

# ЗМІСТ

<b>ПЕРЕЛІК УМОВНИХ СКОРОЧЕНЬ І ПОЗНАЧЕНЬ.....</b>	<b>8</b>
<b>ПЕРЕДМОВА .....</b>	<b>10</b>
<b>Частина I СПОЖИВАЧІ ЕЛЕКТРИЧНОЇ ЕНЕРГІЇ В СИСТЕМІ ЕЛЕКТРОПОСТАЧАННЯ .....</b>	<b>12</b>
<b>Розділ 1 СИСТЕМНИЙ ПІДХІД ДО АНАЛІЗУ СПОЖИВАЧІВ ЕЛЕКТРИЧНОЇ ЕНЕРГІЇ .....</b>	<b>12</b>
1.1 Основні поняття й визначення .....	12
1.2 Споживачі електричної енергії в системі «Електроенергетика» ..	14
1.3 Система «Споживання електричної енергії» .....	16
1.4 Взаємодія електроспоживачів і джерел електричної енергії .....	16
1.5 Модельне представлення систем і їхніх складових .....	18
<b>Розділ 2 ХАРАКТЕРИСТИКА СПОЖИВАЧІВ ЕЛЕКТРИЧНОЇ ЕНЕРГІЇ .....</b>	<b>21</b>
2.1 Загальні відомості про електроспоживачів .....	21
2.2 Класифікація електроспоживачів .....	23
2.2.1 Класифікація за ступенем надійності електропостачання .....	24
2.2.2 Класифікація за ступенем і величиною напруги .....	25
2.2.3 Класифікація за ознаками фізичних параметрів .....	26
2.2.4 Класифікація за функціональними ознаками .....	26
2.3 Параметри та характеристики електроприймачів .....	28
2.3.1 Номінальні параметри електроприймачів .....	28
2.3.2 Потужність електроприймачів.....	30
2.3.3 Характеристики електроприймачів .....	31
<b>Розділ 3 РЕЖИМИ РОБОТИ ПРИЙМАЧІВ ЕЛЕКТРИЧНОЇ ЕНЕРГІЇ .....</b>	<b>35</b>
3.1 Режими за тривалістю вмикання .....	35
3.2 Режими за усталеністю параметрів .....	37
3.3 Режими за ступенем аварійності .....	37
3.4 Режими схем вмикання трифазних електроприймачів .....	38
3.4.1 «Зірка» без нульового проводу .....	38
3.4.2 «Трикутник» .....	40
3.4.3 «Зірка» з нульовим проводом .....	42
3.5 Порівняння умов роботи споживача при з'єднанні його фаз «зіркою» й «трикутником» .....	44
3.6 Неповнофазні режими трифазних електроспоживачів .....	45
3.6.1 Обрив навантаження в одній із фаз .....	46
3.6.2 Коротке замикання однієї із фаз .....	46

<b>Розділ 4 УПЛИВ СИСТЕМИ ЕЛЕКТРОПОСТАЧАННЯ НА РОБОТУ ЕЛЕКТРОСПОЖИВАЧІВ .....</b>	<b>49</b>
4.1 Показники якості електричної енергії .....	49
4.2 Усталене відхилення напруги .....	50
4.3 Коливання напруги .....	54
4.3.1 Уплив коливань напруги на роботу споживачів .....	55
4.3.2 Заходи щодо забезпечення симетрії напруг .....	55
4.4 Несинусоїдальність напруги .....	55
4.5 Несиметрія напруги .....	58
4.5.1 Уплив несиметрії на роботу споживачів .....	59
4.5.2 Заходи щодо забезпечення симетрії напруг .....	61
4.6 Відхилення частоти .....	62
4.6.1 Уплив частоти на роботу електроспоживачів .....	62
4.6.2 Заходи щодо забезпечення частоти мережі .....	62
4.7 Провал напруги .....	62
4.8 Імпульс напруги й тимчасова перенапруга .....	63
<b>Розділ 5 УПЛИВ ЕЛЕКТРОСПОЖИВАЧІВ НА РОБОТУ СИСТЕМИ ЕЛЕКТРОПОСТАЧАННЯ .....</b>	<b>67</b>
5.1 Коефіцієнт потужності $\cos\varphi$ .....	67
5.2 Несиметрія навантаження .....	70
5.2.1 З'єднання навантаження «зіркою» без нульового проводу ..	71
5.2.2 З'єднання навантаження «зіркою» з нульовим проводом ....	72
5.2.3 З'єднання навантаження «трикутником» .....	73
5.2.4 Симетрування напруги у споживача .....	74
5.3 Нелінійність вольт-амперних характеристик .....	78
<b>Частина II ХАРАКТЕРНІ ГРУПИ СПОЖИВАЧІВ ЕЛЕКТРИЧНОЇ ЕНЕРГІЇ .....</b>	<b>82</b>
<b>Розділ 6 ЕЛЕКТРИЧНІ МАШИНИ ЯК ПРИЙМАЧІ ЕЛЕКТРИЧНОЇ ЕНЕРГІЇ .....</b>	<b>82</b>
6.1 Основні відомості про електричні машини .....	82
6.1.1 Класифікація електричних машин .....	82
6.1.2 Параметри й характеристики електричних машин .....	83
6.2 Режими роботи електричних машини .....	85
6.3 Асинхронні електричні машини .....	87
6.3.1 Робочі характеристики .....	88
6.3.2 Механічні характеристики .....	89
6.3.3 Гальмові режими асинхронних машин .....	91
6.3.4 Неповнофазний режим асинхронних машин .....	94
6.4 Пуск асинхронних машин .....	99
6.5 Однофазні асинхронні двигуни .....	103

<b>Розділ 7 ЕЛЕКТРОПРИЙМАЧІ НАГРІВАЛЬНОГО УСТАТКУВАННЯ .....</b>	<b>107</b>
7.1 Електричне нагрівання .....	108
7.1.1 Нагрівальні елементи .....	108
7.1.2 Електричні печі опору .....	111
7.1.3 Електричні водонагрівачі .....	111
7.2 Електричне опалення .....	115
7.3 Електропрогрівання бетону .....	118
7.4 Електропрогрівання ґрунту .....	123
<b>Розділ 8 ЕЛЕКТРООСВІТЛЮВАЛЬНЕ УСТАТКУВАННЯ .....</b>	<b>127</b>
8.1 Загальні відомості .....	127
8.1.1 Системи та види освітлення .....	128
8.1.2 Основні світлові величини .....	130
8.1.3 Параметри джерел світла .....	131
8.1.4 Конструктивні особливості джерел світла .....	133
8.1.5 Маркування джерел світла .....	136
8.2 Лампи розжарювання .....	136
8.2.1 Загальні відомості .....	136
8.2.2 Галогенні лампи розжарювання .....	140
8.3 Газорозрядні лампи .....	141
8.3.1 Люмінесцентні лампи .....	141
8.3.2 Ртутні лампи високого тиску .....	146
8.3.3 Металогалогенні лампи .....	147
8.3.4 Натрієві лампи .....	150
8.3.5 Ксенонові лампи .....	150
8.4 Світлодіодні джерела світла .....	153
8.5 Індукційні лампи .....	156
<b>Частина III ОСОБЛИВОСТІ ЕЛЕКТРОСПОЖИВАЧІВ МІСТ I ПРОМИСЛОВИХ ПІДПРИЄМСТВ.....</b>	<b>159</b>
<b>Розділ 9 ЕЛЕКТРОЗВАРЮВАЛЬНЕ УСТАТКУВАННЯ.....</b>	<b>159</b>
9.1 Основні відомості про електричне зварювання .....	160
9.1.1 Фізика процесу електричного зварювання .....	160
9.1.2 Вольт-амперна характеристика електричної дуги .....	162
9.1.3 Види електричного зварювання .....	163
9.2 Вимоги до джерел живлення зварювальної дуги .....	164
9.2.1 Загальні вимоги .....	164
9.2.2 Вимоги до зовнішньої характеристики .....	166
9.2.3 Режим роботи джерела живлення .....	169
9.3 Електрозварювальне устаткування змінного струму .....	169
9.4 Зварювальні осцилятори .....	174
9.5 Зварювальні випрямлячі .....	175
9.6 Устаткування контактного зварювання .....	176

<b>Розділ 10 ЕЛЕКТРОСПОЖИВАЧІ БУДІВЕЛЬНИХ МАЙДАНЧИКІВ .....</b>	<b>179</b>
10.1 Вантажопідіймальні машини .....	180
10.2 Електродвигуни вантажопідіймальних машин .....	181
10.2.1 Кранові електродвигуни .....	181
10.2.2 Пуск асинхронних двигунів вантажопідіймальних машин .....	183
10.2.3 Електродвигуни постійного струму .....	184
10.3 Електропривод будівельних кранів .....	184
10.4 Електричні ручні машини .....	189
<b>Розділ 11 ЕЛЕКТРОСПОЖИВАЧІ ПРОМИСЛОВИХ ПІДПРИЄМСТВ .....</b>	<b>196</b>
11.1 Загальна характеристика електроспоживачів промислових підприємств .....	196
11.2 Електротехнологічне устаткування .....	199
11.2.1 Електротермічне устаткування .....	200
11.2.2 Устаткування прямого нагрівання .....	201
11.2.3 Плавильні електропечі опору .....	202
11.3 Устаткування індукційного нагрівання .....	203
11.3.1 Індукційні плавильні печі .....	205
11.4 Дюгові електричні печі .....	207
11.4.1 Електроустаткування дугових печей .....	209
11.4.2 Особливості процесу плавлення .....	211
11.4.3 Пічні трансформатори .....	213
11.4.4 Особливості режимів роботи дугових печей .....	214
<b>Розділ 12 ЕЛЕКТРОСПОЖИВАЧІ СИСТЕМ ЖИТТЄЗАБЕЗПЕЧЕННЯ МІСТ .....</b>	<b>217</b>
12.1 Система «Водопостачання та водовідведення» .....	218
12.1.1 Загальні відомості .....	218
12.1.2 Система «Водопостачання міста» .....	219
12.1.3 Електроспоживачі системи «Водопостачання Харківського регіону» .....	223
12.1.4 Система «Водовідведення» .....	227
12.2 Система «Теплопостачання міста» .....	230
12.2.1 Загальні відомості .....	230
12.2.2 Класифікація систем теплопостачання .....	231
12.2.3 Бойлерні .....	233
12.2.4 Теплові пункти гарячої води .....	238
12.3 Міський електричний транспорт .....	238
12.3.1 Система «Міський електричний транспорт» .....	239
12.3.2 Тягові підстанції .....	240
12.3.3 Особливості режимів тягових мереж .....	242

<b>Розділ 13 ЕЛЕКТРОСПОЖИВАЧІ ІНЖЕНЕРНИХ СИСТЕМ БУДИНКІВ .....</b>	<b>245</b>
13.1 Загальна характеристика інженерних систем будинків .....	245
13.2 Системи електричного опалення й обігрівання будинків .....	246
13.3 Системи вентиляції і кондиціонування повітря .....	251
13.4 Ліфти й ескалатори .....	252
<b>Розділ 14 ЕЛЕКТРОПРИЙМАЧІ ЖИТЛОВИХ БУДИНКІВ .....</b>	<b>256</b>
14.1 Електроприймачі квартир .....	257
14.2 Загальнобудинкові електроприймачі .....	263
<b>ПІСЛЯМОВА .....</b>	<b>266</b>
<b>СПИСОК ДЖЕРЕЛ .....</b>	<b>267</b>
<b>ТЕРМІНОЛОГІЧНИЙ СЛОВНИК .....</b>	<b>273</b>
<b>ПРЕДМЕТНИЙ ПОКАЖЧИК .....</b>	<b>277</b>
<b>ДОДАТКИ .....</b>	<b>280</b>
Додаток А Категорії надійності електроприймачів будинків .....	280
Додаток Б Технічні характеристики зварювальних джерел живлення ..	282
Додаток В Основні параметри дугових печей постійного струму .....	283
Додаток Г Основні параметри дугових сталеплавильних печей змінного струму .....	284
Додаток Д Кранові асинхронні двигуни з фазним ротором .....	285
Додаток Е Кранові асинхронні двигуни з короткозамкненим ротором .....	286

## ПЕРЕЛІК УМОВНИХ СКОРОЧЕНЬ І ПОЗНАЧЕНЬ

### Перелік скорочень

#### А

АД – асинхронний двигун

АМ – асинхронна машина

#### В

ВАХ – вольт-амперна характеристика

в.о. – відносні одиниці

ВПМ – вантажопідіймальна машина

#### Д

ДБН – державні будівельні норми

ДПС – двигун постійного струму

ДРЛ – дугова ртутна лампа

#### Е

ЕВН – електричний водонагрівач

ЕД – електричний двигун

ЕЗУ – електрозварювальне устаткування

ЕЕ – електрична енергія

ЕЕС – електроенергетична система

ЕЕІ – Energy Efficiency Index

ЕМ – електрична машина

ЕПО – електрична піч опору

ЕРМ – електрична ручна машина

ЕРС – електрорушійна сила

#### Є

ЄС – Європейський Союз

#### І

ІЛ – індукційна лампа

ІКП – індукційна канална піч

ІН – індукційне нагрівання

#### К

К.З. – коротке замикання

ККД – коефіцієнт корисної дії

КП – комунальне підприємство

#### Л

ЛЕП – лінія електропередач

#### М

МЗС – машина змінного струму

МЛГ – металогалогенна лампа

МПС – машина постійного струму

#### Н

НКРЕ – Національна комісія, що здійснює державне регулювання у сфері енергетики

НКРЕКП – Національна комісія, що здійснює державне регулювання у сферах енергетики та комунальних послуг

#### О

ОЕС – об'єднана енергетична система

#### П

ПП – промислове підприємство.

ПСН – пристрій симетрування напруги

ПТУ – підіймально-транспортне устаткування

ПРП – пускорегулювальний пристрій

ПУ – перетворювальне устаткування

ПУЕ – правила улаштування електроустановок

#### С

с – секунда

СД – синхронний двигун

СЖМ – система життєзабезпечення міста

СКП – система кондиціонування повітря

СЕЕ – споживач електричної енергії  
СМ – синхронна машина

### Т

ТВ – відносна тривалість вмикання

ТЕН – трубчатий електронагрівник  
ТЕЦ – теплоелектроцентрально

### Я

ЯЕЕ – якість електричної енергії

## Перелік позначень

$\omega$  – кутова (кругова) частота синусоїдального струму  
 $f$  – частота, Гц  
 $I$  – струм, А  
 $I_p$  – розрахунковий струм  
 $\dot{I}$  – комплекс струму  
 $I^*$  – сполучений комплекс струму  
 $N$  – нейтраль (нульовий провідник)  
 $P$  – активна потужність, Вт  
 $Q$  – реактивна потужність, вар  
 $R$  – активний опір, Ом  
 $S$  – повна потужність, ВА  
 $\tilde{S}$  – комплекс повної потужності  
 $U$  – напруга електричної мережі, В  
 $\dot{U}$  – комплекс напруги

$U_{(1)}$  – напруга основної (50 Гц) частоти  
 $U_{0(1)}$  – напруга нульової послідовності основної частоти  
 $U_{1(1)}$  – напруга прямої послідовності основної частоти  
 $U_{2(1)}$  – напруга зворотної послідовності основної частоти  
 $U_{(n)}$  – діюче значення  $n$ -ої гармонійної складової напруги  
 $X$  – реактивний опір, Ом  
 $\underline{Y}$  – повна провідність, См  
 $Z$  – повний опір  
 $\underline{Z}$  – комплекс повного опору

## ПЕРЕДМОВА

Характерною особливістю сучасного стану розвитку міст і промислових підприємств є зростання чисельності електротехнічного устаткування, застосування нових фізичних процесів перетворення електричної енергії в інші види енергії, ускладнення процесів взаємодії електроспоживачів з джерелами електричної енергії, їхнього впливу на показники якості електричної енергії та режим роботи систем електропостачання.

Споживачі електричної енергії є останнім елементом електроенергетичної системи, яка характеризується великою кількістю складових і взаємозв'язків між ними. Неперервність процесу генерації, передачі, розподілу й споживання електричної енергії, стохастичний характер процесу споживання електричної енергії потребують використання ефективного інструментарію дослідження структурних елементів електроенергетичної системи.

Дисципліна «Споживачі електричної енергії» традиційно викладалася студентам спеціальності «Електротехнічні системи електроспоживання». У процесі реформування системи вищої освіти в Україні та об'єднання багатьох електротехнічних спеціальностей бакалаврського рівня підготовки в межах спеціальності 141 – Електроенергетика, електротехніка та електромеханіка, дисципліна «Споживачі електричної енергії» викладається студентам Харківського національного університету міського господарства імені О. М. Бекетова, що навчаються за освітньою програмою «Електротехнічні системи електроспоживання».

Відповідно до технології електроенергетики (генерація, передача, розподіл і споживання електричної енергії) курс «Споживачі електричної енергії» викладається в останньому семестрі підготовки бакалаврів. Йому передують усі базові курси електротехнічної підготовки (ТОЕ, електричні машини, метрологія та електричні вимірювання, промислова електроніка) та основні курси фахової підготовки освітньої програми: технологія виробництва електроенергії, електричні системи та мережі, електрична частина станцій та підстанцій, автоматизований електропривод та ін. Вивчення цих дисциплін забезпечує усвідомлення студентами специфіки електроенергетики, призначення й особливостей фізичних процесів її складових та їхньої взаємодії.

Об'єктом вивчення курсу «Споживачі електричної енергії» є основні характерні електроспоживачі міст та промислових підприємств.

Предметом дисципліни є фізичні процеси споживання електричної енергії, її перетворення в інші види енергії, взаємодія електроспоживачів з системою електропостачання.

Метою курсу «Споживачі електричної енергії» є формування у студентів системи теоретичних знань у галузі систем споживання електричної енергії та практичних навичок виконання аналізу та розрахунків взаємодії окремих споживачів електричної енергії з системою електропостачання, застосування цих знань при обслуговуванні технологічних процесів систем електроспоживання, опанування заходами зниження впливу електроприймачів на якісні показники електричної енергії та режими роботи системи електропостачання.



Інформаційне наповнення підручника базується на матеріалах лекцій, які автор читає на кафедрі електропостачання міст (зараз кафедра систем електропостачання та електроспоживання міст) студентам Харківського національного університету міського господарства імені О. М. Бекетова з 90-х років по теперішній час.

У процесі формування матеріалу підручника було використано методологію системного аналізу, виокремлено основні групи електроспоживачів міст і промислових підприємств, враховано матеріали публікацій українських і закордонних науковців, інтернет-джерела та іншу наукову інформацію щодо передових досягнень у галузі електротехнічного устаткування, рекомендації Європейського Союзу стосовно енергоефективності споживачів електричної енергії.

Підручник складається з трьох частин, які співвідносяться зі змістовими модулями програми дисципліни «Споживачі електричної енергії» і включають чотирнадцять розділів (тем), у яких охарактеризовано характерні групи електроспоживачів міст і промислових підприємств. Кожний розділ завершується висновками і запитаннями для самоконтролю знань.

Частина перша «Споживачі електричної енергії в системі електропостачання» поділена на п'ять розділів, у яких розкрито методологічні підходи до дослідження споживачів електричної енергії, надано загальну характеристику електроспоживачів, їхніх режимів роботи та факторів впливу системи електропостачання на роботу електроспоживачів і впливу електроспоживачів на систему електропостачання.

Частина друга «Характерні групи споживачів електричної енергії» складається з трьох розділів, у яких розглянуто три групи електроприймачів, притаманних для систем електропостачання міст і промислових підприємств: електричні машини, нагрівальне та електроосвітлювальне устаткування.

У частині третій «Особливості електроспоживачів міст і промислових підприємств» проаналізовано такі групи електроспоживачів, як електрозварювальне устаткування, електроустаткування вантажопідіймальних машин, енергоємне електротехнологічне устаткування промислових підприємств. Міські електроспоживачі розглянуті в межах систем теплопостачання, водопостачання, водовідведення, міського електричного транспорту, інженерних систем будинків.

У межах одного підручника немає можливості розглянути всі групи електроприймачів та різноманіття фізичних процесів перетворення електричної енергії. Матеріал книги зосереджено на характерних групах електроспоживачів міст і промислових підприємств, які істотно впливають на систему електропостачання та показники якості електричної енергії.

*Автор висловлює щире подяку рецензентам: доктору технічних наук, професору М. Л. Лисиченку (Харківський національний технічний університет сільського господарства імені Петра Василенка) та доктору технічних наук, професору Л. І. Мазуренку (Інститут електродинаміки НАН України).*

# Частина I

## СПОЖИВАЧІ ЕЛЕКТРИЧНОЇ ЕНЕРГІЇ В СИСТЕМІ ЕЛЕКТРОПОСТАЧАННЯ

---

---

### Розділ 1 СИСТЕМНИЙ ПІДХІД ДО АНАЛІЗУ СПОЖИВАЧІВ ЕЛЕКТРИЧНОЇ ЕНЕРГІЇ

**Ключові поняття:** система, підсистема, елемент, процес, принцип (багатоплановості, ієрархічності, багатомірності, цілісності, максимуму ефективності), об'єднана енергетична система, електроспоживач, електроприймач, чорний ящик.

#### 1.1 Основні поняття й визначення

Одним із ефективних методів досліджень складних систем є методологія системного підходу, яка базується на розгляді об'єктів як систем. На сьогодні системний підхід – це сукупність методів і засобів, що дають змогу досліджувати властивості, структуру та функції об'єктів і процесів загалом, представивши їх як систему зі складними міжелементними взаємозв'язками, взаємним впливом елементів на систему і на середовище, а також впливом самої системи на її структурні елементи [46].

