{\tau_{цикл}},$$

де  $P_{cp}$  - середня потужність,  $P_{ном}$  - повна або номінальна потужність,  $\tau_{вкл}$  - час включення,  $\tau_{вим}$  - час відключення,  $\tau_{циклу}$  - час циклу.

У міру прогріву ЕПС зменшується різниця температур між НЕ, стінками печі і заготівлею, що нагрівається, що призводить до зменшення часу включення та збільшення часу відключення, тому середня потужність починає падати (рис. 6.5).

Для полегшення роботи комутаційної апаратури необхідно прагнути до зменшення частоти перемикань за одночасного зниження величини комутованої потужності. Це досягається регулюванням за циклом: повна потужність – нульова потужність – часткова потужність. Таке регулювання називається трипозиційним. У період розігріву піч включається на повну потужність, при досягненні заданої температури перемикається на часткову потужність і в період витримки регулюється за циклом "часткова потужність" - "вимкнено".

Часткову потужність можна отримати перемиканням НЕ з паралельного з'єднання на послідовне при однофазному живленні, зірки на послідовне та з трикутника на зірку – при трифазному живленні. Для нормальної роботи ЕПС необхідно, щоб часткова потужність була більшою

за потужність теплових втрат. Ступінчате регулювання може забезпечити підтримання температури з точністю  $\pm 10\%$ .

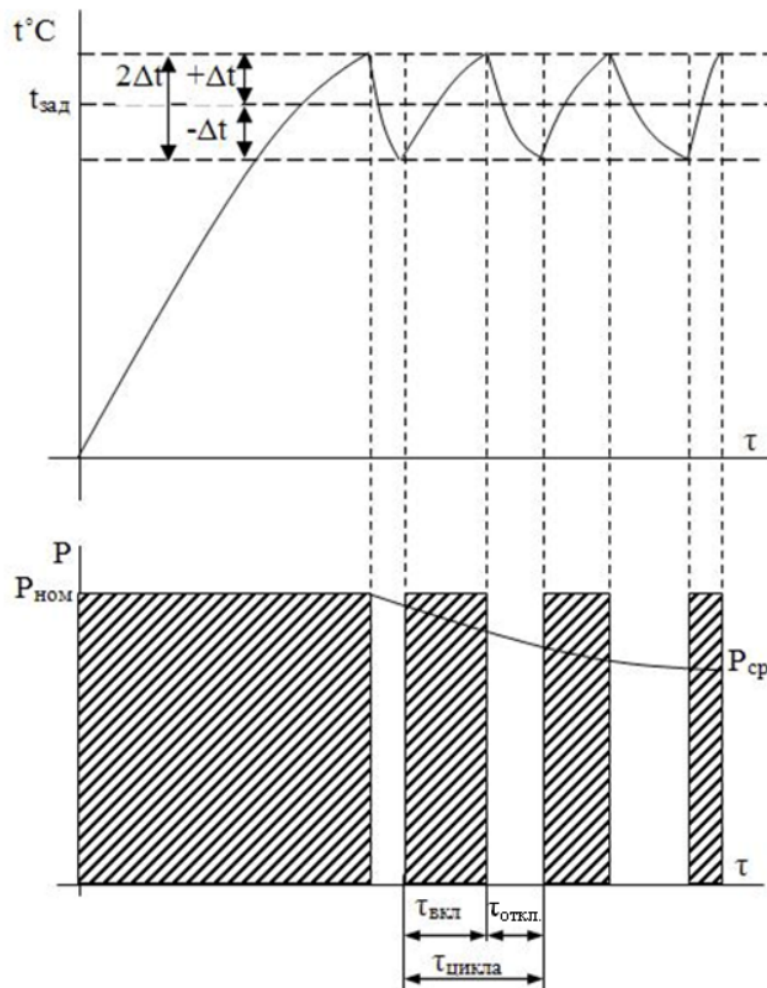


Рис. 6.5 – Графік зміни температури та потужності печі при двопозиційному регулюванні

Якщо за умовами технологічного процесу потрібна більш висока точність, необхідно застосовувати безперервне плавне регулювання.