Надалі ми розглядатимемо *систему* як виділену із середовища сукупність матеріальних або абстрактних об'єктів, явищ, процесів, які мають певний набір властивостей, і взаємодія яких забезпечує досягнення деякої функції протягом певного часу [46].

Розглядаючи структуру системи у її складі виділяють підсистеми й елементи. *Підсистема* – це виділена в межах системи сукупність складових, які мають певний набір властивостей, і взаємодія яких забезпечує реалізацію деякої складової функції системи. Ця функція розглядається як підфункція (складова) функції системи.

*Елемент* (системи, підсистеми) характеризується тим, що в межах дослідження він не поділяється на складові, а його взаємодія з іншими елементами або підсистемами даної системи забезпечує реалізацію деякої підфункції загальної функції системи.

Взаємодія складових системи реалізується в деяких процесах, протікання яких забезпечує реалізацію підфункцій та функції системи в цілому. Отже *процес* – це сукупність послідовних дій (зміни стану або значень параметрів складових системи), для досягнення певного результату (реалізації функції системи).

Будь-яка система є складовою більшої системи – надсистеми. З огляду на це у випадках, коли дослідження зосереджується на властивостях деякої підсистеми, з метою спрощення пояснень, її називають системою.

У процесі дослідження споживачів електричної енергії (далі – СЕЕ), якщо не оговорено інше, ми будемо розглядати систему «Споживач електричної енергії» як технічний об’єкт, який функціонує в межах системи «Об’єднана енергетична система України». Зазначимо, що в цьому курсі системи «Споживання електричної енергії» розглядаються лише як технічні об’єкти. Розгляд інших аспектів цих систем (персонал, адміністрація тощо) виходить за межі нашого курсу.

Таким чином, застосовуючи системний підхід до дослідження СЕЕ ми будемо розглядати систему як реальний об’єкт, який є цілісною сукупністю визначеної множини взаємодіючих частин і одночасно є складовою частиною більш загального реального об’єкта.

Методологія системного підходу вимагає розглядати досліджуваний об’єкт як комплекс взаємозалежних підсистем та елементів, об’єднаних загальною метою.

Серед основних *принципів* системного аналізу [46] розглянемо ті, що є істотними для вивчення технічних об’єктів, зокрема СЕЕ.

**Принцип багатоплановості** полягає в тому, що будь-яку систему розглядають у декількох аспектах:

- як певну одиницю, що має свої специфічні особливості;
- як частину своєї видово-родової макросистеми, закономірностям якої підкоряється досліджувана система;
- у плані зовнішніх взаємодій системи тощо.

**Принцип ієрархічності** полягає в тому, що дослідження складних об’єктів базується на уявленні про ієрархію їхньої структури. Під **ієрархією** розуміють розташування частин та елементів цілого в порядку від вищого до нижчого та зв’язки між цими частинами й елементами.

**Принцип багатомірності** полягає в тому, що будь-якій системі притаманна велика сукупність властивостей, об’єднаних у групи, кожна з яких описує ті чи інші її особливості. Об’єктивний опис системи потребує дослідження максимальної кількості (в ідеалі усіх) цих груп.

**Принцип цілісності** полягає в тому, що об’єкт досліджується у єдності взаємодіючих частин. Цілісний об’єкт виявляє властивості та способи дії, які не можна пояснити простим підсумовуванням властивостей і способів дії частин, що його утворюють.

**Принцип максимуму ефективності системи** стверджує, що завжди існує функція цінності системи як залежність її ефективності від умов побудови й функціонування і ця функція має максимум.

Застосування зазначених принципів під час розгляду технічних об’єктів потребує поєднання структурного й функціонального аспектів їхнього дослідження. Ці аспекти і є методологічними підставами системного підходу.

Структурний аспект включає вирішення двох взаємопов'язаних завдань: виявлення компонентів (підсистем, елементів), із яких складається система, і визначення того, як ці компоненти пов'язані між собою. Тут дослідник проводить аналіз структури системи і її підсистем.

Функціональний аспект дослідження також має два напрями:

- аналіз внутрішнього функціонування, механізму взаємодії елементів і підсистем усередині досліджуваної системи;
- аналіз зовнішнього функціонування системи, її взаємодії в межах надсистеми.

## 1.2 Споживачі електричної енергії в системі «Електроенергетика»

Зростання кількості населення, урбанізація та процеси індустріалізації, розвиток інфраструктур транспорту спричиняють зростання видобутку та споживання електричної енергії. Електроенергетика є базовою галуззю економік багатьох країн світу, вона забезпечує як функціонування всіх інших галузей господарства, так і можливості їхнього перспективного розвитку.

Розглядаючи сучасну електроенергетику як систему (рис. 1.1), можна виділити такі її складові (підсистеми):

- виробництва (генерації) електричної енергії<sup>1</sup>;
- передачі (транспортування) електричної енергії;
- розподілу електричної енергії;
- споживання електричної енергії (клас напруг 0,4 кВ – 10 кВ).

В Україні електроенергетика функціонує як *об'єднана енергетична система* (далі – ОЕС), яка розглядається як «сукупність електростанцій, електричних і теплових мереж, інших об'єктів електроенергетики, які об'єднані спільним режимом виробництва, передачі та розподілу електричної і теплової енергії при централізованому управлінні цим режимом» [62]. Зазначимо, що в межах курсу «Споживачі електричної енергії» питання виробництва, розподілу і споживання теплової енергії не розглядаються.

Виробництво електричної енергії здійснюється на електричних станціях, які можна поділити на дві групи (рис. 1.1) – системного і місцевого значення. Електростанції системного значення забезпечують в межах країни централізоване виробництво електричної енергії і підтримання режиму роботи ОЕС. Це електростанції великої потужності – атомні, теплові, гідроелектростанції. Електростанції місцевого значення (теплові, відновлювальної електроенергетики: вітрові, сонячні, малі гідроелектростанції тощо) істотно не впливають на режим ОЕС. У деяких випадках вони працюють відокремлено від ОЕС і забезпечують електричною енергією окремих споживачів (підприємства, населені пункти).

---

<sup>1</sup> З погляду методології системного аналізу назва підсистем має стисло розкрити основну функцію цієї підсистеми. Приміром, функцію генерації електричної енергії виконує підсистема «Виробництво (генерація) електричної енергії». Назва «Генерація електричної енергії» більше відповідає принципу історичності (історично склався термін «генерація»), але в нормативних документах [62] перевага надається терміну «виробництво».

**Система «Передача електричної енергії»** об'єднує регіональні електроенергетичні системи (в Україні структурні підрозділи НЕК «Укренерго»), до складу яких входять магістральні лінії електропередач (далі – ЛЕП) та підстанції напругою 220 кВ і вище. Електрична енергія, вироблена електростанціями системного значення, подається до відповідних регіональних електроенергетичних систем, на території яких вони розміщуються.

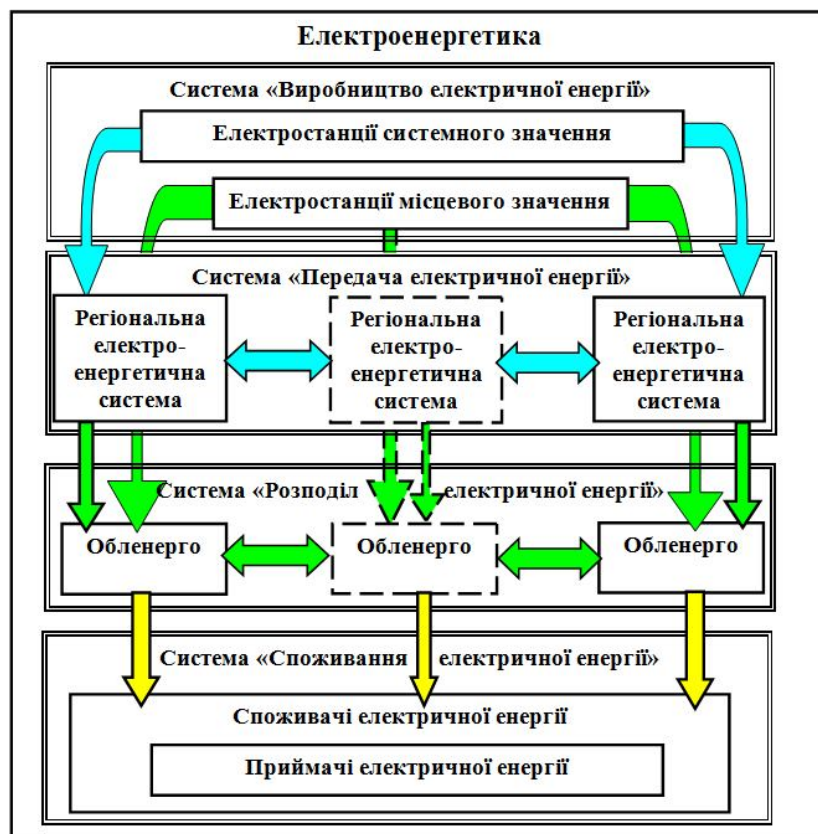


Рисунок 1.1 – Структура системи «Електроенергетика»

**Система «Розподіл електричної енергії»** об'єднує обласні електроенергетичні компанії (обленерго), які отримують електричну енергію від регіональних електроенергетичних компаній, а в деяких регіонах – і від електростанцій місцевого значення. Основна функція обленерго – розподіл електричної енергії по території області й доведення її до електроспоживачів.

**Електропостачальна система** загального призначення – сукупність електричних установок, призначених для виробництва, передавання, перетворення та розподілу електричної енергії [25, п. 4.1].

До основних функцій електроенергетичної системи належать такі: виробництво електричної енергії, передавання (транспорт) електричної енергії, розподіл та споживання електричної енергії.

У межах нашого курсу ми розглядатимемо взаємодію системи «Електропостачання» і системи «СЕЕ». До складу системи «Електропостачання» будемо відносити джерела електричної енергії (далі – ЕЕ) і елементи розподільних мереж, які забезпечують електричною енергією електроприймачів, що входять до складу системи «СЕЕ».

### 1.3 Система «Споживання електричної енергії»

Складовими системи «Споживання електричної енергії» є споживачі й приймачі електричної енергії. ПУЕ [42] надає визначення цих понять.

**Приймач електричної енергії** (електроприймач) – апарат, агрегат, механізм, призначений для перетворення електричної енергії в інший вид енергії [42, п. 1.2.7]. Отже приймачем електричної енергії є електрична частина механізму або технологічної установки, що одержує електроенергію з мережі й витрачає її на виконання технологічних процесів, які супроводжуються перетворенням електроенергії в інші види енергії: механічну, теплову, світлову тощо. Деякі технологічні установки мають у своєму складі декілька електроприймачів: верстати, крани, прокатні стани і т. п. Розглядаючи технологічну установку як єдине ціле говорять про споживача електричної енергії.

**Споживач електричної енергії** (електроспоживач) – електроприймач або група електроприймачів, об'єднаних технологічним процесом, які розміщуються на певній території [42, п. 1.2.8].

На підприємствах СЕЕ поєднує групу електроприймачів технологічної установки, цеху, корпусу або підприємства в цілому, на підставі їхніх характерних функцій (ознак). Приміром, характерною функцією деякого промислового підприємства є виробництво певної продукції. Саме підприємство в цілому може розглядатися як СЕЕ, до складу якого входять інші електроспоживачі (цехи, дільниці), розташовані на відповідній території (підприємства, цеху, дільниці).

У містах СЕЕ є будинки (житлові, громадського призначення тощо), мікрорайони, райони. Місто в цілому також є споживачем електричної енергії.

Зазначимо, що розгляд електроспоживачів, їхньої структури й технічних характеристик набуває важливого значення при дослідженні взаємодії систем споживання і розподілу електричної енергії.

### 1.4 Взаємодія електроспоживачів і джерел електричної енергії

Розглядаючи структуру системи «Електроенергетика» (рис. 1.1) необхідно звернути увагу на наступне:

- електроспоживачі й електроприймачі є останніми елементами цієї системи з погляду процесу виробництва, передачі, розподілу й споживання електричної енергії;

- для реалізації своєї основної функції (виробництва певної продукції) споживачі мають потребу в електричній енергії, якість якої має відповідати певним вимогам [58];

- системи виробництва, передачі й розподілу мають забезпечувати споживачів електричною енергією, яка відповідає вимогам якості [58].

Беручи до уваги наведені зауваження, надалі ми розглядатимемо взаємодію СЕЕ та джерел електричної енергії у межах підсистеми «Електро-

постачання споживачів». На рисунку 1.2 подано один з можливих варіантів структури підсистеми для випадку наявності електроспоживачів I і III категорій.

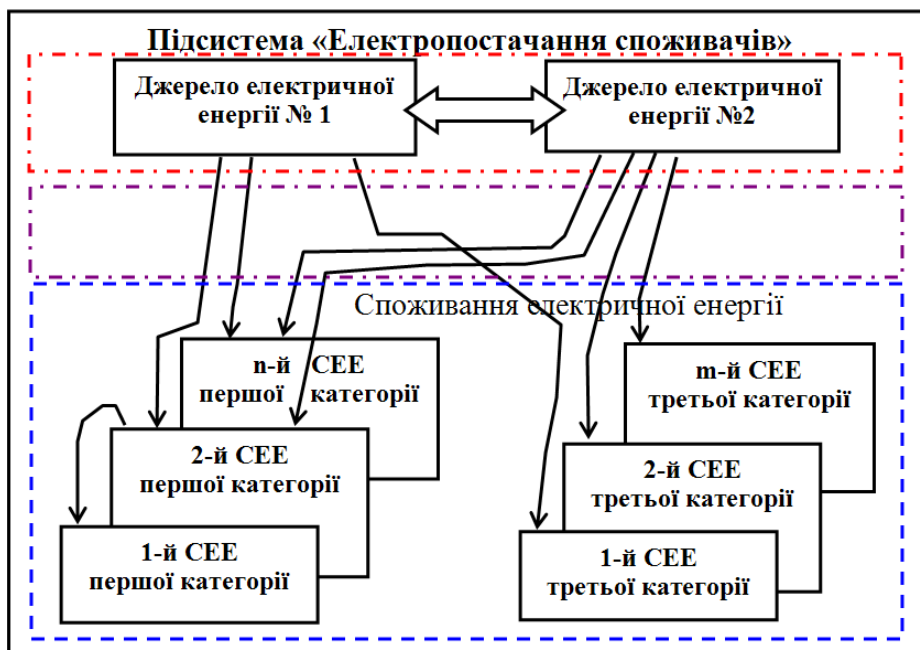


Рисунок 1.2 – Підсистема «Електропостачання споживачів»

Розглядаючи підсистему «Електропостачання споживачів» як систему, до її структури включаємо наступні складові:

- джерела електричної енергії – трансформаторні підстанції, електростанції місцевого значення;
- елементи підсистеми розподілу електричної енергії – лінії електропередачі та розподільні пункти;
- підсистема «Споживання електричної енергії», у складі якої деяка множина споживачів і приймачів електричної енергії.

Виділення підсистеми «Електропостачання споживачів» в окрему систему в межах надсистеми «Електроенергетика» дає змогу зосередитися на питаннях дослідження процесів забезпечення споживачів електричною енергією, яка відповідає вимогам до її якості, а також на питаннях впливу споживачів на показники якості електричної енергії в системах її розподілу, передачі, і в системі «Електроенергетика» в цілому. Кожна з систем розподілу електричної енергії в межах ОЕС України містить певну кількість підсистем «Електропостачання споживачів», і при вивченні впливу електроспоживачів і електроприймачів на процеси в системах розподілу, передачі й виробництва електричної енергії доцільно виділити споживача (групу споживачів) зі своїми джерелами живлення в окрему підсистему і проводити дослідження в межах цієї підсистеми.

Зазначимо, що в курсі «Споживачі електричної енергії» з погляду структури системи «Електроенергетика» розглядаються процеси взаємодії систем розподілу і споживання електричної енергії (рис. 1.1). Процеси і

взаємодія систем виробництва, передачі й розподілу електричної енергії розглядаються в інших курсах: електричні станції та підстанції, електричні мережі та системи, релейний захист і автоматика та ін.

### **1.5 Модельне представлення систем і їхніх складових**

Одним із ефективних підходів методології системного аналізу є заміна реального об'єкта дослідження його моделлю, яка зазвичай є спрощеним поданням об'єкта за умови її моделюючої подібності за встановленими критеріями. Досліджуваний об'єкт представляється як сукупність характерних для завдання дослідження складових об'єкта та зв'язків між ними. Усі інші складові об'єкта дослідження і зв'язки між ними до уваги не приймаються, що дає можливість отримати спрощений математичний опис процесів об'єкта і зменшити обсяги ресурсів на його дослідження. За певних умов (висока температура, рівень радіації в енергоблоці атомної електростанції тощо) модель є єдиним інструментом дослідження об'єкта.

Інакше кажучи, сутність моделювання полягає в тому, що поряд із системою оригіналом розглядають її модель, яка фактично є деякою іншою системою, що становить собою образ (аналог) системи оригінала згідно з встановленими критеріями подібності.

Найбільш узагальненою моделлю є модель типу «чорний ящик», графічне представлення якої подане на рисунку 1.3. Основними складовими цієї моделі є надсистема, границі системи, потоки входу, потоки виходу, завади. Складання моделі типу «чорний ящик» розпочинають із виділення в межах деякої системи об'єкта дослідження й визначення його границь. Сам об'єкт дослідження і його модель розглядаються як система, а система, в межах якої функціонує даний об'єкт, – як надсистема для досліджуваної системи. У надсистемі визначаються потоки входу досліджуваної системи і потоки її виходу. Також визначаються завади – фактори, які за певних умов істотно впливають на результат функціонування системи (потоки виходу).

Можна стверджувати, що модель «Чорний ящик» – це універсальна модель, яка на першому етапі дослідження дає змогу розпочати розгляд будь-якої системи. На наступних етапах, залежно від мети дослідження, вона набуває потрібної деталізації і прив'язки до конкретної предметної області.

Розглянемо, як виглядає один із можливих варіантів моделі «Чорний ящик» у разі дослідження системи «Джерело електричної енергії». Надсистемою для такої системи є система розподілу електричної енергії рівня «Обленерго».

Система, а у подальшому її модель «Чорний ящик», – це деяка підстанція, (наприклад 110/35 кВ), яка забезпечує споживачів електричною енергією. Границі системи – це територія підстанції.

Потоки входу системи – параметри електричної енергії на вході підстанції (напруга, струм, активна та реактивна потужності тощо).



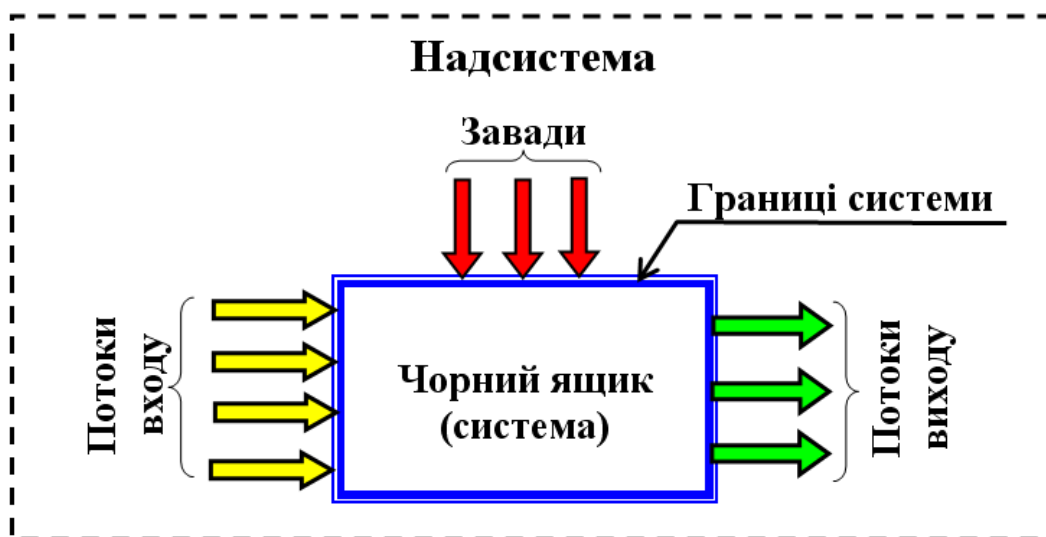


Рисунок 1.3 – Модель системи типу «Чорний ящик»

Потоки виходу системи – параметри електричної енергії на виході пі-  
дстанції.

Завади – фактори зовнішнього середовища (ожеледиця, гроза тощо).

Під час розгляду тем курсу «Споживачі електричної енергії» ми будемо використовувати модель типу «Чорний ящик», зокрема досліджуючи питання впливу електроприймачів та електроспоживачів на систему електропостачання (режим її роботи та параметри якості електричної енергії). У разі потреби також будуть надані пояснення щодо особливостей застосування методології системного підходу під час розгляду конкретних питань нашого курсу.

## Висновки

Системний підхід є ефективним інструментарієм дослідження взаємодії джерел і споживачів електричної енергії.

Виділення із множини складових розподільних електричних мереж елементів, які утворюють систему «Електропостачання споживача» і систему «Споживач ЕЕ», забезпечує дослідження як впливу параметрів системи «Електропостачання споживача» на ефективність функціонування електроспоживача, так і впливу параметрів і режиму роботи споживача ЕЕ на ефективність функціонування системи його електропостачання.

## Запитання для самоконтролю

1. Поясніть методологічні особливості системного підходу щодо дослідження споживачів електричної енергії.

2. Поясніть поняттям система, підсистема (надсистема), елемент. Наведіть приклади.
3. Якою є структура системи «Електроенергетика»?
4. Поясніть відмінність понять «електроприймач» і «електроспоживач» із погляду системного аналізу.
5. Наведіть приклади складових системи розподілу електричної енергії.
6. У чому полягає доцільність виділення підсистеми «Електропостачання споживачів»?
7. У яких випадках застосовують моделі типу «Чорний ящик»?
8. Опишіть електроспоживача «Промислове підприємство» за допомогою моделі типу «Чорний ящик».
9. Назвіть складові системи «Електропостачання споживачів». Поясніть їхні функції.
10. Поясніть, чим різняться поняття система «Розподіл електричної енергії» і «Електропостачальна система».

### **Список рекомендованих джерел**

Основні джерела: [46, С. 10–18, 25–26, 59–64], [42, С. 11–12].  
Додаткові джерела: [25], [58], [62].

## Розділ 2 ХАРАКТЕРИСТИКА СПОЖИВАЧІВ ЕЛЕКТРИЧНОЇ ЕНЕРГІЇ

**Ключові поняття:** надійність електропостачання, категорія надійності електропостачання, особлива група надійності електропостачання, номінальна потужність, якість електричної енергії, усталене відхилення напруги, розмах зміни напруги, доза флікера, несинусоїдальність напруги, несиметрія напруги, відхилення частоти, провал напруги, імпульс напруги, тимчасова перенапруга.

### 2.1 Загальні відомості про електроспоживачів

Як зазначалося вище у підрозділі 1.3, кінцевим елементом системи «Споживання електричної енергії» є електроприймач, у межах якого відбувається перетворення електричної енергії в інший вид енергії. Група електроприймачів (у термінології системного аналізу – група елементів), об'єднаних спільним технологічним процесом і розташованих на визначеній території, утворюють систему «Споживач електричної енергії» (тут і далі – «СЕЕ»). Деякі окремих систем «СЕЕ» можуть утворювати надсистему «СЕЕ». Кількість рівнів надсистеми «СЕЕ» обумовлена метою дослідження і обмежена кількістю джерел у системі «Електропостачання споживачів».

Розглянемо два приклади структуризації системи «СЕЕ».

Перший приклад – промислове підприємство. Розгляд системи «Промислове підприємство» (далі – «ПП») проводимо застосовуючи традиційний, історично сформований підхід «від простого до складного».

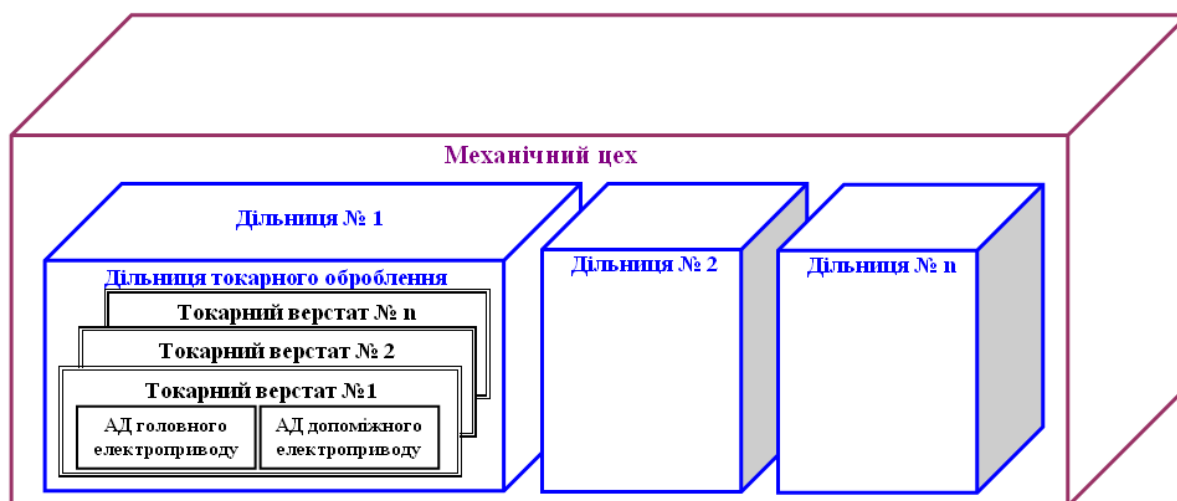
Найменшою (елементною) складовою системи «ПП» є електроприймач, як останній елемент підсистеми «Електропостачання споживачів» (рис. 1.2). Різноманіття електроприймачів на промислових підприємствах досить велике і залежить від галузі підприємства, його виробничої потужності тощо. Нехай це буде деякий токарний верстат. Зазвичай токарний верстат має два електроприводи з асинхронними двигунами (далі – АД) – головний і допоміжний. З погляду нашого дослідження кожний з АД є електроприймачем (в термінах системного аналізу елементом) системи «Токарний верстат». Два АД разом з іншими конструктивними складовими утворюють систему «Токарний верстат». У межах нашого завдання ми розглядаємо тільки електричні складові цієї системи (два АД), які разом виступають як електроспоживач (СЕЕ). Таким чином, система «Токарний верстат» (перший рівень укрупнення) у нашому розгляді становить підсистему «СЕЕ – токарний верстат», яка є складовою системи «Електропостачання споживачів промислового підприємства».

Розглядаємо далі. Наш верстат з іншими верстатами розташований на ділянці «Токарне оброблення». Усі верстати цієї ділянки також становлять СЕЕ більш високого рівня деталізації, і їх можна розглядати як систему СЕЕ ділянка «Токарне оброблення» (другий рівень укрупнення). Ця ділянка разом з іншими ділянками входить до складу системи «СЕЕ – механічний цех».

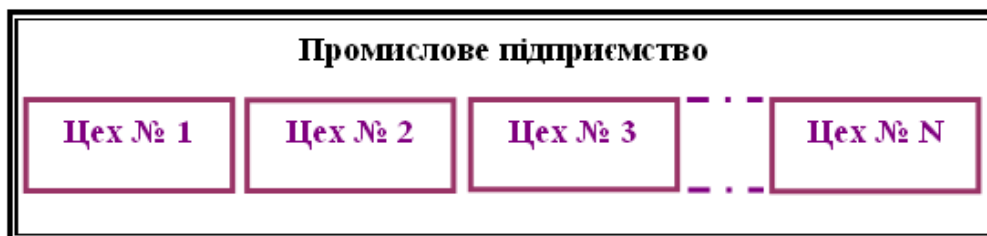
(третій рівень укрупнення), яка, у свою чергу, разом з іншими цехами підприємства утворює систему «СЕЕ – промислове підприємство» (четвертий рівень укрупнення).

Процеси взаємодії промислових підприємств з джерелами їхнього електропостачання необхідно досліджувати в межах системи «Електропостачання споживачів ПП». При цьому вирішується завдання забезпечення промислового підприємства як СЕЕ в цілому, так і окремих його складових, електричною енергією в потрібному обсязі з показниками якості, які відповідають чинним нормативним вимогам. Одночасно розглядаються і питання впливу СЕЕ (підприємства в цілому, його окремих складових) на показники якості і вирішуються завдання усунення порушень, що призводять до виходу показників якості за припустимі значення.

Отримана модель складу системи «Промислове підприємство» наведена на рисунку 2.1 (перший – третій рівні укрупнення) і рисунку 2.2 (четвертий рівень укрупнення).



Рисунк 2.1 – Модель складу системи «Промислове підприємство»: 1–3 рівні укрупнення



Рисунк 2.2 – Модель складу системи «Промислове підприємство»: 4-й рівень укрупнення

Другий приклад – місто. Структуру системи «СЕЕ – місто» розглянемо використовуючи методологію системного аналізу «від складного до простого».

Зауважимо, що внаслідок складності системи «СЕЕ – місто», особливо для великих міст, промислово-транспортних міст, міст категорії «мегаполіс» системний підхід дослідження «від складного до простого» має свої переваги. Приміром, ця методологія дає змогу дослідити процеси складових системи (міський транспорт, система водопостачання міста, житловий сектор тощо) окремо, а потім, у разі потреби, досліджувати процеси взаємодії цих складових.

Продовжимо структурування нашої системи «СЕЕ – місто». У межах цієї системи виділяємо складові (підсистеми), що підпадають під завдання дослідження. Один із можливих варіантів поділу – система життєзабезпечення міста, міський електротранспорт, сфера торгівлі, садово-паркова зона, санітарно-оздоровча зона, адміністративна зона, житлові мікрорайони тощо. Ми отримали складові першого рівня деталізації досліджуваної системи.

Подальшу структурування (другий рівень деталізації) розглянемо на прикладі системи життєзабезпечення міста. Її складові – система газопостачання, система водопостачання та водовідведення, система теплопостачання, система електропостачання та ін.

Складовими системи водопостачання (третій рівень деталізації) є насосні станції першого підйому, станції другого підйому, елементи системи розподілу води по території міста, підвищувальні станції тощо.

Як елементи четвертого рівня деталізації, для насосних станцій першого підйому виділяємо насоси, а саме електродвигуни насосів. Електродвигуни насосів є кінцевими елементами системи – електроприймачами, а сама насосна станція – електроспоживачем.

Для подальшого дослідження, зокрема впливу електродвигунів насосної станції на режим роботи системи електропостачання та на показники якості електричної енергії, встановлюються технічні характеристики електродвигунів та режими їхньої роботи.

Технічні характеристики електроприймачів наводять в паспортних даних, у довідниках. Основними з них є:

- номінальна напруга,  $U_{\text{ном}}$ ;
- номінальна потужність – активна,  $P_{\text{ном}}$  або повна,  $S_{\text{ном}}$ ;
- коефіцієнт активної потужності,  $\cos\phi$  (або реактивної потужності,  $\text{tg}\phi$ ).

Детальніше характеристики і режими роботи електроспоживачів розглянуті в наступних розділах підручника.

## 2.2 Класифікація електроспоживачів

Під класифікацією звичайно розуміють розподіл електроспоживачів за якою-небудь ознакою або за сполученням декількох ознак (потужності, напруги, функціям і т. п.). Унаслідок досить широкого використання електричної енергії в умовах сьогодення загальноприйнятої класифікації електроприймачів та електроспоживачів немає.

Зазвичай споживачі електроенергії систематизують за такими основними експлуатаційно-технічними ознаками:

- виробниче призначення;
- режим роботи;
- потужність і напруга;
- вид струму;
- ступінь надійності живлення;
- територіальне розміщення;
- щільність навантаження;
- постійність розташування.

Ми розглянемо характерні групи електроспоживачів і підходи до їхньої класифікації з погляду завдань дослідження підсистеми «Електропостачання споживачів», зокрема визначення процесів і параметрів електроприймачів, що призводять до порушення показників якості електричної енергії.

Підходи до класифікації електроприймачів і електроспоживачів зумовлені метою класифікації, тобто подальшим використанням отриманих класифікаційних груп.

Деякі класифікаційні групи зазначені в нормативних документах: Правилах улаштування електроустановок (ПУЕ), Державних будівельних нормах (ДБН), постановах та інструкціях Національної комісії, що здійснює державне регулювання у сферах енергетики та комунальних послуг (НКРЕКП). Існують також підходи до класифікації СЕЕ, що застосовують відомства, організації й окремі автори в межах своїх завдань розгляду та дослідження електроприймачів і електроспоживачів.

У цьому розділі ми розглянемо основні класифікаційні групи з метою загального ознайомлення з підходами до класифікації та характерними ознаками різних груп СЕЕ. Надалі, під час вивчення тем курсу, деякі з груп електроспоживачів і електроприймачів будуть розглянуті детальніше.

**2.2.1 Класифікація за ступенем надійності електропостачання.**  
**Надійність електропостачання** – здатність системи електропостачання забезпечити споживачів електроенергією, що відповідає вимогам якості, без аварійних перерв у електропостачанні і порушень технологічного процесу споживача.

Надійність електропостачання в основному залежить від обраної схеми розподільної мережі системи живлення, ступеня резервування окремих елементів системи (ліній, трансформаторів, електричних апаратів тощо). Під час вибору схеми враховують кількість споживачів, їхню потужність, рівень надійності електропостачання складових споживача (приймачів електричної енергії). Класифікація електроприймачів за ступенем надійності і вимоги до їхніх систем електропостачання наведені в ПУЕ, де електроприймачі розподілено на три категорії й надано такі визначення **категорій надійності електроприймачів** [42, п. 1.2.17].

«Електроприймачі *першої категорії* – електроприймачі, переривання електропостачання яких може спричинити: небезпеку для життя людей, значний матеріальний збиток споживачам електричної енергії (пошкодження дорогого основного обладнання, масовий брак продукції), розлад складного технологічного процесу, порушення функціонування особливо важливих елементів комунального господарства.

В складі електроприймачів першої категорії виділяється *особлива група* електроприймачів, безперебійна робота яких необхідна для безаварійної зупинки виробництва з метою запобігання загрозі життю людей, вибухам, пожежам і пошкодженням високовартісного основного обладнання, втраті важливої інформації.

Електроприймачі *другої категорії* – електроприймачі, перерва електропостачання яких призводить до масового недовипуску продукції, масових простоїв робітників, механізмів і промислового транспорту, порушення нормальної діяльності значної кількості міських і сільських жителів.

Електроприймачі *третьої категорії* – решта електроприймачів, що не підпадають під визначення першої та другої категорій.»

**2.2.2 Класифікація за ступенем і величиною напруги.** На *енергоринку України* споживачів електричної енергії поділяють за ступенем напруги і за характером використання електричної енергії.

За ступенем напруги споживачів поділяють на два класи. До *першого класу* належать [60]:

– споживачі які отримують електричну енергію на напрузі 27,5 кВ і вище;

– промислові підприємства із середньомісячними обсягами споживання 150 млн кВт·год та більше незалежно від ступеня напруги.

До *другого класу* належать споживачі, які отримують електричну енергію зі ступенем напруги нижче 27,5 кВ.

За характером (цілями) використання електричної енергії споживачів поділяють на дві групи [61]. До *першої групи* належать суб'єкти господарської діяльності та фізичні особи-підприємці. До *другої групи* відносять населення.

*За величиною напруги* електроприймачі поділяють на *дві групи: до 1 000 В і більше 1 000 В*. Для електроприймачів групи до 1 000 В встановлено такі номінальні напруги [12]:

– на постійному струмі – 6, 12, 27, 48, 60, 110; 220, 440 В;

– на однофазному змінному струмі – 6, 12, 27, 40, 60, 110, 220 В;

– на трифазному змінному струмі – 40, 60, 220, 380, 660 В.

Електроприймачі змінного струму напругою більше 1 000 В мають такі значення номінальних напруг [8]: (6), 10, 20, 35, 110, 220, 330, 500, 750, 1 150 В.

ДСТУ EN 50160:2014 [26] надає класифікацію напруг електричних мереж загального призначення, що відповідає класифікації Європейського комітету зі стандартизації (фр. Comité Européen de Normalisation, CEN):

– низька напруга НН (англ. low voltage, LV) – напруга, середньоквадратичне номінальне значення якої  $U_n \leq 1$  кВ;

- середня напруга СН (англ. medium voltage, MV) – напруга, середньоквадратичне номінальне значення якої  $1 \text{ кВ} \leq U_n \leq 35 \text{ кВ}$ ;
- висока напруга ВН (англ. high voltage, HV) – напруга, середньоквадратичне номінальне значення якої  $36 \text{ кВ} \leq U_n \leq 150 \text{ кВ}$ .

**2.2.3 Класифікація за ознаками фізичних параметрів.** За *родом струму* СЕЕ поділяють на такі групи:

- електроспоживачі змінного струму промислової частоти 50 Гц (у деяких країнах 60 Гц);
- електроспоживачі змінного струму підвищеної або зниженої частоти;
- електроспоживачі постійного струму.

За *кількістю фаз* змінного струму електроприймачі поділяють на трифазні й однофазні.

За ознакою «*частота* змінного струму» електроприймачі можна поділити на три характерні групи: промислової, підвищеної та зниженої частоти. Найбільша питома вага у електроспоживачів промислової частоти.

*Підвищеною* вважається будь-яка частота, більша за промислову, *зниженою* – частота, менша від промислової.

За ознакою «*номінальна потужність*» електроспоживачів умовно можна поділити на такі групи:

- малої потужності – до 1,0 кВт;
- середньої потужності – до 100 кВт;
- великої потужності – декілька МВт;
- надвеликої потужності – десятки МВт.

За ознакою «*режим нейтралі*» електроспоживачів змінного струму можна поділити на три групи: з глухо заземленою нейтраллю, з ізольованою нейтраллю та з компенсованою нейтраллю.

**2.2.4 Класифікація за функціональними ознаками.** Класифікація електроспоживачів за функціональними групами обумовлена потребою враховувати функціональні особливості СЕЕ (належність до певної галузі виробництва, тарифів і системи розрахунків за електроенергію тощо). Як уже зазначалося, загальноприйнятої класифікації СЕЕ немає, зокрема й за функціональними ознаками. Такий стан питання обумовлений тим, що дуже багато функціональних груп електроспоживачів. Як приклад, розглянемо деякі з них, а саме:

- промислові та прирівняні до них електроспоживачі;
- електрифікований залізничний транспорт;
- електрифікований міський транспорт;
- непромислові споживачі;
- сільськогосподарські споживачі;
- споживачі комунального господарства міст;
- побутові споживачі.

*Промислові електроспоживачі* – це сама енергоємна група СЕЕ. На їхню частку припадає 60–70 % споживання електричної енергії. В Україні, у зв'язку із затяжною економічною кризою, їхня частка в сумарному споживанні ЕЕ на сьогодні значно зменшилася.



До промислових споживачів належать підприємства всіх галузей економіки (будівництво, машинобудування, транспорт, гірничодобувна промисловість, металургія тощо), підприємства матеріально-технічного постачання і заготівель, підприємства зв'язку, підприємства комунального господарства і побутового обслуговування.

Ця група СЕЕ характеризується наступними особливостями:

- застосовуються різні системи розрахунків за електроенергію і компенсацію реактивної потужності електроустановок;
- СЕЕ, що беруть участь у регулюванні навантаження, у години добових максимумів і працюють за погодженим з енергосистемою графіком, користуються пільговим тарифом за електроенергію;
- СЕЕ, які можуть регулювати своє електроспоживання за зонами доби, користуються диференційованим тарифами на електроенергію за періодами доби;
- електропостачальна організація здійснює планування електроспоживання у кіловат-годинах і передбачає лімітування навантаження споживача в години максимуму навантаження енергосистеми.

**Електрифікований транспорт** – вид транспорту, який для руху використовує електричну енергію (залізниці, метрополітен, трамвай, тролейбус). У приводі використовується тяговий електродвигун. Характерна відмінність від приводу двигунами внутрішнього згорання – висока екологічність. За обсягами споживання електричної енергії це друга, після промислових підприємств, група СЕЕ.

**Сільськогосподарські споживачі** – це споживачі електроенергії, що безпосередньо виробляють сільськогосподарську продукцію (зрошувальні системи та їхні станції, майстерні ремонту сільськогосподарських машин і механізмів тощо).

Промислові та прирівняні до них споживачі залежно від споживаної потужності поділяють на дві групи: із приєднаною потужністю 750 кВА і більше; із приєднаною потужністю менше 750 кВА.

Усі зазначені групи електроспоживачів залежно від напруги поділяють на два класи: перший клас напруги – 35 кВ і більше; другий клас напруги – менше 35 кВ.

**Побутові споживачі:** населення; підсобні, присадибні, індивідуальні, садові ділянки і дачі, що перебувають в особистому користуванні; гаражі для особистих машин; особисті майстерні художників і скульпторів; системи освітлення дворів, сходів і номерних ліхтарів. Це сама чисельна група СЕЕ.

За ознакою **виду перетворення електроенергії** споживачів поділяють:

- устаткування перетворення ЕЕ в енергію електричного, енергію магнітного, енергію електромагнітного полів;
- устаткування перетворення ЕЕ в енергію руху (обертання, лінійне переміщення, коливання), енергію тепла (електричні печі, електричні котли, електроконвектори та ін.), енергію освітлення.

Детальніше характеристики і властивості окремих груп СЕЕ ми розглянемо в наступних темах курсу.

## 2.3 Параметри та характеристики електроприймачів

За термінологією теорії систем *параметр* – це властивість (показник) системи, яку можна вимірити. Результатом вимірювання параметра системи є число (величина параметра). Саму систему можна розглядати як безліч параметрів, які дослідник вважає за необхідне вимірити для моделювання поведінки системи.

У процесі розгляду електроспоживача (електроприймача) як системи, ми беремо до уваги ті параметри, які забезпечують нормальну роботу і одночасно виділяємо параметри, які призводять до порушення показників якості ЕЕ.

Параметри поділяємо на три групи: вхідні, внутрішні і вихідні.

**2.3.1 Номінальні параметри електроприймачів.** Стандарт ДСТУ 2267-93 [23] визначає номінальний параметр електротехнічного пристрою як зазначений виробником параметр, при якому пристрій має працювати й по відношенню до якого визначаються відхилення. Серед множини номінальних параметрів різноманітних електроприймачів насамперед розглядають такі: номінальна напруга, струм і потужність, коефіцієнт активної потужності.

**Номінальна напруга.** У межах дослідження процесів взаємодії системи електропостачання зі споживачами ЕЕ і системи електропостачання з приймачами ЕЕ ми розглядаємо визначення поняття «номінальна напруга» для системи «Електропостачання споживачів», як вихідного параметра підсистеми «Джерело ЕЕ» (див. рис. 1.2), і визначення поняття номінальна напруга для СЕЕ і приймачів ЕЕ.