У цьому кожен елемент системи регулювання впливає наступний безперервно, т. е. вихідна величина регулятора є безперервною функцією неузгодженості з його вході. При безперервному регулюванні як виконавчий пристрій використовують безконтактний вимикач із застосуванням тиристорів.

### ***6.3 Порядок виконання роботи***

1. Ознайомитися з короткими теоретичними відомостями по вивченню будови, принципів дії та технічні характеристики електроустаткування печей опору.
2. Відповісти на контрольні питання.
3. Оформити звіт відповідно до вимоги захисту та виконання лабораторної роботи.
4. Зробити висновок про виконану роботу.

### ***6.4 Контрольні питання***

1. Класифікація ЕПС.
2. Принцип дії печей опору.
3. Конструкції нагрівальних елементів.
4. Поняття про питому поверхневу потужність та термін служби НЕ.
5. Датчик температури.
6. Характеристика методів автоматичного регулювання температури ЕПС.
7. Двопозиційне регулювання температури.
8. Трипозиційне та безперервне регулювання температури.

## **ЛАБОРАТОРНА РОБОТА №7**

**Тема:** Дослідження принципів роботи і конструкцій електрозварювальних установок

**Мета:** ознайомити здобувачів початкового рівня вищої освіти з конструкцією електрозварювальної установки, та дослідити принцип роботи зварювального трансформатора під навантаженням

### 7.1 Теоретичні відомості

У точці дотику електрода з деталями, що зварюються, за законом Джоуля-Ленца виділяється досить велика кількість тепла. Після відриву електрода від деталей повітряний проміжок між ними розігрівається, з катода починається потужна термоелектронна емісія. Повітря стає провідником електрики, що створює потужний дуговий розряд, який прийнято називати електрозварювальною дугою. У перший момент запалення дуги, коли повітряний проміжок ще холодний, потрібна велика кінетична енергія для його іонізації. Тому напруга запалювання дуги завжди виявляється більшою, ніж при нормальному її горінні, і дорівнює для сталевих електродів 30 – 35 В, а для вугільних 45–55 В. Електрична дуга складається з наступних елементів, рис. 7.1.

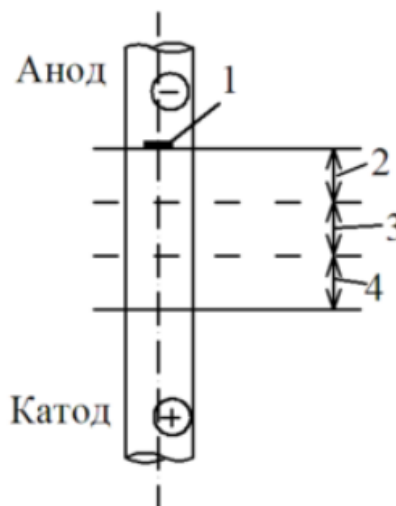


Рис. 7.1 – Елементи дуги: 1 - катодна пляма; 2 - катодне простір (де накопичуються вилетіли з катодної плями електроди); 3 - стовп дуги (він займає майже всю довжину дуги); 4 - анодний простір, що складається з шару електронів та позитивних іонів

При вугільних електродах температура анода приблизно 4900°C, температура катода залежить від довжини дуги, сили струму, складу та

діаметра електрода і дорівнює  $3000\text{--}4000^\circ\text{C}$ . При сталевих електродах (застосовуваних під час зварювання) температура анода –  $2500\text{--}2600^\circ\text{C}$ , катода –  $2300\text{--}2400^\circ\text{C}$ . Напруга в електричній дузі поділяється на три характерні частини, рис. 7.2.