**Номінальна напруга електричної мережі** ( $U_{\text{ном}}$ ) (міжнародне позначення –  $U_n$ , nominal voltage) – величина напруги, на яку розраховано чи до якої віднесено електричну мережу, а також у прив'язці до якої визначено окремі експлуатаційні характеристики [26]. Номінальна напруга електричної мережі у точці приєднання споживачів ЕЕ є вихідним параметром «Джерела ЕЕ» і одночасно вхідним параметром для споживача ЕЕ. Вона використовується для розрахунків режимів електричних мереж і для визначення відхилень за показниками якості ЕЕ.

**Номінальна напруга електроспоживача** – напруга на шинах з'єднання споживачів з джерелом ЕЕ і за умови якої електроспоживачі функціонують з розрахунковими режимами і забезпечують напругу на введеннях електроприймачів у межах допустимих відхилень.

**Номінальна напруга електроприймача** ( $U_{\text{ном}}$ ) – напруга, зазначена в паспортних (каталожних) даних, і підключення якої забезпечує функціонування електроприймача з розрахунковою продуктивністю (ККД, розрахункові режими роботи, обсяг споживання потужності, коефіцієнт активної потужності  $\cos\phi$  тощо).

**Номинальний струм.** *Номинальний струм* ( $I_{\text{ном}}$ ) – це струм, що споживається електроприймачем при номінальній напрузі живлення й номінальному навантаженні на виході електроприймача. У цьому випадку вважають що електроприймач працює в номінальному режимі (див. розд. 3).

**Номинальна потужність.** *Номинальна* (синонім – встановлена) *потужність* – розрахункова потужність електроприймача, зазначена в технічному паспорті, яку він споживає з електричної мережі за умови номінального значення напруги й нормального режиму роботи (див. підрозд. 3.3).

Для різних груп електроприймачів номінальна потужність може бути задана як: активна потужність, кВт; реактивна потужність, квар; повна потужність, кВА.

Активна потужність визначає споживання тільки корисної активної електричної енергії, що витрачається на виконання основної роботи. Реактивна потужність визначає величину втрат на передавання (транспортування) потужності, нагрівання ізоляції, електродинамічні сили. Повна потужність визначає максимально можливу потужність, яку можна одержати при ідеальних умовах експлуатації.

Як повна ( $S_{\text{ном}}$ , кВА), номінальна потужність зазначається для силових трансформаторів, плавильних електропечей і зварювальних установок. Як активна ( $P_{\text{ном}}$ , кВт), номінальна потужність задається для печей опору, ванн електролізу, джерел світла. Для конденсаторних батарей номінальною вважається їхня реактивна потужність ( $Q_{\text{ном}}$ , квар).

Номинальна потужність електродвигунів – це корисна механічна потужність на валу двигуна ( $P_{\text{ном}}$ ) при номінальному навантаженні і тривалому режимі роботи, зазначена у кіловатах.

**Коефіцієнт активної потужності.** *Коефіцієнт активної потужності* ( $\cos\varphi$ ) є важливим параметром електроприймача, який характеризує співвідношення між активною і повною потужностями, що споживаються з електричної мережі при номінальних напрузі й навантаженні. Поряд зі значенням коефіцієнта активної потужності  $\cos\varphi$  у паспортних даних наводять також значення коефіцієнта реактивної потужності  $\text{tg}\varphi$ .

Значення  $\cos\varphi$  електроприймача залежить від технологічного процесу і в багатьох установках може бути значно меншим від значень, рекомендованих для систем електропостачання. Для електродвигунів  $\cos\varphi$  також залежить від навантаження на валу (режиму роботи: холостий хід, номінальне навантаження, перенавантаження).

Для зменшення впливу електроприймача на величину  $\cos\varphi$  джерела живлення застосовують спеціальні пристрої компенсації реактивної потужності (підвищення  $\cos\varphi$ ).

Питання підвищення  $\cos\varphi$  розглянуті в п. 5.1.

**Коефіцієнт корисної дії.** Важливим параметром електроприймачів є *коефіцієнт корисної дії* (ККД), який визначається як відношення корисної потужності на виході до активної потужності на вході електроприймача.

**2.3.2 Потужність електроприймачів.** У випадку однофазного споживача ЕЕ його потужність визначають за відомими формулами:

$$\begin{aligned} P &= U \cdot I \cos \varphi, \text{ Вт}; \\ Q &= U \cdot I \sin \varphi, \text{ вар}; \\ S &= U \cdot I, \text{ ВА} \end{aligned} \quad (2.1)$$

де  $U$  – напруга на клеммах введення електроприймача, В;

$I$  – струм на клеммах введення електроприймача, А;

$\cos \varphi$ ,  $\sin \varphi$  – коефіцієнти активної й реактивної (відповідно) потужності електроприймача;

$P$ ,  $Q$ ,  $S$  – активна, реактивна і повна (відповідно) потужності електроприймача.

Трифазні електроприймачі та основна частина однофазних електроприймачів отримують живлення від трифазної чотирипровідної системи, яка забезпечує їх симетричним живленням. У цьому випадку активна, реактивна й повна потужності можуть бути визначені за наступними формулами з урахуванням знаків реактивних опорів:

$$\left. \begin{aligned} P &= I_a^2 R_a + I_b^2 R_b + I_c^2 R_c = I_a \cdot U_a \cdot \cos \varphi_a + I_b \cdot U_b \cdot \cos \varphi_b + I_c \cdot U_c \cdot \cos \varphi_c; \\ Q &= I_a^2 \cdot X_a + I_b^2 \cdot X_b + I_c^2 \cdot X_c = \\ &= I_a \cdot U_a \cdot \sin \varphi_a + I_b \cdot U_b \cdot \sin \varphi_b + I_c \cdot U_c \cdot \sin \varphi_c; \\ S &= \sqrt{P^2 + Q^2}, \end{aligned} \right\} (2.2)$$

де  $\cos \varphi_a = R_a / Z_a$ ;  $\cos \varphi_b = R_b / Z_b$ ;  $\cos \varphi_c = R_c / Z_c$ ;  $\sin \varphi_a = X_a / Z_a$ ;  $\sin \varphi_b = X_b / Z_b$ ;  $\sin \varphi_c = X_c / Z_c$ .

Індекси  $a$ ,  $b$  і  $c$  у рівняннях (2.2) відповідають значенням параметрів відповідних фаз (А, В, С) споживача ЕЕ.

При симетричному навантаженні ці формули мають наступний вигляд:

$$\left. \begin{aligned} P &= 3I_\phi^2 R_\phi = \sqrt{3}U_\phi I_\phi \cos \varphi_\phi; \\ Q &= 3I_\phi^2 X_\phi = \sqrt{3}U_\phi I_\phi \sin \varphi_\phi; \\ S &= \sqrt{P^2 + Q^2} = \sqrt{3}U_\phi I_\phi, \end{aligned} \right\} (2.3)$$

де  $\cos \varphi_\phi = R_\phi / Z_\phi$ ;  $\sin \varphi_\phi = X_\phi / Z_\phi$ ;

$U_\phi$ ,  $I_\phi$  – лінійні напруга і струм (відповідно) електроспоживача.

Індекс  $\phi$  у рівняннях (2.3) позначає відповідний параметр фази споживача ЕЕ.

Для розрахунку складних кіл змінного струму використовують поняття *комплексної потужності трифазного кола*, яку розглядають як *суму комплексних потужностей усіх фаз джерела енергії, що дорівнює сумі комплексних потужностей усіх фаз приймача*.

Повну потужність кожної фази споживача можна визначити за формулами:

$$\left. \begin{aligned} \tilde{S}_a &= P_a \pm jQ_a = \dot{U}_a \cdot I_a^* \\ \tilde{S}_b &= P_b \pm jQ_b = \dot{U}_b \cdot I_b^* \\ \tilde{S}_c &= P_c \pm jQ_c = \dot{U}_c \cdot I_c^* \end{aligned} \right\}; \quad (2.4)$$

де  $I_a^*$ ,  $I_b^*$ ,  $I_c^*$  – сполучені комплексні струми у фазах відповідно.

Загальна повна потужність трифазного електроспоживача

$$\tilde{S} = \tilde{S}_a + \tilde{S}_b + \tilde{S}_c. \quad (2.5)$$

Співвідношення (2.1) – (2.5) дозволяють виконувати розрахунки потужностей споживачів ЕЕ.

**2.3.3 Характеристики електроприймачів.** *Характеристику* системи ми розглядаємо як функціональну залежність між двома або більшою кількістю параметрів системи.

Характеристики розглядаємо на підставі моделі взаємодії електроприймача й системи електропостачання (рис. 2.3). Це модель типу «Чорний ящик» (рис. 1.3), яка дозволяє зосередитися на суті питання, не вдаючись у подробиці структури електроприймача й суті процесів, які в ньому відбуваються. Зауважимо, що такий підхід базується на розумінні, що студентам відомі основні положення дисциплін, які передують вивченню курсу «Споживачі електричної енергії» (загальна фізика, ТОЕ, промислова електроніка, електричні машини, електропостачання та електрозбереження, автоматизований електропривод), тобто вони вивчили питання фізики внутрішніх процесів основних груп електроприймачів.

Потоками входу для електроприймача є електрична енергія, параметри якої (номінальна напруга, частота й синусоїдальність струму, симетрія фаз, наявність провалів напруги, імпульсних напруг і тимчасових перенапруг) відповідають вимогам якості ЕЕ [14].

Розглядаючи потоки входу, звертаємо увагу на вхідні характеристики електроприймача (залежності між потоками входу й внутрішніми параметрами та режимом роботи електроприймача). Розгляд вихідних потоків обмежуємо дослідженням вихідних характеристик. До моделі включаємо

зворотні зв'язки, а саме фактори впливу електроприймача на показники якості ЕЕ.

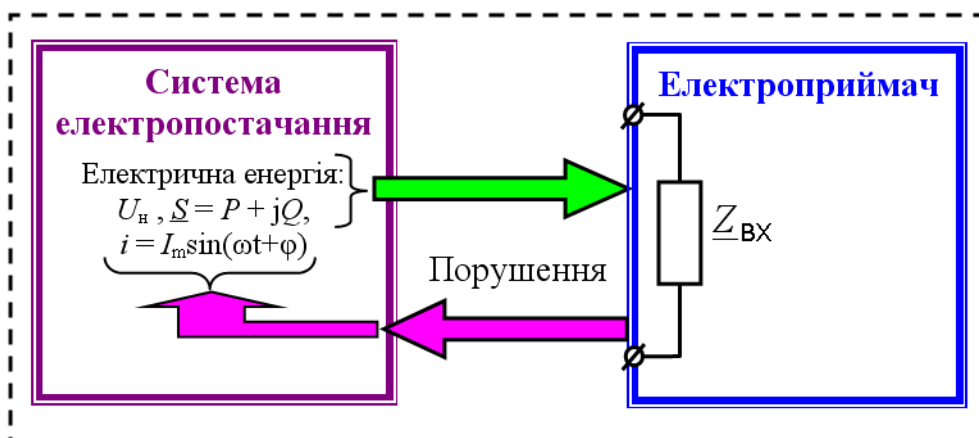


Рисунок 2.3 – Модель взаємодії електроприймача й системи електропостачання

Характеристики електроприймачів розглянемо на підставі наведеної на рисунку 2.4 узагальненої моделі електроприймача, моделі типу «Чорний ящик».

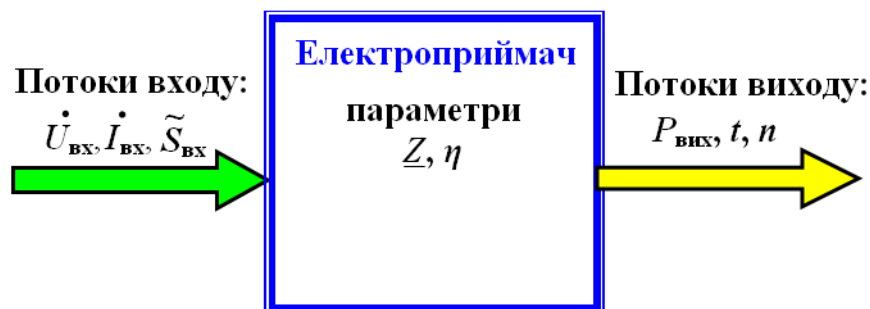


Рисунок 2.4 – Модель електроприймача типу «Чорний ящик»

Вхідним потоком системи «Електроприймач» є електрична енергія (ЕЕ). Для розгляду характеристик системи «Електроприймач» ми виділяємо складові (параметри) ЕЕ – комплекси вхідної напруги, вхідного струму і вхідної повної потужності. Розгляд цих параметрів як комплексних величин дає змогу, у разі потреби, враховувати їхні активні й реактивні складові, коефіцієнт потужності. Частоту електричного струму не розглядаємо з урахуванням того, що окремий електроприймач не впливає на частоту мережі живлення.

Серед внутрішніх параметрів електроприймача виділяємо вхідний опір  $\underline{Z}$  і коефіцієнт корисної дії  $\eta$ . У разі розгляду споживачів з однофазними електроприймачами до уваги беремо опори за фазами схеми електроспоживання.

Фізичні величини вихідних параметрів залежать від характеру перетворення електричної енергії в електроприймачі (в механічну, теплову, світлову тощо). У випадку механічної енергії це може бути вихідна потужність ( $P_{\text{вих}}$ , Вт), кругова швидкість обертання ( $n$ , об/хв). Для теплової енергії – температура ( $t$ , °С).

Характеристики електроприймачів розглядаються в межах робочих діапазонів зміни параметрів. Особлива увага звертається на лінійність характеристик, що є головною умовою збереження синусоїдальності форми напруги й струмів. Найчастіше нелінійність характеристик електроприймачів зумовлена наявністю напівпровідникових електронних або електро-розрядних, а також насичених феромагнітних елементів. Типовими прикладами цих елементів є напівпровідникові перетворювачі, феромагнітні регулятори, розрядні лампи, електродугові печі, зварювальні установки тощо. Електроприймачі з нелінійними характеристиками є причиною появи вищих гармонік струмів та напруг, наявність яких призводить до надмірних втрат ЕЕ в системі живлення.

*Характеристики*, що враховують зміну параметрів від часу вмикання електроприймача, називаються *пусковими*. Здебільшого це пускові струми потужних електроприймачів. Таку властивість мають пускові струми асинхронних двигунів з короткозамкненим ротором, які перевищують номінальний струм в 5–7 разів і тривають від часток секунди до кількох секунд, а іноді й до десятків секунд. Істотними можуть бути й пускові струми, що виникають під час запалювання розрядних ламп високого тиску (1,5–2 кратний струм протягом декількох хвилин). Особливі умови щодо системи свого електропостачання створюють дугові електропечі за рахунок значних кидків струму в деяких режимах роботи.

Характеристики деяких характерних груп електроприймачів будуть розглянуті в наступних розділах підручника.

## **Висновки**

Класифікацій приймачів і споживачів ЕЕ дуже багато. Класифікаційну ознаку вибирають залежно від мети дослідження взаємодії електроспоживача й системи його електропостачання. Характерними групами електроспоживачів є міста й промислові підприємства.

Дослідження електроприймачів базується на розгляді їхніх параметрів та характеристик.

Номінальні параметри електроприймача забезпечують його роботу з показниками, гарантованими виробником.

Характеристики електроприймача дають уявлення про фізику його внутрішніх процесів, дозволяють оптимізувати його режим роботи, зменшити вплив на показники якості ЕЕ системи електропостачання.

## **Запитання для самоконтролю**

1. Наведіть приклад структуризації системи «СЕЕ» «від простого до складного».

2. Наведіть приклад структуризації системи «СЕЕ» «від складного до простого».
3. Що розуміють під рівнем структуризації (деталізації) системи?
4. Наведіть приклад вибору підходу до класифікації електроприймачів (електроспоживачів).
5. На які групи поділяють електроприймачів за ступенем надійності електропостачання? Надайте загальне визначення цих груп.
6. На які групи поділяють електроприймачів за ступенем та величиною напруги?
7. Надайте приклади класифікації електроприймачів за ознаками фізичних параметрів.
8. Надайте приклади класифікації електроприймачів за функціональними ознаками.
9. Що розуміють під поняттям «параметр»? Наведіть приклади параметрів електроприймачів.
10. Надайте визначення номінального параметра.
11. Наведіть приклади номінальних параметрів декількох електроприймачів.
12. Яка різниця між номінальною напругою електроприймача й номінальною напругою системи живлення електроприймача?
13. У чому полягає перевага трифазних електроприймачів у порівнянні з однофазними?
14. Чим різняться потоки входу й виходу системи «Приймач електричної енергії»?
15. У чому полягає особливість пускових характеристик електроприймача?

### **Список рекомендованих джерел**

Основні джерела: [42, С. 13–15], [21, С. 2–5], [46, С. 34–38, 59–61], [27, С. 14–23], [3, С. 22–44].

Додаткові джерела: [8], [12], [23], [26], [60], [61].



### Розділ 3 РЕЖИМИ РОБОТИ ПРИЙМАЧІВ ЕЛЕКТРИЧНОЇ ЕНЕРГІЇ

**Ключові поняття:** режим роботи (короткочасний, тривалий, переривчато-тривалий, повторно-короткочасний, усталений, перехідний, пусковий, нормальний, аномальний, перевантаження, короткого замикання, симетричний, несиметричний, неповнофазний), схеми вмикання («зірка» без нульового проводу, «зірка» з нульовим проводом, «трикутник»), потужність трифазного електроспоживача.

Існують наступні підходи щодо розгляду режимів роботи: за тривалістю вмикання, за усталеністю параметрів, за ступенем аварійності, за схемою вмикання трифазних електроприймачів, за рівномірністю навантаження фаз тощо.

Розгляд приймачів ЕЕ як систем і застосування принципів багатоаспектності і багатомірності щодо вивчення їхніх режимів роботи дає змогу зосередити увагу на факторах впливу приймачів ЕЕ на режим роботи та якісні показники електричної енергії в системі електропостачання.

Основним експлуатаційним режимом роботи електроприймачів є **номінальний режим**, у якому значення кожного з параметрів режиму дорівнюють номінальним [23]. Це режим роботи, на який електроприймач запроектований і виготовлений для експлуатації. За даними номінальних параметрів розраховуються елементи системи електропостачання електроприймача (апаратура вмикання-вимикання, управління режимом роботи, захисту від аварійних режимів, переріз проводів (кабелів) живлення).

Визначення характерних режимів роботи електроприймачів наведені в ДСТУ 2267-93 [23].

#### 3.1 Режими за тривалістю вмикання

Залежно від тривалості вмикання розрізняють такі режими роботи електроприймачів [23]: короткочасний, повторно-короткочасний, тривалий і переривчасто-тривалий.

**Короткочасним** вважається режим (рис. 3.1) при якому час роботи з фактично незмінним навантаженням ( $t_p$ ) чергується з часом перерви в роботі ( $t_n$ ).

Температура всіх елементів електроприймача під час його роботи підвищується від температури навколишнього середовища ( $\tau_{нс}$ ) до деякого значення, яке не досягає сталого значення і менше за максимально допустимого температуру. Під час паузи в роботі температура електроприймача зменшується до температури навколишнього середовища.

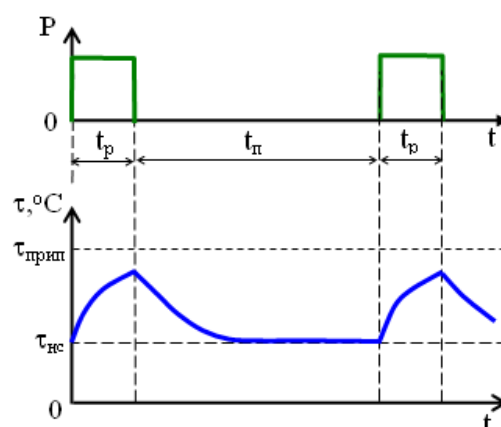


Рисунок 3.1 – Діаграма навантаження і крива нагрівання та охолодження для короткочасного режиму

У короткочасному режимі працюють електродвигуни заслінок систем регулювання подачі рідин та газів, кранів та підймальних механізмів тощо.

**Тривалим** вважається **режим** такої тривалості, за якої температура усіх частин електроприймача досягає сталого значення при незмінній температурі оточуючого середовища (рис. 3.2). У тривалому режимі працюють насоси, вентилятори, компресори, транспортери і т. ін.

У випадку коли тривалий режим роботи чередується з припиненням роботи, говорять про **переривчасто-тривалий режим** роботи електроспоживача.

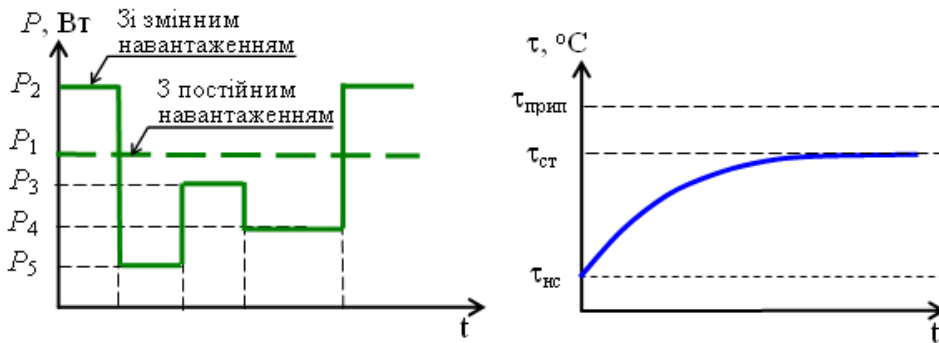


Рисунок 3.2 – Діаграма навантаження й крива нагрівання електроприймача у тривалому режимі

**Повторно-короткочасний режим** (рис. 3.3) характеризується тим, що після декількох циклів вмикання ( $t_{ц}$ ) при практично незмінному навантаженні температура приймача коливається між значеннями  $\tau_{\max}$  і  $\tau_{\min}$ . Нагрівання за нормального навантаження не перевищує припустимої температури для класу ізоляції приймача  $\tau_{\text{прип}}$ , а охолодження за час паузи не досягає температури навколишнього середовища  $\tau_{\text{нс}}$ .