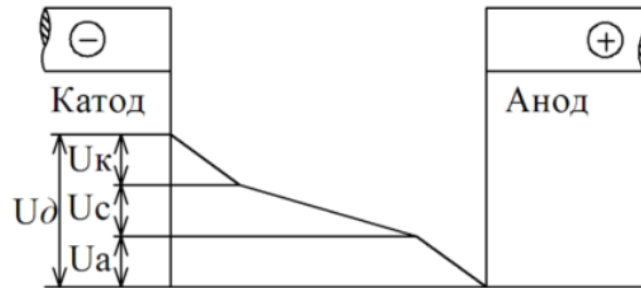


Рис. 7.2 – Розподіл напруги у дузі: 1 - падіння напруги у катодному просторі  $U_{\text{до}}$  (витрачене на емісію електронів з катода); 2 - падіння напруги у стовпі дуги  $U_3$  (витрачене на переміщення зарядів через газовий проміжок); 3 - падіння напруги в анодному просторі  $U_{\text{а}}$  (витрачене на переодолення об'ємних зарядів та нагрівання анода)

При струмах порядку  $200\text{ A}$  і вище падіння напруги в стовпі дуги не залежить від сили струму і пропорційно до довжини стовпа, але змінюється в залежності від роду газу, матеріалу електрода і тиску. Зі збільшенням струму іонізація стовпа дуги (внаслідок нагрівання газу) посилюється (рис. 7.3).

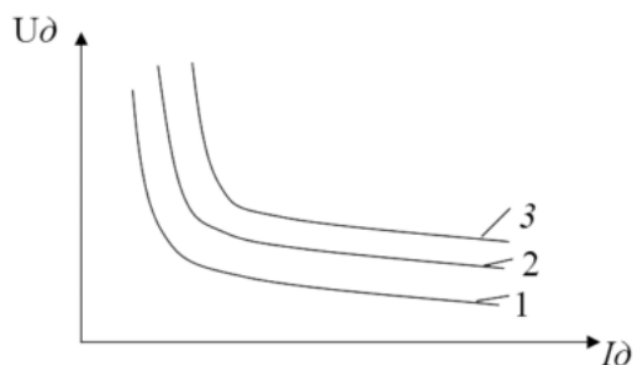


Рис. 7.3 – Статична характеристика електричної дуги: 1 - коротка дуга; 2 - середня дуга; 3 - довга дуга

З посиленням іонізації зростає провідність стовпа дуги, а це призводить до зменшення напруги, необхідної для підтримки горіння дуги зі збільшенням струму (негативний опір).

Розглянута вище зміна напруги дуги зі зростанням струму справедливо при повільному наростанні струму (статична характеристика). При швидких змінах струму (від  $I_1$  до  $I_2$ ) іонізація у проміжку відстає від зростання струму, провідність дуги збільшується повільніше і напруга на дузі зменшується менше, ніж за статичною характеристикою (з точки 1 приходимо в точку 2', а не в точку 2). При раптовому зменшенні струму ступінь іонізації проміжку знижується повільніше за струм, і ми з точки 2 приходимо в точку 1', а не в точку 1 (рис. 7.4). Викладені вище явища мають місце у дузі незалежно від роду струму, що живить дугу.

Однак підтримка дуги на змінному струмі важче, оскільки струм змінює свою величину та напрямок 100 разів на секунду (при промисловій частоті). Зміна напрямку струму призводить до переміщення катодної плями з одного електрода на інший за зміни полярності.

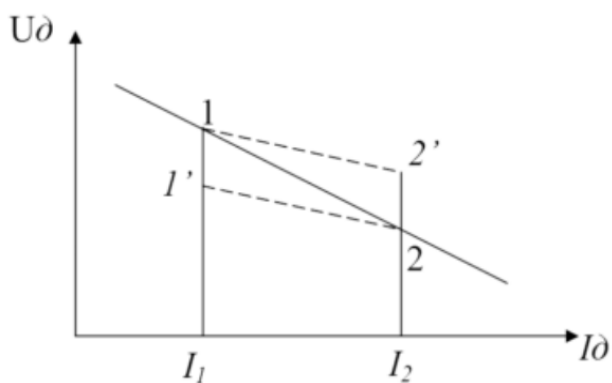


Рис. 7.4 – Динамічна характеристика дуги

Від однопостових джерел потрібно:

1. Напруга холостого ходу джерела зварювального струму має бути не менше напруги запалення дуги (30–40 В – для постійного струму, та 50–55 В – для змінного струму);



2. Струм короткого замикання в зварювальному ланцюзі не повинен суттєво перевищувати робочий струм дуги (практично кратність струму короткого замикання прийнятна не більше 1,2 – 1,4);

3. Джерело повинне мати регулювання струму зварювальної дуги, єдину для зварювання деталей різної товщини. Режим роботи зварювального обладнання повторно короткочасний з відсотком включення (ПВ) рівним 50-70%. Повторно-короткочасний режим, що встановився, характеризується тим, що падіння температури обмотки за час перерви відповідає підвищенню її за час чергового горіння. Зварювальний апарат змінного струму є поєднанням трансформатора (з вторинною напругою 60–80 В) і регулятора напруги (дроселя), що забезпечує зовнішню характеристику зварювального апарату, що круто падає (рис. 7.5). Регулювання струму відбувається за рахунок зміни повітряного зазору в магнітопроводі дроселя.

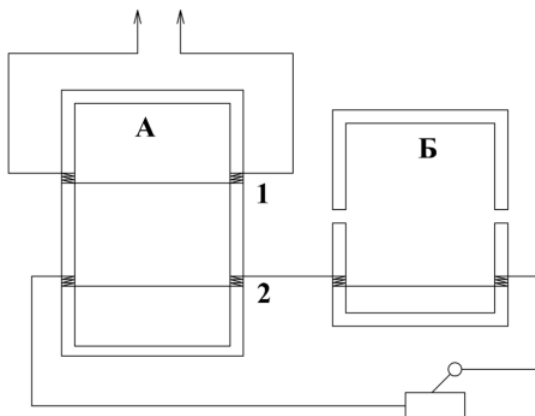


Рис. 7.5 – Принципова схема зварювального апарату з окремим регулятором:

А - трансформатор; Б - регулятор; 1 - первинна обмотка; 2 - вторинна обмотка

Найменший зварювальний струм виходить при зазорі, що дорівнює нулю, зі збільшенням зазору струм збільшується. Зварювальні трансформатори мають різні конструкції залежно від того, якою є зварювальна операція: дугова, стикова, шовна або точкова. Найбільш

різноманітні конструкції зварювальних трансформаторів для дугового зварювання. Зварювальний трансформатор, як і зварювальна машина постійного струму, повинен мати достатню для запалення дуги напругу холостого ходу. У найпростішому випадку для цієї мети можна було б використати автотрансформатор, який може дати хороші технічні та економічні показники. Однак автотрансформатори неприйнятні з погляду безпеки зварювальника, оскільки останній може потрапити під повну напругу мережі. Тому зварювальні трансформатори виконуються тільки з розділеними первинною та вторинною обмотками. Крім того, зварювальні трансформатори повинні задовольняти наступним основним вимогам:

1. Мати крутопадаючу зовнішню характеристику, необхідну для сталого горіння дуги;

2. Щоб уникнути перегріву електрода та прилипання його до металу при коротких замиканнях, величина струму короткого замикання не повинна перевищувати робочий струм більш ніж на 35-45%;

3. Напруга холостого ходу не повинна перевищувати 60 В, оскільки при більш високій напрузі виникає небезпека ураження зварювальника електричним струмом;

4. Конструкція трансформатора повинна бути простою та захищеною від впливу атмосферних опадів, пилу та ін. Ізоляція обмоток його має бути вологостійкою;

5. Трансформатор повинен забезпечити сталість горіння дуги при коливанні напруги у первинній обмотці  $\pm 10\%$ .

Різні типи зовнішніх характеристик зварювальних трансформаторів показані на рис. 7.6. Характеристика типу «а» придатна для зварювання великих і малих струмах. Так як зі зменшенням струму навантаження напруга трансформатора підвищується, ймовірність нестійкого горіння дуги відпадає. Характеристика типу «б» має підвищену напругу поблизу холостого ходу, що забезпечує стійке горіння дуги при малих струмах

навантаження. Однак при зварюванні на великих струмах навантаження ця напруга буде надто високою. Ще менш сприятлива характеристика типу «в».

Таким чином, з усіх наведених типів характеристик найбільш сприятливою є характеристика типу "а". Для отримання необхідної зовнішньої характеристики зварювальні трансформатори виконуються з відносно великим змінним розсіюванням у самому трансформаторі або в окремому реакторі, що вмикається в ланцюг послідовно з трансформатором.