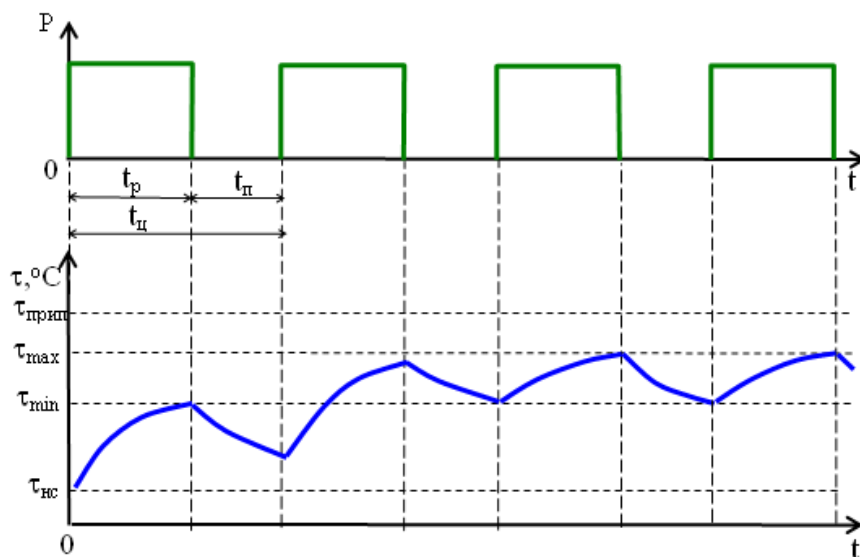


Рисунок 3.3 – Діаграма навантаження й крива нагрівання для повторно-короткочасного режиму

Основною характеристикою повторно-короткочасного режиму роботи є *відносна тривалість вмикання* ТВ, яка враховує тривалість робочого циклу й визначає теплове навантаження приймача:

$$ТВ = \frac{t_p}{t_p + t_n} 100 \%. \quad (3.1)$$

Міждержавним стандартом [6] встановлені такі стандартні значення ТВ, які враховуються при розрахунках режимів роботи електрообладнання: 15; 25; 40 і 60 %.

У розрахунках системи живлення електроприймача, що працює в повторно-короткочасному режимі, використовується розрахункова потужність  $P_p$ , яка визначається за співвідношенням

$$P_p = \sqrt{ТВ} \cdot P_{ном}. \quad (3.2)$$

При тривалості циклу більше 10 хвилин і  $ТВ > 60 \%$  режим роботи електроприймача вважається тривалим.

### 3.2 Режими за усталеністю параметрів

З погляду усталеності параметрів електроприймача і параметрів режиму розрізняють такі режими: усталений, перехідний, пусковий.

*Усталений режим роботи* електроприймача характеризується практично постійними значеннями всіх параметрів режиму або періодичною зміною параметрів режиму.

Режим переходу від одного усталеного режиму роботи електроприймача до іншого усталеного режиму називається *перехідним режимом роботи*.

У випадку *пускового режиму* після вмикання напруги параметри електроприймача й параметри режиму змінюються і протягом деякого часу набувають усталених значень. Характер пускового режиму враховується при виборі елементів управління й захисту електроприймача.

### 3.3 Режими за ступенем аварійності

За ступенем аварійності розрізняють такі режими роботи: нормальний, аномальний, аварійний, перевантаження, короткого замикання.

*Нормальний режим* роботи характеризується тим, що всі параметри режиму електроприймача відповідають робочим значенням [23].

Нормальний режим співпадає з номінальним режимом роботи в межах припустимих відхилень параметрів від номінальних значень.

*Аномальним* вважається *режим*, у якому значення хоча б одного із параметрів режиму виходять за межі найбільшого або найменшого робочого значення [23].

*Аварійний режим* – режим роботи електроприймача, у якому напруга або струм досягають таких значень, що при достатній тривалості роботи це загрожує пошкодженням або руйнуванням електроприймача [23].

Під час проектування системи електропостачання передбачаються елементи захисту електроприймача від аварійних режимів.

**Режим перевантаження** – режим роботи електроприймача, у якому навантаження на його виході перевищує номінальне значення. При цьому робочий струм електроприймача перевищує своє номінальне значення. Фактично режим перевантаження є різновидом аварійного режиму, у якому при значеннях робочого струму  $I_p = (1,3-1,7) \cdot I_{ном}$  спрацьовують пристрої захисту електроприймача від перевантаження (запобіжники або теплові реле).

**Режим короткого замикання** – режим роботи, у якому електричний опір навантаження дорівнює нулю, або режим, у якому електроприймач з'єднаний з джерелом живлення і перебуває у *заклиненому* стані [23]. При заклиненому стані навантаження на виході електроприймача значно перевищує номінальне значення, що призводить до багаторазового збільшення струму і, в разі відсутності елементів захисту, до розплавлення й загоряння ізоляції. Як елементи захисту застосовуються електромагнітні реле (максимального струму, диференційний захист тощо).

### 3.4 Режими схем вмикання трифазних електроприймачів

У трифазних електричних мережах можливі такі схеми вмикання споживачів: «зірка» без нульового проводу, «зірка» з нульовим проводом і «трикутник».

**3.4.1 «Зірка» без нульового проводу.** У випадку з'єднання електроприймачів «зіркою» без нульового проводу кінці фаз приймачів з'єднують в нейтральну точку  $n$ , а початки фаз підключають до лінійних проводів системи електропостачання, як це показано на рисунку 3.4. Згідно з рекомендацією ПУЕ [42] застосовуються такі кольорові позначення фаз: фаза А – жовтий, фаза В – зелений, фаза С – червоний.

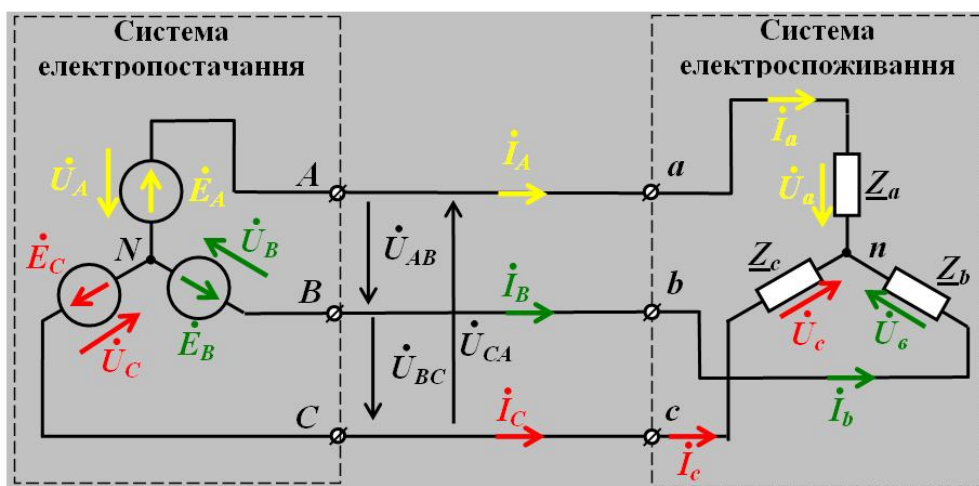


Рисунок 3.4 – З'єднання електроприймачів «зіркою» без нульового проводу

Напруги  $U_a, U_b, U_c$ , що діють між початками й кінцями фаз споживача, є фазними напругами споживача. Напруги  $U_{ab}, U_{bc}, U_{ca}$ , що діють між початками фаз споживача, є лінійними напругами.

На схемі рисунка 3.4 наведені умовні додатні напрями фазних і лінійних напруг. Лінійні струми  $I_{\text{л}}$  у лініях живлення ( $I_A, I_B, I_C$ ) у разі з'єднання трифазного споживача електроенергії «зіркою», умовний додатний напрям яких показано на схемі рисунка 3.4, є одночасно і фазними струмами  $I_{\text{ф}}$ , що течуть фазами споживача ( $I_a, I_b, I_c$ ). Тому, в розглянутому випадку, за наявності симетричної трифазної системи при з'єднанні фаз споживача «зіркою» лінійні струми дорівнюватимуть фазним струмам:

$$I_{\text{ф}} = I_{\text{л}}. \quad (3.3)$$

Трифазні споживачі електроенергії можуть бути симетричними й несиметричними. Для симетричних споживачів справедливі такі співвідношення:

$$\begin{aligned} U_a = U_b = U_c = U_{\text{ф}}; \quad U_{AB} = U_{BC} = U_{CA} = U_{\text{л}}; \quad Z_a = Z_b = Z_c = Z_{\text{ф}}; \\ R_a = R_b = R_c = R_{\text{ф}}; \quad X_a = X_b = X_c = X_{\text{ф}}; \\ \cos\varphi_a = \cos\varphi_b = \cos\varphi_c = \cos\varphi_{\text{ф}}. \end{aligned}$$

Співвідношення між фазними й лінійними напругами визначають як

$$U_{\text{л}} = \sqrt{3}U_{\text{ф}}. \quad (3.4)$$

Для **несиметричних трифазних** споживачів не всі ці співвідношення зберігаються (див. розд. 4.5).

Під час аналізу трифазних електричних кіл широко використовують метод комплексних чисел. За його допомогою можна здійснювати розрахунки, які неможливо виконати іншими методами.

На рисунку 3.5 на площині комплексних чисел наведена векторна діаграма фазних  $\dot{U}_a, \dot{U}_b, \dot{U}_c$  і лінійних  $\dot{U}_{AB}, \dot{U}_{BC}, \dot{U}_{CA}$  напруг споживача електроенергії, при цьому вектор фазної напруги  $\dot{U}_a$  направлений за віссю дійсних чисел в додатному напрямі. З урахуванням цього фазні напруги трифазного симетричного споживача можна подати в комплексній формі запису:

$$\left. \begin{aligned} \dot{U}_a = U_a = U_{\text{ф}} = \frac{U_{\text{л}}}{\sqrt{3}}; \\ \dot{U}_b = U_b \left(-\frac{1}{2} - j\frac{\sqrt{3}}{2}\right) = U_{\text{ф}} \left(-\frac{1}{2} - j\frac{\sqrt{3}}{2}\right) = \frac{U_{\text{л}}}{\sqrt{3}} \left(-\frac{1}{2} - j\frac{\sqrt{3}}{2}\right); \\ \dot{U}_c = U_c \left(-\frac{1}{2} + j\frac{\sqrt{3}}{2}\right) = U_{\text{ф}} \left(-\frac{1}{2} + j\frac{\sqrt{3}}{2}\right) = \frac{U_{\text{л}}}{\sqrt{3}} \left(-\frac{1}{2} + j\frac{\sqrt{3}}{2}\right) \end{aligned} \right\} \quad (3.5)$$

Відповідно до прийнятих умовних позитивних напрямів фазних і лінійних напруг (рис. 3.4) лінійні напруги споживача електроенергії визначають за рівняннями, складеними у комплексній формі запису для відповідних замкнених контурів за другим законом Кірхгофа:

$$\dot{U}_{AB} = \dot{U}_a - \dot{U}_b; \quad \dot{U}_{BC} = \dot{U}_b - \dot{U}_c; \quad \dot{U}_{CA} = \dot{U}_c - \dot{U}_a. \quad (3.6)$$

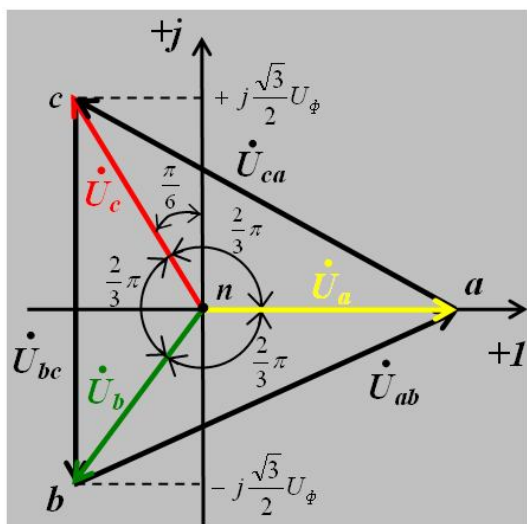


Рисунок 3.5 – Діаграма фазних і лінійних напруг

З топографічної діаграми випливає (рис. 3.5), що лінійні напруги так само, як і фазні, зсунуті відносно одна одної за фазою на кут  $2\pi/3$ . При цьому для симетричної трифазної системи векторна сума фазних напруг  $\dot{U}_a + \dot{U}_b + \dot{U}_c = 0$  і сума лінійних напруг  $\dot{U}_{AB} + \dot{U}_{BC} + \dot{U}_{CA} = 0$ .

З урахуванням наведених вище виразів лінійні напруги споживача для симетричної системи можна виразити наступними співвідношеннями:

$$\dot{U}_{AB} = U_\phi \left( \frac{\sqrt{3}}{2} + j \frac{1}{2} \right); \quad \dot{U}_{BC} = -j U_\phi; \quad \dot{U}_{CA} = U_\phi \left( -\frac{\sqrt{3}}{2} + j \frac{1}{2} \right). \quad (3.7)$$

Аналогічні вирази мають місце й для симетричного трифазного джерела живлення при з'єднанні його фаз «зіркою».

Якщо знехтувати опорами лінійних проводів, що з'єднують трифазне джерело живлення із трифазним споживачем електроенергії, то лінійні напруги споживачів будуть дорівнювати відповідним лінійним напругам джерела живлення:  $\dot{U}_{ab} = \dot{U}_{AB}$ ,  $\dot{U}_{bc} = \dot{U}_{BC}$ ,  $\dot{U}_{ca} = \dot{U}_{CA}$ .

При з'єднанні фаз споживача «зіркою» і симетричному навантаженні комплексні фазні струми визначають з виразів, записаних за законом Ома для ділянки кола:

$$\dot{I}_a = \frac{\dot{U}_a}{Z_a}; \quad \dot{I}_b = \frac{\dot{U}_b}{Z_b}; \quad \dot{I}_c = \frac{\dot{U}_c}{Z_c}. \quad (3.8)$$

Оскільки фазні напруги й повні опори всіх фаз споживачів рівні, фазні й лінійні струми так само будуть дорівнювати один одному:

$$I_a = I_b = I_c = I_\phi = I_\lambda. \quad (3.9)$$

**3.4.2 «Трикутник».** При з'єднанні «трикутником» початок однієї фази споживача електроенергії (або джерела живлення) з'єднують із кінцем його іншої фази, початок якої з'єднано з кінцем третьої фази, а початок третьої – із кінцем першої фази (при цьому початки всіх фаз підклю-

чають до відповідних лінійних проводів). Як видно зі схеми на рисунку 3.6, фазні напруги на споживачі дорівнюватимуть лінійним напругам ( $U_{\phi} = U_{л}$ ).

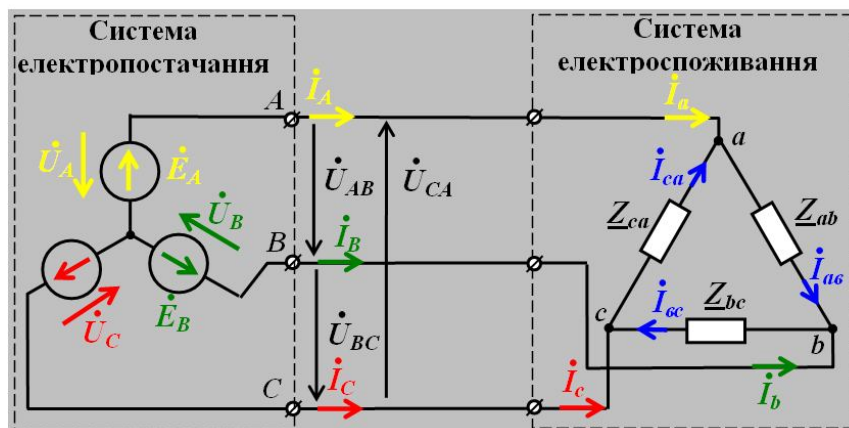


Рисунок 3.6 – З'єднання електроспоживачів «трикутником»

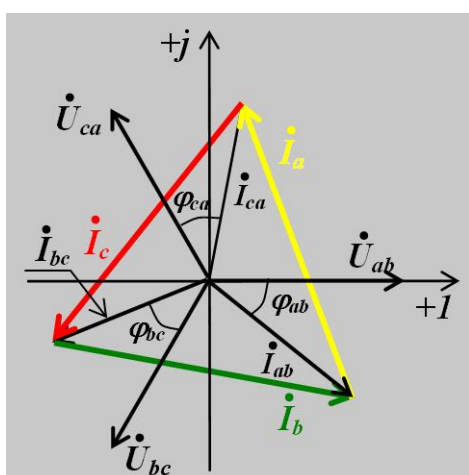
Нехтуючи опором лінійних проводів, лінійні напруги споживача можна порівняти лінійним напругам джерела живлення:

$$\dot{U}_{ab} = \dot{U}_{AB}; \dot{U}_{bc} = \dot{U}_{BC}; \dot{U}_{ca} = \dot{U}_{CA}.$$

При симетричній системі живлення:

$$U_{ab} = U_{bc} = U_{ca} = U_{AB} = U_{BC} = U_{CA} = U_{\phi} = U_{л}. \quad (3.10)$$

Топографічна діаграма напруг на комплексній площині при симетричному живленні для активно-індуктивного навантаження ( $\varphi > 0$ ) наведена на рисунку 3.7. Тут комплексна лінійна напруга  $\dot{U}_{ab}$  спрямована за позитивною віссю дійсних чисел комплексної площини. При цьому комплексні лінійні напруги записують у такому вигляді:



$$\left. \begin{aligned} \dot{U}_{ab} &= U_{ab} = U_{л}; \\ \dot{U}_{bc} &= U_{bc} \left(-\frac{1}{2} - j\frac{\sqrt{3}}{2}\right) = U_{л} \left(-\frac{1}{2} - j\frac{\sqrt{3}}{2}\right); \\ \dot{U}_{ca} &= U_{ca} \left(-\frac{1}{2} + j\frac{\sqrt{3}}{2}\right) = U_{л} \left(-\frac{1}{2} + j\frac{\sqrt{3}}{2}\right). \end{aligned} \right\} (3.11)$$

Рисунок 3.7 – Діаграма струмів і напруг при з'єднанні споживача «трикутником»

Співвідношення між лінійними й фазними струмами при з'єднанні споживача електроенергії «трикутником» і симетричному навантаженні визначають з рівнянь, складених для струмів відповідно до першого закону Кірхгофа для вузлів  $a$ ,  $b$ ,  $c$  розгалуження електричного кола (рис. 3.6):

$$\dot{I}_b + \dot{I}_{ab} - \dot{I}_{bc} = 0; \quad \dot{I}_a + \dot{I}_{ca} - \dot{I}_{ab} = 0; \quad \dot{I}_c + \dot{I}_{bc} - \dot{I}_{ca} = 0. \quad (3.12)$$

При симетричному навантаженні маємо рівність лінійних  $I_a = I_b = I_c$  й фазних  $I_{ab} = I_{bc} = I_{ca}$  струмів. Також маємо рівності кутів зсуву фаз між фазними струмами й напругами  $\varphi_{ab} = \varphi_{bc} = \varphi_{ca}$ , оскільки в цьому випадку рівні коефіцієнти потужності  $\cos\varphi_{ab} = \cos\varphi_{bc} = \cos\varphi_{ca}$ .

**3.4.3 «Зірка» з нульовим проводом.** У трифазних чотирипровідних електричних колах за наявності лінійних проводів, що з'єднують початки фаз джерела живлення і споживача електроенергії, є також нейтральний провід, що з'єднує нейтральну точку  $N$  джерела з нейтральною точкою  $n$  споживача (рис. 3.8). Це забезпечує симетрію фазних напруг джерела й споживача, тому що нейтральний провід рівняє потенціали нейтральних точок  $N$  та  $n$ .

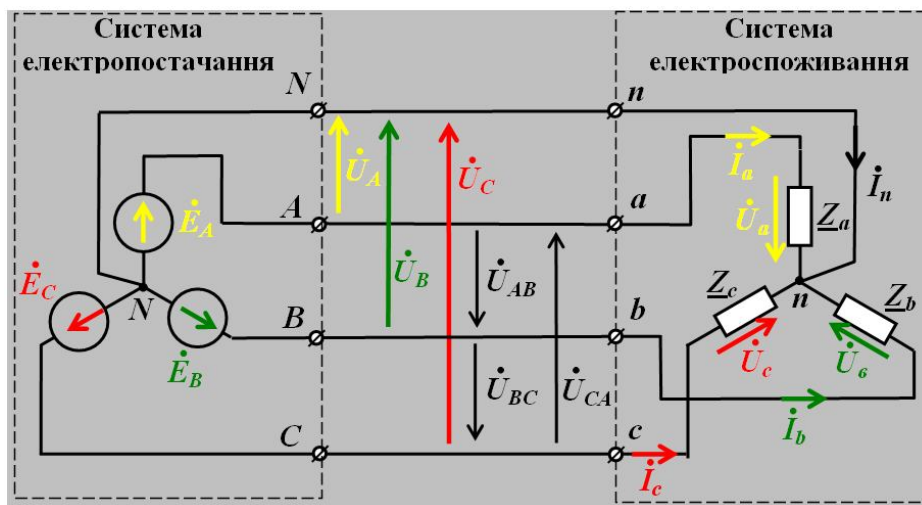


Рисунок 3.8 – З'єднання електроприймачів «зіркою» з нульовим проводом

Трифазні чотирипровідні системи електропостачання набули широкого розповсюдження в розподільних мережах промислових підприємств, житлових і громадських будинках. Вони дозволяють одержати дві напруги, що відрізняються на  $\sqrt{3}$  – фазну  $U_\phi$  і лінійну  $U_\lambda = \sqrt{3} \cdot U_\phi$ . При змішаному силовому й освітлювальному навантаженні силові споживачі електроенергії живлять лінійними напругами  $U_\lambda = 660; 380; 220$  В. Для освітлювального навантаження використовують фазні напруги  $U_\phi = 220; 127$  В.