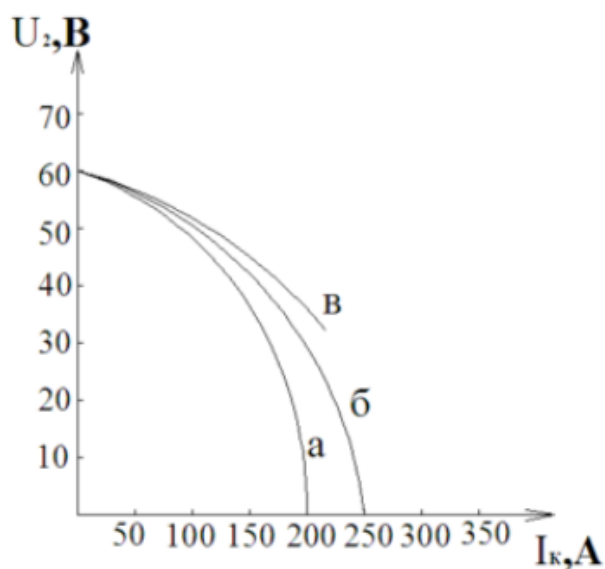


Рис. 7.6 – Різні типи зовнішніх характеристик зварювального трансформатора

### ***7.3 Порядок виконання роботи***

1. Ознайомитися з короткими теоретичними відомостями по вивченню будови, принципів дії та технічні характеристики електрозварювальних установок.
2. Відповісти на контрольні питання.
3. Оформити звіт відповідно до вимог захисту та виконання лабораторної роботи.
4. Зробити висновок про виконану роботу.

#### **7.4 Контрольні питання**

1. Послідовність виникнення електричної зварювальної дуги.
2. Чому напруга запалювання дуги завжди більша, ніж при нормальному її горінні?
3. Із яких основних елементів складається електрична дуга?
4. Назвіть основні характеристики електричної дуги.
5. Як впливає індуктивність ланцюга змінного струму на стійкість горіння дуги?
6. Назвіть основні вимоги до однопостових джерел зварювального струму.
7. Назвіть основні вимоги, які мають задовольняти зварювальні трансформатори.

## СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ

1. Борщ Г., Лавріненко Ю., Синявський О. Практикум з електротехнологій. Київ : НУБП України, 2020. 69 с.
2. Бржезицький В. О., Гаран Я. О., Троценко Є. О. Електротехнологічні установки та системи: практикум : навч. посіб. Київ : КПІ ім. Ігоря Сікорського, 2020. 41 с.
3. Буляндра О., Бондар В. Енергетичні установки : метод. вказівки до викон. лаборатор. робіт для студ. напряму 6.050701 «Електротехніка та електротехнологія». Київ : НУХТ, 2021. 88 с.
4. Електротехнологія. URL: <https://mehanik-ua./metodicheskie-ukazaniya/118-metodichni-rekomendatsiji-shchodo-organizatsiji.html>.
5. Лаврентьєва О. О., Солоха А. С. Лабораторний практикум з електротехніки. Кривий Ріг : КДПУ, 2018. 112 с.
6. Лишук В., Літковець С. Основи електроприводу: методичні вказівки до практичних занять. Луцьк : ТК Луц. НТУ, 2019. 88 с.
7. Мардзявко В. А. Аналіз автоматизованої системи керування процесу переробки та транспортування на елеваторах. *Сучасні проблеми землеробської механіки* : Матеріали ХХІ міжнар. наук. конф., м. Харків. Харків, 2020. С. 35-41. URL: <https://repo.btu.kharkov.ua/bitstream/123456789/1503/1/7.pdf>
8. Плахтир О. Основи електроприводу : методичні рекомендації для виконання завдань з самостійної роботи. Миколаїв : МНАУ, 2015. 60 с.
9. Шпіка М. Методичні вказівки до виконання лабораторних робіт з дисципліни "Системи керування електроприводами". Харків : ХНАМГ, 2019. 61 с.

## **ЗАГАЛЬНІ ВИМОГИ ДО ОФОРМЛЕННЯ ЗВІТІВ З ЛАБОРАТОРНИХ РОБІТ**

**з дисципліни «Електротехнічні системи і комплекси» для підготовки до лабораторних занять здобувачами початкового рівня (короткий цикл) вищої освіти спеціальності 141 «Електроенергетика, електротехніка та електромеханіка»**

1. Лабораторна робота пишеться (оформлюється) кожним студентом власноруч (одним коляром пасти) та починається з номеру практичної роботи та її найменування. Листи заповнюються лише з однієї сторони.

2. Робота оформлюється на листах А4: полем ліворуч – 2,5 см; полем праворуч – 1 см; полем внизу/верху – 2 см.

3. Кожна сторінка повинна бути пронумерована та підписана відповідним шифром (див. додаток 2.)

3. Звіт з практичної роботи повинен мати: титульний лист, теоретичну частину, розрахункову частину, відповіді на контрольні питання, висновки.

4. Титульний аркуш є першою сторінкою практичної роботи і містить основні дані про звіт роботи та її автора. Титульний аркуш заповнюється за строго визначеною формою (див. додаток 1) та повинна містити:

- найменування вищого навчального закладу, факультету та кафедри;
- назву практичної роботи;
- допуски до виконання та захисту;
- відведену графу для оцінки студента;
- прізвище, ім'я автора;
- шифр групи в якій навчається автор;
- науковий ступінь, вчене звання, прізвище, ім'я викладача;
- рік виконання.

Слід пам'ятати, що титульний лист не підлягає нумерації, однак включається до загальної нумерації сторінок практичної роботи.

5. Розрахункова частина практичної роботи повинна виконуватися з урахуванням загальних вимоги до оформлення звіту та оформлюватися у рамці з відповідним шифром (див. додаток 2).

6. захист практичної роботи відбувається у наступні послідовності:

1) оформлення звіту практичної роботи (титульний лист та теоретична частина), після чого студент отримує допуск до виконання роботи;

2) виконання або розрахунок завдання практичної роботи, після перевірки якої студент готується та відповідає письмово на контрольні питання. Отримується можливість до захисту практичної роботи;

3) захист практичної роботи відбувається усно, за питаннями по темі практичної роботи та відповідного лекційного матеріалу.

## ДОДАТКИ

Додаток 1

**МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ І НАУКИ УКРАЇНИ**  
**МИКОЛАЇВСЬКИЙ НАЦІОНАЛЬНИЙ АГРАРНИЙ УНІВЕРСИТЕТ**  
**ІНЖЕНЕРНО-ЕНЕРГЕТИЧНИЙ ФАКУЛЬТЕТ**  
Кафедра електроенергетики, електротехніки та електромеханіки

### ЛАБОРАТОРНА РОБОТА №1

з дисципліни

“Електротехнічні системи і комплекси ”

на тему: “Розробка світлотехнічної відомості”

Допуск до виконання \_\_\_\_\_

Допуск до захисту \_\_\_\_\_

Захист \_\_\_\_\_

Виконав студент групи: Ен 1/1 мб \_\_\_\_\_  
(підпис)

Олексій ХАРИТОНОВ  
(імя, прізвище)

Керівник: \_\_\_\_\_  
(підпис)

Віталій МАРДЗЯВКО  
(імя, прізвище)

2024



					141 Ен 2/3 мб. 11.ПР01.ЕСК	Лист
Ізм	Лист	№ докум.	Підпис	Дата		

Навчальне видання

## **ЕЛЕКТРОТЕХНІЧНІ СИСТЕМИ І КОМПЛЕКСИ**

Методичні рекомендації

Укладачі: **Мардзявко** Віталій Анатолійович

**Руденко** Андрій Юрійович

Формат 60x84 1/16. Ум. друк. арк. 4,3.

Тираж 20 прим. Зам. № \_\_\_\_\_

Надруковано у видавничому відділі  
Миколаївського національного університету  
54020, м. Миколаїв, вул. Георгія Гонгадзе, 9

Свідоцтво суб'єкта видавничої справи ДК № 4490 від 20.02.2013 р.