**У чотирипровідних електричних мережах фази джерела й фази споживача завжди з'єднують «зіркою».**

При несиметричному навантаженні комплексні опори фаз споживача не однакові ( $Z_a \neq Z_b \neq Z_c$ ), при цьому комплексну напругу  $\dot{U}_{Nn}$  (що діє між нейтральними точками  $N$  і  $n$  системи) визначають за методом двох вузлів:

$$\dot{U}_{Nn} = \frac{\dot{E}_A Y_a + \dot{E}_B Y_b + \dot{E}_C Y_c}{Y_a + Y_b + Y_c + Y_N}, \quad (3.13)$$



де  $\dot{E}_A, \dot{E}_B, \dot{E}_C$  – комплексні ЕРС джерела живлення;  $\underline{Y}_a, \underline{Y}_b, \underline{Y}_c, \underline{Y}_N$  – комплексні провідності фаз споживача й нейтрального проводу.

При симетричному навантаженні  $Z_a = Z_b = Z_c$  сума комплексних струмів у точці  $n$  розгалуження кола, записана відповідно до першого закону Кірхгофа:  $\dot{I}_a + \dot{I}_b + \dot{I}_c = \dot{I}_N = 0$  (струм у нейтральному проводі  $I_N = 0$ ). При цьому напруга, що діє між нейтральними точками:  $\dot{U}_{Nn} = \underline{Z}_N \dot{I}_N = 0$ .

Нехтуючи внутрішнім опором симетричного джерела живлення та з урахуванням того, що ЕРС  $E_A = E_B = E_C = E_\phi = \sqrt{3}U_n$ , комплексну напругу між нейтральними точками системи визначають за виразом:

$$\dot{U}_{Nn} = \frac{U_n(\underline{Y}_a + a^2\underline{Y}_b + a\underline{Y}_c)}{\sqrt{3}(\underline{Y}_a + \underline{Y}_b + \underline{Y}_c + \underline{Y}_N)}, \quad (3.14)$$

де  $a = e^{j\frac{2\pi}{3}} = (-\frac{1}{2} + j\frac{\sqrt{3}}{2})$ ,  $a^2 = e^{-j\frac{2\pi}{3}} = (-\frac{1}{2} - j\frac{\sqrt{3}}{2})$  – поворотні оператори.

Комплексні фазні напруги споживача електроенергії знаходять з рівнянь, складених за другим законом Кірхгофа для відповідних замкнених контурів системи (рис. 3.9):

$$\dot{U}_a = \dot{E}_A - \dot{U}_{nN}; \quad \dot{U}_b = \dot{E}_B - \dot{U}_{nN}; \quad \dot{U}_c = \dot{E}_C - \dot{U}_{nN}. \quad (3.15)$$

При цьому комплексні фазні струми споживача визначають за законом Ома для відповідних ділянок кола:

$$\dot{I}_a = \dot{U}_a / \underline{Z}_a; \quad \dot{I}_b = \dot{U}_b / \underline{Z}_b; \quad \dot{I}_c = \dot{U}_c / \underline{Z}_c. \quad (3.16)$$

Комплексний струм у нейтральному проводі знаходять з рівняння, складеного за першим законом Кірхгофа для нейтральної точки  $n$  кола:  $\dot{I}_n = \dot{I}_a + \dot{I}_b + \dot{I}_c$ .

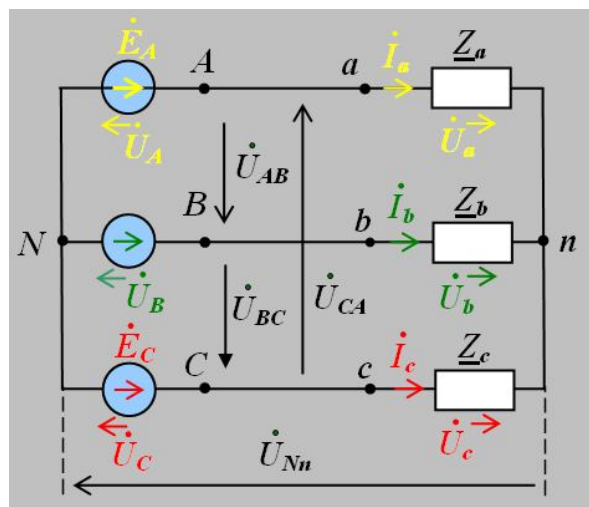


Рисунок 3.9 – Розрахункова схема

При симетричному навантаженні фазні напруги  $U_a = U_b = U_c = U_\phi$ , при цьому:

$$U_\phi = \frac{U_n}{\sqrt{3}}, \quad (3.17)$$

$$I_a = I_b = I_c = I_\phi = \frac{U_\phi}{Z_\phi} = \frac{U_n}{\sqrt{3}Z_\phi}. \quad (3.18)$$

У разі обриву нейтрального проводу його повний опір  $\underline{Z}_N = \infty$ , а повна провідність  $\underline{Y}_N = 0$ .

При несиметричному навантаженні споживача ( $\underline{Z}_a \neq \underline{Z}_b \neq \underline{Z}_c$ ) на векторній діаграмі відбувається

зміщення нейтральної точки  $n$  споживача щодо нейтральної точки  $N$  джерела, що призводить до перекосу фазних напруг споживача. Як наслідок, на одних фазах споживача напруга буде більшою, ніж на інших, що в багатьох випадках неприпустимо. Зокрема при живленні освітлювального навантаження, коли певні освітлювальні прилади перебувають під напругою, меншою від номінальної, а інші – під напругою, більшою від номінальної, що призводить до передчасного виходу приладів з ладу.

У зв'язку з цим у *нейтральному проводі чотирипровідної електричної мережі заборонено встановлювати запобіжники або вимикачі*, оскільки при вимкненому нейтральному проводі фазні напруги можуть стати нерівними. Як наслідок, напруга одних фаз може виявитися меншою за номінальну, а інших – більшою. Приміром, у колах освітлювальних установок буде спостерігатися недорозжарювання ламп у фазах зі зниженою напругою і перерозжарення та передчасне перегорання ламп у фазах з підвищеною напругою.

### 3.5 Порівняння умов роботи споживача при з'єднанні його фаз «зіркою» й «трикутником»

З'єднання фаз приймача «трикутником» часто перемикають на з'єднання «зіркою» для зміни струму й потужності, наприклад для зменшення пускових струмів трифазних двигунів, зміни температури трифазних електричних печей та ін.

Розглянемо, як змінюються діючі значення струмів симетричного приймача з повним фазним опором  $Z_\phi$  у разі перемикання фаз із «зірки» на «трикутник», наприклад триполюсним перемикачем  $S$  (рис. 3.10).

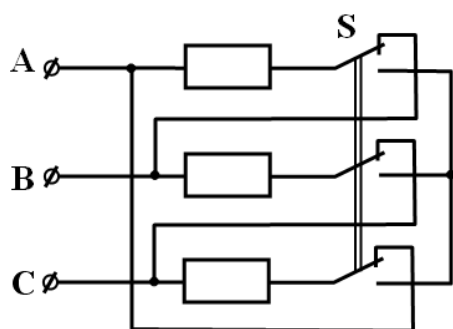


Рисунок 3.10 – Схема перемикання трифазного приймача із «зірки» на «трикутник»

При з'єднанні фаз приймача «зіркою» між діючими значеннями фазних і лінійних струмів і напруг справедливі співвідношення

$$I_{\phi Y} = \frac{U_{\phi Y}}{Z_\phi} = I_{лY}, \quad (3.19)$$

$$U_{\phi Y} = \frac{U_\phi}{\sqrt{3}}, \quad (3.20)$$

з яких випливає, що

$$I_{лY} = \frac{U_\phi}{\sqrt{3}Z_\phi}. \quad (3.21)$$

У разі з'єднання фаз приймача «трикутником» між діючими значеннями фазних і лінійних струмів і напруг справедливі співвідношення

$$I_{\phi\Delta} = \frac{U_{\phi\Delta}}{Z_{\phi}} = \frac{I_{\text{л}\Delta}}{\sqrt{3}}, \quad (3.22)$$

$$U_{\phi\Delta} = U_{\text{л}}, \quad (3.23)$$

з яких випливає, що

$$I_{\text{л}\Delta} = \frac{\sqrt{3}U_{\text{л}}}{Z_{\phi}}. \quad (3.24)$$

Зіставивши вирази для діючих значень лінійних струмів при з'єднанні фаз приймача «зіркою» (3.21) і «трикутником» (3.24), одержимо за умови рівнозначних значень лінійних напруг  $U_{\text{л}}$  і повних фазних опорів  $Z_{\phi}$  у схемах «трикутника» і «зірки» вираз для діючих значень лінійних струмів:

$$I_{\text{л}\Delta} = 3I_{\text{лY}}, \quad (3.25)$$

і для діючих значень фазних струмів:

$$I_{\phi\Delta} = \sqrt{3}I_{\phiY}. \quad (3.26)$$

Активна потужність трифазного симетричного приймача при використанні кожної зі схем з'єднання обчислюється як

$$P = \sqrt{3}U_{\text{л}}I_{\text{л}} \cos \varphi. \quad (3.27)$$

Унаслідок зменшення діючого значення лінійного струму при перемиканні фаз приймача з «трикутника» на «зірку» потужність зменшується в 3 рази, тобто

$$P_{\Delta} = 3 \cdot P_Y. \quad (3.28)$$

### 3.6 Неповнофазні режими трифазних електроспоживачів

У роботі *трифазного симетричного електроприймача* (наприклад асинхронного електродвигуна), який отримує живлення за схемою без нейтрального проводу (рис. 3.4), можливий режим, коли відсутня напруга однієї з фаз. Причинами такої ситуації можуть бути: обрив проводу однієї з фаз подавання напруги до електроприймача, відмова однієї з фаз вимикача під час вмикання або вимикання електроприймача, перегорання плавкої вставки запобіжника однієї з фаз. Такі режими роботи називаються неповнофазними, і для трифазних електроприймачів вони є аварійними. Розглянемо розподіл напруг і струмів за фазами електроприймача у разі наявності неповнофазних режимів.

**3.6.1 Обрив навантаження в одній із фаз.** Розглянемо випадок, коли в електроприймача стався розрив у фазі А, тобто  $\underline{Z}_a = \infty$  (див. рис. 3.4). Напруги на фазах В і С:  $\dot{U}_c = Ue^{-j120^\circ}$ ;  $\dot{U}_c = Ue^{j120^\circ}$ . Опори навантаження фаз В і С –  $\underline{Z}_b = \underline{Z}_c = Ze^{j\varphi}$ . В силу відсутності нульового провідника та струму у фазі А можемо вважати що  $\underline{Z}_{Nn} = \underline{Z}_a = \infty$ , а  $\underline{Y}_{Nn} = \underline{Y}_a = 0$ .

Скориставшись співвідношенням (3.9), запишемо вираз для напруги зміщення нейтралі:

$$\dot{U}_{Nn} = \frac{\dot{U}_A \underline{Y}_a + \dot{U}_B \underline{Y}_b + \dot{U}_C \underline{Y}_c}{\underline{Y}_a + \underline{Y}_b + \underline{Y}_c + \underline{Y}_{Nn}} = \frac{\dot{U}_B \underline{Y}_b + \dot{U}_C \underline{Y}_c}{\underline{Y}_b + \underline{Y}_c} = \frac{1}{2} \dot{U}_B + \dot{U}_C \quad (3.29)$$

Напруги на фазах електроприймача:

$$\dot{U}_a = \dot{U}_A - \dot{U}_{Nn} = \dot{U}_A - \frac{1}{2} \dot{U}_B + \dot{U}_C = \frac{3}{2} \dot{U}_A, \quad (3.30)$$

$$\dot{U}_b = \dot{U}_B - \dot{U}_{Nn} = \dot{U}_B - \frac{1}{2} \dot{U}_B + \dot{U}_C = \frac{\dot{U}_B - \dot{U}_C}{2} = \frac{\dot{U}_{BC}}{2}; \quad (3.31)$$

$$\dot{U}_c = \dot{U}_C - \dot{U}_{Nn} = \dot{U}_C - \frac{1}{2} \dot{U}_B + \dot{U}_C = \frac{\dot{U}_C - \dot{U}_B}{2} = \frac{-\dot{U}_{BC}}{2}. \quad (3.32)$$

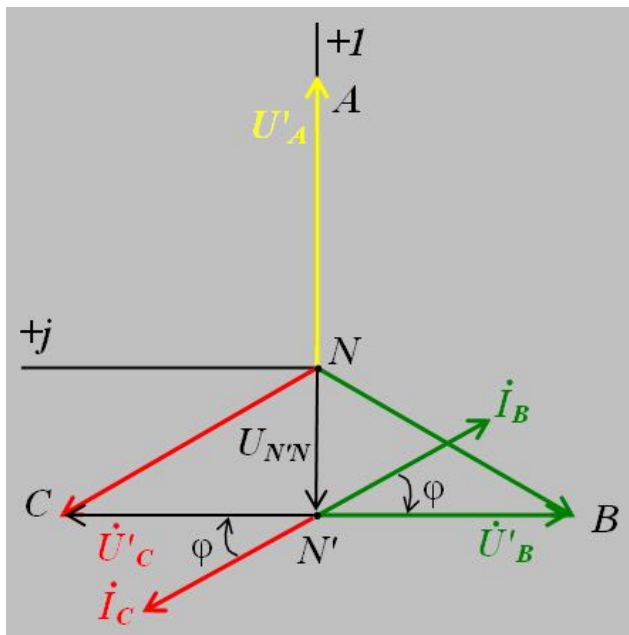


Рисунок 3.11 – Діаграма напруг і струмів

Струми у фазах можна визначити за законом Ома, формули (3.8).

Векторна діаграма струмів і топографічна діаграма напруг наведені на рисунку 3.11

Із діаграми (рис. 3.11) і співвідношень (3.31) (3.32) видно, що у разі обриву однієї з фаз електроприймача напруга на двох його інших фазах зменшується до половини лінійної напруги (за умови симетричного навантаження).

**3.6.2 Коротке замикання однієї з фаз.** Розглянемо випадок, коли в електроприймача сталося коротке замикання по фазі А ( $\underline{Z}_a = 0, \underline{Y}_a = \infty$ ). У цьому разі напруга на фазі А  $\dot{U}_A = 0$  (див. рис. 3.4). Напруги на фазах В і С:  $\dot{U}_c = Ue^{-j120^\circ}$ ;  $\dot{U}_c = Ue^{j120^\circ}$ . Опори навантаження фаз В і С, як і в попередньому випадку,  $\underline{Z}_b = \underline{Z}_c = Ze^{j\varphi}$ .



## Питання для самоконтролю

1. Поясніть підходи до класифікації режимів роботи електроприймачів.
2. Що розуміють під номінальним режимом роботи електроприймача?
3. Чим характеризується класифікація режимів за тривалістю вмикання?
4. Як визначається розрахункова потужність у випадку повторно-короткочасного режиму роботи?
5. Як виконується захист електроприймачів від режиму перевантаження?
6. Як виконується захист електроприймачів від режиму короткого замикання? У чому відмінність у порівнянні із захистом від перевантаження?
7. Поясніть особливості схеми «зірка» без нульового проводу. Коли використовується ця схема?
8. Поясніть особливості схеми «трикутник». Коли використовують цю схему?
9. Поясніть особливості схеми «зірка» з нульовим проводом. Які вимоги щодо встановлення елементів захисту в цій схемі?
10. Порівняйте умови роботи споживача у разі з'єднання його фаз «зіркою» й «трикутником».
11. Поясніть умови появи неповнофазних режимів. У чому полягають особливості цих режимів?

## Список рекомендованих джерел

Основні джерела: [39, С. 259–271], [28, С. 109–120].  
Додаткові джерела: [71], [23], [6].

## Розділ 4 УПЛИВ СИСТЕМИ ЕЛЕКТРОПОСТАЧАННЯ НА РОБОТУ ЕЛЕКТРОПРИЙМАЧІВ

**Ключові поняття:** якість електричної енергії, усталене відхилення напруги, розмах зміни напруги, доза флікера, несинусоїдальність напруги, несиметрія напруги, відхилення частоти, провал напруги, імпульс напруги, тимчасова перенапруга.

Функціонування електроприймачів з розрахунковими (паспортними) характеристиками і економічними показниками забезпечується якщо електрична енергія відповідає нормативним вимогам, які називаються показниками якості. Відхилення цих показників за межі максимально припустимих значень призводить до погіршення техніко-економічних показників приймачів ЕЕ. Одночасно погіршується і ефективність експлуатації системи електропостачання, здебільшого внаслідок збільшення втрат потужності та енергії. У цій темі розглядаються показники якості електричної енергії і їхній вплив на роботу електроприймачів.

### 4.1 Показники якості електричної енергії

*Якість електричної енергії – це ступінь відповідності параметрів електричної енергії їхнім установленим значенням [58].* Вона визначається показниками, які регламентують припустимі рівні впливу електромагнітних завад на параметри електричної енергії (відхилення параметрів від нормованих значень). Показники якості ЕЕ зазначені у Міждержавному стандарті Е02 ГОСТ 13109-97 [58]. Цим стандартом встановлено два види відхилень від норм якості електричної енергії: нормально припустимі й гранично припустимі (див. табл. 4.1).

Визначення показників якості ЕЕ зумовлено втратою напруги на ділянці електричної мережі, яка визначається виразом:

$$\Delta U_i = (P_i \cdot R_i + Q_i \cdot X_i) / U_{\text{ном}}, \quad (4.1)$$

де  $i$  – номер ділянки електричної мережі;

$P_i$  та  $Q_i$  – активна та реактивна потужності на  $i$ -й ділянці мережі;

$R_i$  та  $X_i$  – активний та реактивний опори  $i$ -тої ділянки мережі;

$U_{\text{ном}}$  – номінальна напруга ділянки мережі.

Параметри ділянки мережі  $R_i$  і  $X_i$  фактично постійні, і втрата напруги залежить від зміни параметрів потужності споживання ( $P_i$  та  $Q_i$ ). Тобто характер зміни споживання електричної потужності впливає на формування електромагнітних завад.

Оцінка відповідності показників якості ЕЕ (табл. 4.1) проводиться протягом розрахункового періоду, що дорівнює 24 год [58].

Таблиця 4.1 – Показники якості електричної енергії

Назва показника	Умовне позначення	Припустимі відхилення	
		нормальні	граничні
Основні показники			
Усталене відхилення напруги, %	$\delta U_V$	±5	±10
Розмах коливання напруги, %	$\delta U_t$	–	±10
Доза флікера, відносні одиниці	$P_t$	1,37	1,0
Коефіцієнт спотворення синусоїдальності кривої напруги	$K_U$	таблиця 4.4	–
Коефіцієнт $n$ -ої гармонійної складової напруги	$K_{U(n)}$	–	–
Коефіцієнт несиметрії напруги за зворотною послідовністю, %	$K_{2U}$	2	4
Коефіцієнт несиметрії напруги за нульовою послідовністю, %	$K_{0U}$	2	4
Відхилення частоти, Гц	$\Delta f$	±0,2	±0,4
Додаткові показники			
Тривалість провалу напруги у мережах до 10 кВ, с	$\Delta t_{\text{П}}$	–	30
Імпульсна напруга	$U_{\text{имп}}$	–	–
Коефіцієнт тимчасової перенапруги	$K_{\text{пер}U}$	–	–

Розглянемо показники якості детальніше.

#### 4.2 Усталене відхилення напруги

Причини змінювання напруги у вузлах системи «Електропостачання споживачів» з боку самої системи:

- добові зміни електричного навантаження споживачів;
- змінювання схеми й параметрів електричних мереж (заплановані та незаплановані);
- регулювання напруги у вузлах мережі (генератори електростанцій, підстанції енергосистеми).

Відхилення напруги визначається як різниця між діючим  $U$  і номінальним значеннями напруги  $U_{\text{ном}}$ :

- абсолютне відхилення, В:

$$\Delta U = U - U_{\text{ном}}; \quad (4.2)$$

- відносне відхилення, %:

$$\delta U = \frac{U - U_{\text{ном}}}{U_{\text{ном}}} 100 \%. \quad (4.3)$$



Згідно з [58] усталене відхилення напруги  $\delta U_y$  (%) визначається протягом інтервалу усереднення (60 секунд) за формулою

$$\delta U_y = \frac{U_y - U_{\text{ном}}}{U_{\text{ном}}} 100 \%, \quad (4.4)$$

де  $U_y$  – значення усередненої напруги, обчисленої як результат  $N$  спостережень, на інтервалі усереднення за формулою

$$U_y = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^N U_i^2}{N}}. \quad (4.5)$$

В електричних мережах однофазного струму діюче значення напруги визначається як значення напруги основної частоти  $U_{(1)}$  без урахування вищих гармонійних складових напруги, а в мережах трифазного струму – як діюче значення напруги прямої послідовності основної частоти  $U_{1(1)}$ .

Стандартом [58] нормуються відхилення напруги на введеннях приймачів електричної енергії. Нормально припустимі  $\pm 5\%$  і гранично припустимі  $\pm 10\%$  значення усталеного відхилення напруги від номінального значення напруги в точках загального приєднання споживачів електричної енергії мають бути встановлені в договорах енергопостачання для годин мінімуму й максимуму навантажень в енергосистемі з урахуванням необхідності виконання норм стандарту на введеннях приймачів електричної енергії відповідно до нормативних документів.

Допустимі відхилення напруги на затискачах силових електроприймачів будинків цивільного призначення встановлені ДБН В.2.5-23:2010 [21], наведені в таблиці 4.2.

Таблиця 4.2 – Допустимі відхилення напруги на затискачах силових електроприймачів будинків

Тип електроприймача та режим роботи	Відхилення від номінальної напруги, %	
	зниження	підвищення
Електродвигуни:		
а) тривала робота в сталому режимі	5	5
б) тривала робота в сталому режимі – для окремих особливо віддалених електродвигунів:		
1) за номінальних умов	8–10	–
2) за аварійних умов	10–20	–
в) короткочасна робота в сталому режимі	20–30	–
г) на затискачах електродвигуна під час його пуску		
1) за частих пусків	10	–
2) за нечастих пусків	15*	–
Електроплити:		
тривала робота – нормальна розрахункова величина	5	5
Зварювальні апарати	8–10	–
* Більше відхилення може бути допущене тільки після перевірки розрахунком можливості пуску електродвигунів.		

У системі електропостачання основними причинами відхилень напруги від номінальних значень є:

- порушення балансів добового графіка активної й реактивної потужності у вузлах системи;
- недосконалість засобів місцевого регулювання напруги;
- наявність однофазних навантажень і їх розподіл за фазами системи електропостачання і т. ін.

**Уплив відхилення напруги на роботу електроспоживачів.** Характер впливу усталеного відхилення напруги залежить від фізики процесів перетворення ЕЕ в електроприймачі.

**Електродвигуни.** В даний час найбільш розповсюдженими приймачами ЕЕ в промисловості є АД, які використовуються для приводу різноманітних механізмів. Підвищення напруги живлення ЕД призводить до збільшення обертового моменту, зменшення ковзання, зростання втрат у сталі двигунів, зменшення коефіцієнта потужності. Індукція в сталі АД може переходити на нелінійну частину кривої намагнічування й призвести до генерації вищих гармонік напруги. Зниження напруги – до зменшення обертового моменту, збільшення ковзання, зростання струму статора, зменшення терміну служби ізоляції.

Частота обертання асинхронних двигунів змінюється залежно від підведеної напруги. У деяких випадках під час використання асинхронних двигунів в установках потокових ліній, автоматизованих верстатах тощо зміни напруги навіть у припустимих межах (-5...+10) % можуть істотно впливати на продуктивність технологічного устаткування.

Зведені дані щодо впливу відхилень напруги на параметри асинхронних двигунів наведені в таблиці 4.3.

Таблиця 4.3 – Вплив відхилень напруги на параметри АД

Параметр електродвигуна	Зміна напруги	
	-10 %	+10 %
Пусковий і максимальний обертовий моменти	-19 %	+21 %
Синхронна частота обертання	постійна	постійна
Ковзання	+23 %	-17 %
Частота обертання при номінальному навантаженні	-1,5 %	+1 %
ККД при навантаженні:		
– номінальному	-2 %	+1 %
– 75 %		
– 50 %	-1 %– -2 %	+1 %–+2 %
Коефіцієнт потужності при навантаженні:		
– 100 %	+1 %	-3 %
– 75 %	+2–+3 %	-4 %
– 50 %	+4–+5 %	-5 %–-6 %
Струм ротора при номінальному навантаженні	+14 %	-11 %
Струм статора при номінальному навантаженні	+10 %	-7 %
Пусковий струм	-10–-12 %	+10–+12 %
Приріст температури обмотки при номінальному навантаженні	+5 +6 %	фактично без змін

Відхилення напруги від номінальної призводить до значної зміни реактивної потужності двигуна. У середньому підвищення напруги на 1 % призводить до збільшення споживання реактивної потужності на 5 %. У разі зниження напруги на шинах завантажених асинхронних двигунів зменшується термін їхнього використання.

**Електротермічні установки.** На протікання електротермічних процесів значно впливає відхилення напруги. Зменшення напруги на введеннях неавтоматизованих електричних печей призводить до зменшення їхньої потужності й до збільшення терміну нагрівання в електротермічних установках, а при значних відхиленнях напруги процес взагалі не може завершитися.

Вплив відхилення напруги на роботу дугових печей залежить від вибору параметра регулювання. Якщо підтримувати постійними опір дуги та її довжину потужність печі зменшується пропорційно до квадрату напруги; якщо підтримувати постійним струмом дуги – пропорційно до першого ступеня напруги; якщо підтримувати постійною потужністю печі відбувається збільшення втрат потужності в квадратичній залежності стосовно зниження напруги.

Відхилення напруги можуть погіршувати технологічний і енергетичний режими печей опору й індукційних печей. У разі зниження напруги на 8–10 % виникає небезпека повного порушення технологічного процесу.

**Електричне зварювання.** Зниження напруги погіршує якість зварених швів. Час зварювання при зниженні напруги на 10 % збільшується приблизно на 20 %. Підвищення напруги призводить до збільшення реактивної потужності зварювального агрегату.

**Електроосвітлювальне устаткування.** Відхилення напруги істотно впливає на роботу освітлювального устаткування. Від підведеної напруги залежать світловий потік, освітленість, термін служби, споживана потужність і ККД освітлювальних приймачів електричної енергії. Наприклад, для ламп розжарювання підвищення напруги тільки на 1 % понад номінальну спричиняє збільшення споживаної потужності приблизно на 1,5 %, світлового потоку – на 3,7 %, скорочення терміну служби ламп розжарювання – на 14 %. Збільшення напруги на 3 % зменшує термін служби ламп розжарювання на 30 %, а підвищення напруги на 5 % призводить до скорочення терміну служби ламп у 2 рази. Термін служби люмінесцентних ламп при підвищенні напруги на 10 % скорочується на 20–30 %. Зниження напруги нижче за номінальну збільшує термін служби ламп накаливання, зменшує споживану лампою потужність. Однак у лампі зменшуються струм і світловий потік, що негативно впливає на освітленість. У разі зниження напруги на 20 % у газорозрядних лампах, зокрема в люмінесцентних, запалювання стає неможливим.

**Вентильний електропривод** досить чутливий до відхилень і коливань напруги в живильній мережі. Зміна напруги змінного струму спричиняє зміну випрямленої напруги, що призводить до зміни частоти обертання двигунів. Для стабілізації напруги передбачається установлення додаткових регулюючих пристроїв.

### 4.3 Коливання напруги

Основною причиною коливання напруги є різке змінювання навантаження на ділянках електричної мережі, наприклад, увімкнення асинхронного двигуна з великою кратністю пускового струму, робота технологічного обладнання зі швидкозмінним режимом, який супроводжується поштовхами активної й реактивної потужностей (привід реверсивних прокатних станів, дугові сталеплавильні печі, зварювальні апарати та ін.).

Коливання напруги характеризуються двома показниками: *розмахом зміни напруги*  $\delta U_t$  і *дозою флікера*  $P_t$ .

*Розмах зміни* напруги  $\delta U_t$  обчислюють за формулою:

$$\delta U_t = \frac{(U_i - U_{i+1})}{U_{\text{ном}}} 100, \% \quad (4.6)$$

де  $U_i, U_{i+1}$  – значення двох сусідніх екстремумів (або екстремуму й горизонтальної ділянки) огибаючої середньоквадратичних значень напруги (рис. 4.1).

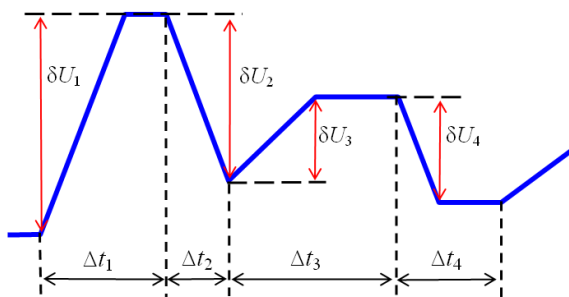


Рисунок 4.1 – Коливання напруги

Частота повторення змін напруги  $F_{\delta U_t}$  (1/с, 1/хв) визначається за співвідношенням:

$$F_{\delta U_t} = \frac{m}{T}, \quad (4.7)$$

де  $m$  – кількість змін напруги за час  $T$ ;  
 $T$  – інтервал часу виміру, прийнятий рівним 10 хв.

Якщо дві зміни напруги відбуваються з інтервалом менше 30 мс, то їх розглядають як одну зміну.

Інтервал часу між змінами напруги дорівнює:

$$\Delta t_{i,i+1} = t_{i+1} - t_i \quad (4.8)$$

Припустимість розмахів зміни напруги (коливань напруги) оцінюється за допомогою кривої залежності припустимих розмахів коливань від частоти повторень змін напруги або інтервалу часу між наступними змінами напруги.

Гранично припустиме значення суми сталого відхилення напруги  $\delta U_y$  і розмаху змін напруги  $\delta U_t$  у точках приєднання до електричних мереж напругою 0,38 кВ дорівнює  $\pm 10\%$  від номінальної напруги.

*Доза флікера* (від англ. flicker – мерехтіння) – це *міра сприйняття людиною коливань світлового потоку штучних джерел світла, спричинених коливаннями напруги електричної мережі за встановлений час*.

Стандартом встановлені *короткочасна* ( $P_{st}$ ) *й тривала* ( $P_{Lt}$ ) *دوزи флікера* (короткочасну визначають на інтервалі часу спостереження, що дорівнює 10 хв, тривалу – на інтервалі 2 год). Вихідними даними для розрахунку є

рівні флікера, вимірювані за допомогою флікерметра – приладу, у якому моделюється крива чутливості (амплітудно-частотна характеристика) органа зору людини.

Коливання ЕЕ за дозою флікера відповідають вимогам стандарту, якщо короткочасна й тривала дози флікера, визначені шляхом вимірювання протягом 24 год або розрахунку, не перевищують гранично припустимих значень: для короткочасної дози флікера – 1,38 і для тривалої – 1,0 (у разі коливання напруги за формою, що відрізняється від меандру).

Гранично припустиме значення для короткочасної дози флікера в точках загального приєднання споживачів електроенергії, що містять лампи розжарювання в приміщеннях, де потрібно значно зореве напружувати зір, дорівнює 1,0, а для тривалої дози флікера – 0,74, (у разі коливань напруги за формою, що відрізняється від меандру).

**4.3.1 Уплив коливань напруги на роботу споживачів.** Дії ударного навантаження спричиняють швидкі зміни напруги у вузлах мережі. Коливання напруги призводять до мерехтіння освітлювальних ламп (флікера), перешкод у роботі телебачення, хибної роботи регулюючих пристроїв, порушень у роботі рентгенівського обладнання, коливанням моменту на валах двигунів, що спричиняє підвищення втрат електроенергії та зношування матеріалів.

Мерехтіння освітлювальних ламп знижує продуктивність праці, погіршує самопочуття персоналу. Основні вимоги до припустимих коливань напруги зумовлюються розумінням захисту зору.

**4.3.2 Заходи щодо зниження коливань напруги.** Для зниження коливань напруги використовують такі засоби:

- пристрої повздожньої компенсації;
- синхронні генератори з автоматичним регулюванням збудження;
- роздільне живлення статичних й різко змінних навантажень.

#### **4.4 Несинусоїдальність напруги**

У процесі генерації, передачі, розподілу й споживання ЕЕ мають місце спотворення форми синусоїдальних струмів і напруг. Джерела спотворень можна поділити на дві групи: перша – джерела в системі виробництва, передачі і розподілу ЕЕ; друга – джерела в системі споживання ЕЕ.

Джерелами спотворень ЕЕ в першій групі є генератори електростанцій, силові трансформатори, що працюють з підвищеними значеннями магнітної індукції в осередді (на нелінійних ділянках кривої намагнічування). Їхній вплив на синусоїдальність форм струмів і напруг є незначним і завдання нейтралізації спотворення синусоїдальності (якщо в цьому є потреба) вирішується в межах цих систем.

Електроприймачі системи споживання ЕЕ є основним фактором порушення синусоїдальності змінного струму. Це такі електроприймачі, як електродугові й руднотермічні печі, індукційні печі, вентильні перетворювачі змінного струму в постійний, обладнання електродугового й контактного зварювання. Ці електроприймачі характеризуються великою потужністю споживання ЕЕ при нелінійності їхньої вольт-амперної характеристики. Електронні приймачі ЕЕ та газорозрядні лампи створюють невисокий рівень гармонійних складових, але їхня кількість велика і за певних обставин вплив може бути суттєвим.

Стандартом визначено два показника несинусоїдальності напруги: коефіцієнт спотворення синусоїдальності кривої напруги ( $K_u$ ) і коефіцієнт  $n$ -ої гармонійної складової напруги  $K_{U_{(n)}}$ .

**Коефіцієнт спотворення синусоїдальності кривої напруги ( $K_u$ , %)** визначається за виразом:

$$K_u = \frac{\sqrt{\sum_{n=2}^N U_{(n)}^2}}{U_{(1)}} 100, \quad (4.9)$$

де  $U_{(n)}$  – діюче значення  $n$ -ої гармонічної складової напруги, В;

$n$  – порядок гармонічної складової напруги;

$N$  – порядок останньої гармонічної складової, що береться до уваги, стандартом встановлено  $N = 40$ ;

$U_{(1)}$  – діюче значення напруги основної частоти, В.

Дозволяється  $K_u$  визначати за виразом

$$K_u = \frac{\sqrt{\sum_{n=2}^N U_{(n)}^2}}{U_{\text{ном}}} 100, \%, \quad (4.10)$$

де  $U_{\text{ном}}$  – номінальна напруга мережі, В.

**Коефіцієнт  $n$ -ої гармонійної складової напруги ( $K_{U_{(n)}}$ , %)** розраховують так

$$K_{U_{(n)}} = \frac{U_{(n)}}{U_{(1)}} 100. \quad (4.11)$$

Дозволяється  $K_{U_{(n)}}$  визначати за виразом

$$K_{U_{(n)}} = \frac{U_{(n)}}{U_{(\text{ном})}} 100. \quad (4.12)$$

Для обчислення необхідно визначити рівень напруги окремих гармонік, що генеруються нелінійним навантаженням.

Нормально й гранично припустимі значення в точці загального приєднання до електричних мереж із різною номінальною напругою наведені в таблиці 4.4 [58].

Таблиця 4.4 – Коефіцієнт спотворення синусоїдальності кривої напруги, %

Нормально припустимі значення при $U_{\text{НОМ}}$ , кВ				Граничні припустимі значення при $U_{\text{НОМ}}$ , кВ			
0,38	6–20	35	110–330	0,38	6–20	35	110–330
8,0	5,0	4,0	2,0	12,0	8,0	6,0	3,0

Наслідки появи гармонік виявляються у додаткових втратах в елементах розподільної мережі споживача. Ці втрати зазвичай незначні. Винятком є випадок появи резонансу в разі встановлення конденсаторних батарей для підвищення  $\cos\phi$ .

Зменшення несинусоїдальності забезпечується такими заходами:

- зменшенням рівня вищих гармонік від перетворювачів за рахунок збільшення числа фаз і використання спеціальних схем перетворення та керування ними;

- раціональною побудовою схеми мережі (живлення нелінійних навантажень від окремих ліній і трансформаторів, використання фільтрів).

При протіканні струмів вищих гармонік по елементах системи електроспоживання виникають втрати активної потужності й енергії. Найбільші втрати активної потужності мають місце в трансформаторах, двигунах і генераторах, збільшення активного опору обмоток яких зі збільшенням частоти відбувається приблизно пропорційно  $\sqrt{\gamma}$  ( $\gamma$  – номер гармоніки). У деяких випадках ці втрати можуть призвести до неприпустимого перегрівання обмоток електричних машин і завжди призводять до значних втрат електричної енергії.

За наявності гармонік кривої напруги процес старіння ізоляції відбувається набагато інтенсивніше.

Вищі гармоніки струму й напруги впливають на покази електровимірювальних приладів.

Наявність гармонік перешкоджає, а в деяких випадках робить неможливим використання силових кіл для передачі інформації.

Несинусоїдальність форми кривої напруги негативно впливає на роботу вентильних перетворювачів, погіршуючи якість випрямленого струму.

Найвідчутнішим є вплив вищих гармонік на роботу конденсаторних батарей. Батареї досить часто виходять з ладу через їхнє перевантаження струмами вищих гармонік, яке є наслідком резонансного режиму на частоті однієї з гармонік.

## 4.5 Несиметрія напруги

Основною причиною порушення симетрії напруги у трифазній системі електропостачання є такі споживачі ЕЕ, симетричне трифазне виконання яких або неможливе, або недоцільне за техніко-економічними показниками. До таких електроприймачів належать індукційні й дугові електричні печі, тягові навантаження залізниць, виконані на змінному струмі, електрозварювальні агрегати, спеціальні однофазні навантаження, освітлювальні установки.

Несиметричні режими напруг в електричних мережах з'являються також під час аварійних ситуацій – у разі обриву фази або наявності несиметричних коротких замикань.

Несиметрія напруг характеризується наявністю в трифазній електричній мережі напруг зворотної або нульовий послідовностей, значно менших за величиною відповідних складових напруги прямої послідовності.

Несиметрія трифазної системи напруг виникає внаслідок накладення на систему прямої послідовності напруг системи зворотної послідовності, що призводить до змінювання абсолютних значень фазних і міжфазних напруг (рис. 4.2, а).

Крім несиметрії, спричиненої напругою системи зворотної послідовності, може виникати несиметрія внаслідок накладення на систему прямої послідовності напруг системи нульової послідовності. Унаслідок зміщення нейтралі трифазної системи виникає несиметрія фазних напруг при збереженні симетричної системи міжфазних напруг (рис. 4.2, б).

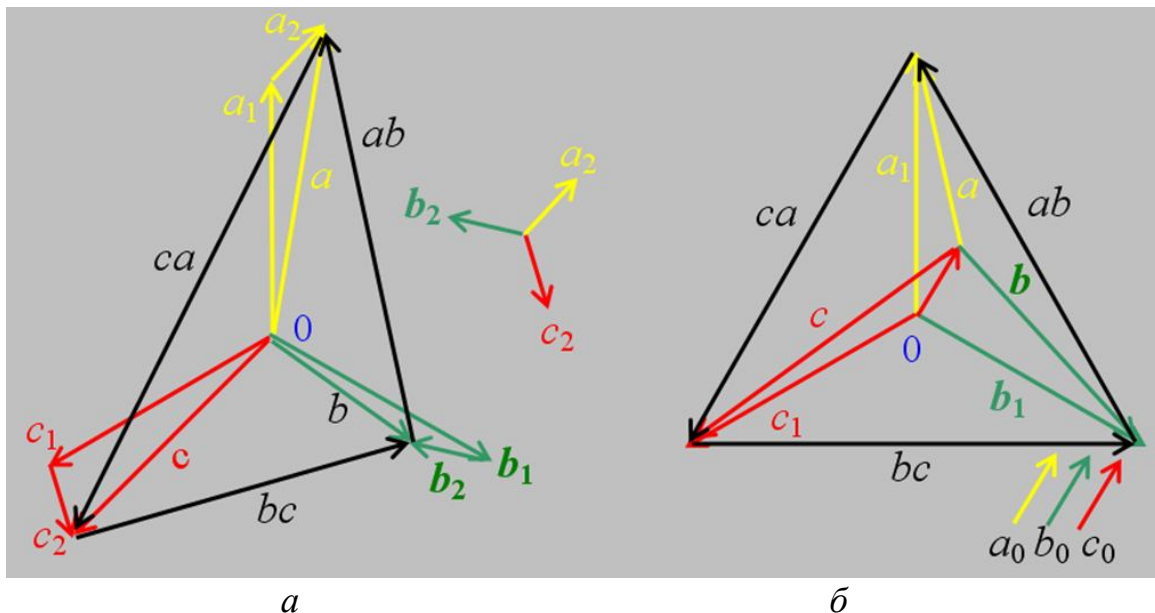


Рисунок 4.2 – Векторні діаграми накладення на систему напруг прямої послідовності:

а – напруг зворотної послідовності;  
б – напруг нульової послідовності



Несиметрія напруг характеризується коефіцієнтом несиметрії напруг за зворотною послідовністю  $K_{2U}$  і коефіцієнтом несиметрії напруг за нульовою послідовністю  $K_{0U}$ .

**Коефіцієнт несиметрії напруг за зворотною послідовністю**

$$K_{2U} = \frac{U_{2(1)}}{U_{1(1)}} \cdot 100, \% \quad (4.13)$$

де  $U_{2(1)}$  – діюче значення напруги зворотної послідовності основної частоти трифазної системи напруг, В;

$U_{1(1)}$  – діюче значення напруги прямої послідовності основної частоти, В.

Дозволяється  $K_{2U}$  обчислювати за виразом

$$K_{2U} = \frac{U_{2(1)}}{U_{\text{ном.л.}}} \cdot 100, \% \quad (4.14)$$

де  $U_{\text{ном.л.}}$  – номінальне значення лінійної (міжфазної) напруги мережі, В.

**Коефіцієнт несиметрії напруг за нульовою послідовністю**

$$K_{0U} = \frac{\sqrt{3}U_{0(1)}}{U_{1(1)}} \cdot 100, \% \quad (4.15)$$

де  $U_{0(1)}$  – діюче значення напруги нульової послідовності основної частоти трифазної системи напруг, В.

Дозволяється  $K_{0U}$  обчислювати за виразом

$$K_{0U} = \frac{U_{0(1)}}{U_{\text{ном.ф.}}} \cdot 100, \% \quad (4.16)$$

де  $U_{\text{ном.ф.}}$  – номінальне значення фазної напруги, В.

Коефіцієнт несиметрії напруг за нульовою послідовністю вимірюють у чотирипровідній мережі.

Нормально припустиме і гранично припустиме значення коефіцієнта несиметрії напруг за зворотною послідовністю в точці загального приєднання до електричних мереж дорівнює 2,0 і 4,0 % .

Нормовані значення коефіцієнта несиметрії напруг за нульовою послідовністю в точці загального приєднання до чотирипровідної електричної мережі з номінальною напругою 0,38 кВ також дорівнює 2,0 і 4,0 %.

**4.5.1 Уплив несиметрії на роботу споживачів.** При несиметричному режимі напруг у трифазних мережах з'являються струми зворотної і нульової послідовності.

Несиметрія негативно позначається на робочих і техніко-економічних характеристиках обертових електричних машин. Струм прямої послідовності в статорі створює магнітне поле, що обертається із синхронною частотою в напрямі обертання ротора. Струми зворотної послідовності в статорі створюють магнітне поле, що обертається щодо ротора з подвійною (100 Гц) синхронною частотою в напрямі, протилежному обертанню. Ці

струми подвійної частоти в електричній машині спричиняють гальмовий електромагнітний момент і додаткове нагрівання, головним чином ротора, що призводить до скорочення терміну служби ізоляції. У разі роботи з номінальним навантаженням та при  $K_{2U} = 4\%$  термін служби ізоляції тільки з причини додаткового нагрівання зменшується приблизно в 2 рази.

Якщо взяти до уваги, що індуктивність зворотної послідовності АД в 5–7 разів менше за індуктивність прямої послідовності, то незначна несиметрія напруги може призвести до значного збільшення несиметрії струму й додаткового нагрівання обмоток.

Робота синхронних генераторів і компенсаторів допускається тільки при розходженні струмів фаз не більше ніж на 10 %. Крім того, струми й напруги зворотної послідовності в синхронних і асинхронних машинах спричиняють вібрацію, зворотне поле створює протидіючий момент, що знижує корисний.

Погіршується робота трифазних вентильних випрямлячів. Через розходження величини фазних напруг значно зростає пульсація випрямленої напруги. Крім того, несиметрія впливає на систему імпульсно-фазового керування тиристорними перетворювачами.

У разі несиметрії напруг нерівномірно завантажуються за фазами конденсаторні батареї, унаслідок чого унеможлиблюється їх повноцінне використання. При цьому батареї збільшують несиметрію навантаження, видаючи більшу реактивну потужність у фазах з вищою напругою, тобто з меншим навантаженням. Освітлення працює в ненормальних умовах, оскільки частина ламп функціонує зі зниженим світловим потоком, а інша частина швидко перегорає, тому що перші ввімкнені на фази зі зниженою, а другі – з підвищеною напругою.

Несиметрія у мережі призводить до зменшення потужності генерації конденсаторних батарей.

Вплив на лінії та трансформатори мережі виявляється у додаткових втратах потужності. Струми  $I_2$  і  $I_0$  спричиняють зростання втрат у повздовжніх елементах схем заміщення. Напруги  $U_2$  і  $U_0$  призводять до зростання втрат у поперечних елементах схем заміщення. Накладання  $U_2$  і  $U_0$  та  $U_1$  спричиняє різкі додаткові відхилення напруги в різних фазах.

Несиметрія може стати причиною помилкової роботи систем автоматики й релейного захисту, телемеханічних пристроїв. Така робота зазначених систем призводить до порушення технологічних процесів.

Сумарний збиток, обумовлений несиметрією в промислових мережах, включає вартість додаткових втрат електроенергії, збільшення відрахувань на реновацію від капітальних витрат, технологічний збиток, збиток, обумовлений зниженням світлового потоку ламп, встановлених у фазах зі зниженою напругою, і зменшенням терміну служби ламп, встановлених у фазах з підвищеною напругою, збиток через зменшення реактивної потужності, що генерується конденсаторними батареями й синхронними двигунами.

**4.5.2 Заходи щодо забезпечення симетрії напруг.** Засобами зменшення впливу несиметрії на роботу електроприймачів є як схеми їхнього живлення, так і симетрувальні пристрої. Найбільший вплив несиметрії на роботу трифазних електроприймачів спостерігається в разі живлення їх від спільних із потужними однофазними електроспоживачами трансформаторів. Цей вплив сильно зменшується в разі живлення однофазних електроприймачів від окремих трансформаторів.

Симетрування системи лінійних напруг трифазної мережі зводиться до компенсації струму зворотної послідовності, споживаного однофазними навантаженнями, і обумовленої ним напруги зворотної послідовності. Якщо при стабільному графіку навантаження шляхом його раціонального розподілу не вдається зменшити несиметрію до припустимого рівня (2 %), то застосовуються симетрувальні пристрої (некеровані або керовані, залежно від характеру змінювання несиметричного навантаження в часі).

Прикладом симетрувального пристрою є схема Штейнметца (рис. 4.3, а). Необхідна потужність конденсаторної батареї  $C_б$  і дроселя  $L$  визначається з умови:

$$Q_C = Q_L = P_0 / \sqrt{3}, \quad (4.17)$$

де  $P_0$  – активна потужність однофазного навантаження.

Векторна діаграма струмів і напруг для схеми Штейнметца наведена на рисунку 4.3, б.

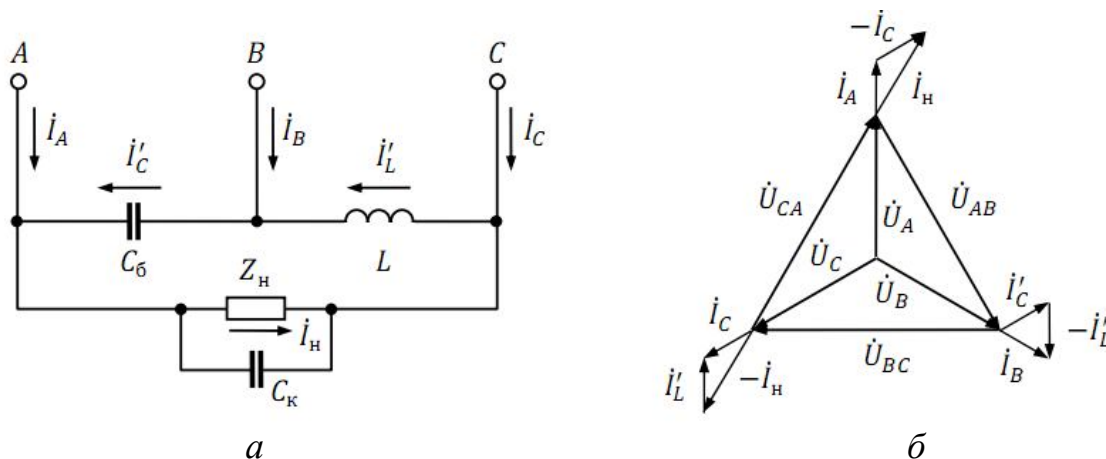


Рисунок 4.3 – Симетрування однофазного навантаження:  
а – схема Штейнметца; б – діаграма струмів і напруг

Вплив реактивної складової потужності навантаження компенсується шляхом вмикання ємності  $C_к$  паралельно до основних елементів схеми. Керований пристрій, побудований за цією схемою використовується шляхом застосування паралельного вмикання секцій конденсаторних батарей, тобто змінюванням ємності, а іноді й кількості витків дроселя, тобто його індуктивності.

## 4.6 Відхилення частоти

**Відхилення частоти** – це різниця між дійсним  $f$  і номінальним  $f_{\text{ном}}$  значеннями частоти, Гц:

$$f = f - f_{\text{ном}}, \quad (4.18)$$

або у відсотках

$$\Delta f = \frac{f - f_{\text{ном}}}{f_{\text{ном}}} \cdot 100. \quad (4.19)$$

Стандартом [58] визначено нормальні й гранично припустимі значення відхилення частоти, що дорівнюють  $\pm 0,2$  і  $\pm 0,4$  Гц відповідно.

**4.6.1 Уплив частоти на роботу електроспоживачів.** У сталому режимі частота визначається балансом активної потужністю на інтервалах добового графіка об'єднаної енергосистеми України. Збільшення споживання активної потужності порівняно з генерацією призводить до зменшення частоти в системі, а зменшення споживання – до збільшення частоти.

Пасивні навантаження електроприймачів нечутливі до зміни частоти (лампи накалювання, нагрівальні елементи).

Електрообладнання з магнітними колами працює головним чином на початку нелінійної частини характеристики  $B = f(H)$ . Незначне зменшення частоти може спричинити насичення і, як наслідок, зростання втрат у сталі та появу вищих гармонік у напрузі.

При змінній частоті зменшується коефіцієнт корисної дії АД оскільки під час їх виготовлення було розраховано, що мінімальна сума втрат потужності буде при номінальному значенні частоти. Змінюються втрати в сталі на струми Фуко та на гістерезис. Змінюються струми ротора і статора АД.

**4.6.2 Заходи щодо забезпечення частоти мережі.** Завдання щодо забезпечення значень частоти в межах припустимих відхилень вирішуються диспетчерською службою об'єднаної енергетичної системи України. Програмою дисципліни «Споживачі електричної енергії» вивчення цих питань не передбачено. Деталі вирішення цього завдання описані у [29, 40].

## 4.7 Провал напруги

**Провал напруги** – раптова значна зміна напруги в точці електричної мережі нижче рівня  $0,9U_{\text{ном}}$ , за яким слідує відновлення напруги до попереднього або близького до нього рівня через проміжок часу від десяти мілісекунд до декількох десятків секунд (рис. 4.4).

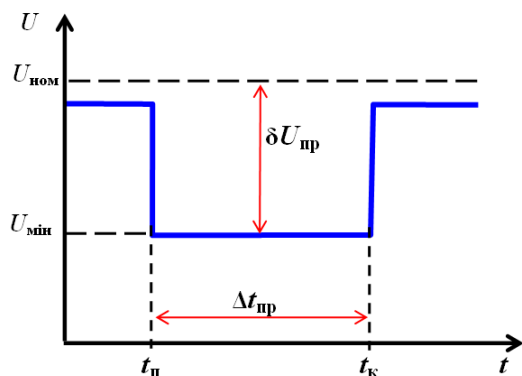


Рисунок 4.4 – Провал напруги

Характеристики провалу напруги.

**Тривалість провалу напруги** – інтервал часу між початковим моментом провалу напруги й моментом відновлення напруги до початкового або близького до нього значення

$$\Delta t_{\text{пр}} = t_{\text{к}} - t_{\text{п}}, \quad (4.20)$$

де  $t_{\text{п}}$  і  $t_{\text{к}}$  – початковий і кінцевий моменти часу провалу напруги.

**Глибина провалу** в абсолютних одиницях (В, кВ)

$$\delta U_{\text{пр}} = U_{\text{ном}} - U_{\text{мін}}, \quad (4.21)$$

або у відсотках

$$\Delta U = \frac{U_{\text{ном}} - U_{\text{мін}}}{U_{\text{ном}}} \cdot 100, \quad (4.22)$$

де  $U_{\text{мін}}$  – мінімальне діюче значення напруги в разі її провалу.

Гранично припустиме значення тривалості провалу напруги в електричних мережах напругою до 20 кВ включно дорівнює 30 с. Тривалість провалу напруги, що усувається автоматично, у будь-якій точці приєднання до електричних мереж визначається уставками часу релейного захисту й автоматики.

#### 4.8 Імпульс напруги й тимчасова перенапруга

Форма кривої напруги живлення спотворюється внаслідок появи високочастотних імпульсів під час комутацій у мережі, роботі розрядників і т.п. **Імпульс напруги** – різка зміна напруги в точці електричної мережі, за якою настає відновлення напруги до початкового або близького до нього рівня за проміжок часу до декількох мілісекунд. Величина спотворення напруги при цьому характеризується показником імпульсної напруги (рис. 4.5).

Імпульсна напруга у відносних одиницях визначається

$$\delta U_{\text{імп}} = \frac{U_{\text{імп}}}{\sqrt{2}U_{\text{ном}}}, \quad (4.23)$$

де  $U_{\text{імп}}$  – значення імпульсної напруги (амплітуда імпульсу), В.

**Амплітудою імпульсу** називається максимальне миттєве значення імпульсу напруги.

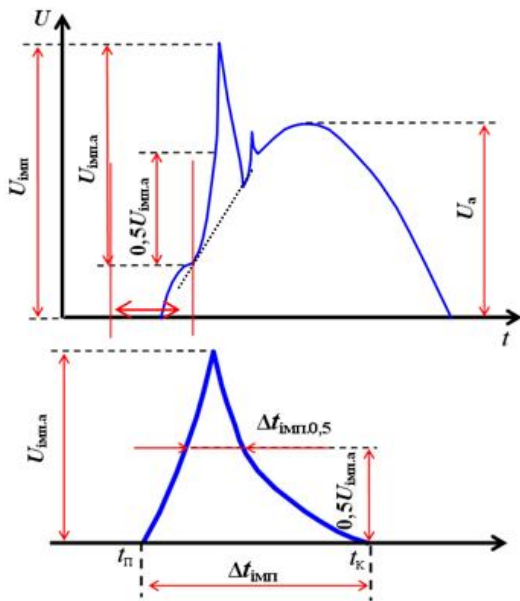


Рисунок 4.5 – Параметри імпульсної напруги

**Тривалість імпульсу** – це інтервал часу між початковим моментом імпульсу напруги й моментом відновлення миттєвого значення напруги до первісного або близького до нього рівня.

Показник імпульсна напруга стандартом не нормується.

У процесі експлуатації електроустаткування відбуваються комутації силових кіл розподільних пристроїв джерел електропостачання. Значення комутаційних імпульсних напруг при їхній тривалості на рівні 0,5 амплітуди імпульсу, що триває 1–5 мс наведені у таблиці 4.4 [58].

Таблиця 4.4 – Значення комутаційних імпульсних напруг

Номінальна напруга, кВ	0,38	3	6	10	20	35	110
Комутаційна імпульсна напруга, кВ	4,5	15,5	27	43	85,5	148	363

**Тимчасова перенапруга** – підвищення напруги в точці електричної мережі вище ніж  $1,1 \cdot U_{ном}$  значення з тривалістю понад 10 мс, що виникає в системах електропостачання під час комутацій або коротких замикань (рис. 4.6).

Тимчасова перенапруга характеризується **коефіцієнтом тимчасової перенапруги** ( $K_{пер.U}$ ), який розраховується як відношення максимального значення огибаючої амплітудних значень напруги  $U_{a.макс}$  за час існування тимчасової перенапруги до амплітуди номінальної напруги мережі:

$$K_{пер.U} = \frac{U_{a.макс}}{\sqrt{2} \cdot U_{ном}}. \quad (4.24)$$

**Тривалість тимчасової перенапруги** – інтервал часу між початковим моментом виникнення тимчасової перенапруги  $t_{п.пер}$  і моментом її зникнення  $t_{к.пер}$ :

$$\Delta t_{пер.U} = t_{к.пер} - t_{п.пер}. \quad (4.25)$$

Значення коефіцієнта тимчасової перенапруги у точках приєднання електричної мережі загального призначення залежно від тривалості тимчасової перенапруги не перевершує величини, зазначені в таблиці 4.5 [58]. У середньому за рік у точці приєднання можливу відбуватися близько 30 тимчасових перенапруг.

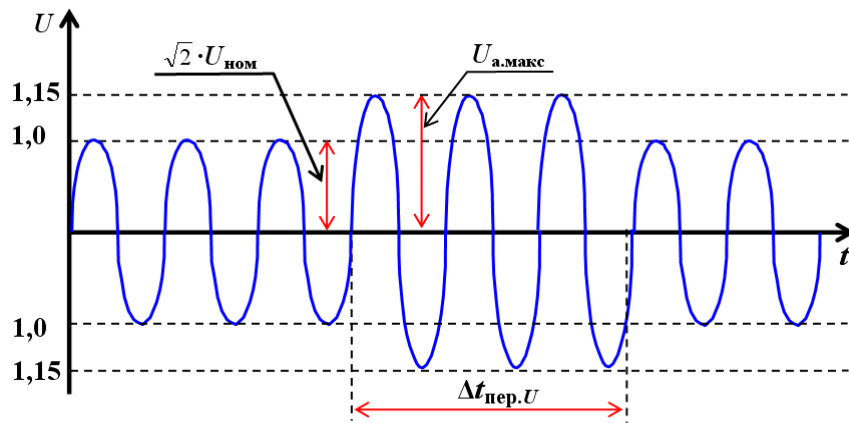


Рисунок 4.6 – Тимчасова перенапруга

Таблиця 4.5 – Значення коефіцієнта тимчасової перенапруги

$\Delta t_{\text{пер.}U}$ , с	До 1	До 20	До 60
$K_{\text{пер.}U}$ , в.о.	1,47	1,31	1,15

У разі обриву нульового провідника в трифазних електричних мережах напругою до 1 кВ, що працюють із глухо заземленою нейтраллю, виникають тимчасові перенапруги між фазою й землею. Рівень таких перенапруг при значній несиметрії фазних навантажень може досягати значень міжфазної напруги, а тривалість – декількох годин.

### Висновки

Дотримання нормативних значень показників якості електричної енергії дозволяє забезпечити функціонування електроприймачів із характеристиками, гарантованими виробниками цього устаткування.

### Питання для самоконтролю

1. Поясніть поняття якості електричної енергії.
2. Що розуміють під усталеним відхиленням напруги? Назвіть припустимі значення усталеного відхилення напруги
3. Які основні фактори впливу відхилення напруги на роботу електроприймачів?
4. Що розуміють під коливаннями напруги? Що їх спричиняє?
5. Як обчислюється розмах зміни напруги?
6. Якими міркуваннями пояснюється введення показника «доза флікера»? Які нормативні значення дози флікера?
7. Якими показниками нормується відповідність напруги синусоїдальній формі?

8. У чому полягають негативні наслідки появи гармонійних складових?
9. Які нормативні вимоги до симетрії фазних напруг?
10. Які заходи забезпечують зменшення несиметрії фазних напруг?
11. Які причини відхилення частоти від номінального значення? У чому проявляється у електроспоживача негативний вплив відхилення частоти?
12. Які причини провалу напруги?
13. Якими показниками характеризується імпульс напруги й тимчасова перенапруга?

### **Список рекомендованих джерел**

Основні джерела: [58, С. 2–8, 20–22, 27–29], [17, 58–98].

Додаткові джерела: [42, С. 77–113], [75], [21].



## **Розділ 5 УПЛИВ СПОЖИВАЧІВ НА РОБОТУ СИСТЕМИ ЕЛЕКТРОПОСТАЧАННЯ**

**Ключові поняття:** коефіцієнт потужності, несиметрія навантаження, зміщення нейтралі, неповнофазна робота, симетрування напруги, пристрій симетрування, характеристика (вольт-амперна, нелінійна)

Інтенсифікація й оптимізація виробничих процесів, підвищення продуктивності праці сучасних промислових підприємств супроводжуються впровадженням нового електротехнологічного устаткування, режим електропостачання якого ускладнений різко змінним характером навантаження, нелінійністю вольт-амперних характеристик, несиметрією навантаження. Робота систем електропостачання погіршується зі збільшенням потужності електроприймачів із специфічними режимами роботи.

Найпотужнішими й широко розповсюдженими в промисловості установками з ускладненим режимом електроспоживання є дугові сталеплавильні електропечі, прокатні стани й електрозварювальне обладнання. У системах електропостачання підприємств із такими електроприймачами виникають відхилення напруги, коливання напруги й частоти, несинусоїдальність форми кривої напруги, несиметрія фазних і лінійних напруг та струмів.

За цих умов різко погіршуються робота й зменшується економічність не тільки приймачів ускладненого режиму електроспоживання, але й порушується режим й економічність роботи системи електропостачання. Приміром при відхиленні напруг від номінальних значень погіршується робота енергетичного устаткування електроенергетичних систем.

Зниження напруги в системі електропостачання спричиняє втрати потужності і, як наслідок, збільшення витрат палива для компенсації цих втрат. Окрім того, падає продуктивність двигунів власних потреб, що може призвести до зменшення вироблення ЕЕ.

Підвищення напруги прискорює старіння ізоляції електрообладнання, що може стати причиною аварійних ситуацій. Також збільшуються втрати в сталі силових трансформаторів, що призводить до підвищення температури сталі. При підвищенні напруги збільшується генерація реактивної потужності повітряними лініями електропередачі і батареями статичних конденсаторів, що може призвести до значного підвищення напруги в мережі й небезпеки пробою ізоляції електроустаткування.

### **5.1 Коефіцієнт потужності $\cos\varphi$**

Більшу частку сучасних споживачів електричної енергії змінного струму становлять індуктивні навантаження, струми яких відстають за фазою від напруг джерела живлення. Активна потужність таких споживачів

$$P = U \cdot I \cdot \cos\varphi \quad (5.1)$$

при заданих значеннях струму й напруги залежить ще й від коефіцієнта потужності  $\cos\varphi$ .

Якщо для споживача задаються його напруга  $U$  й активна потужність  $P$ , то зі зміною  $\cos\varphi$  змінюється і струм споживача. Зі зменшенням  $\cos\varphi$  споживача його струм зростає:

$$I = \frac{P}{U \cos\varphi}. \quad (5.2)$$

Генератори, що живлять споживачів, розраховані на певну **номінальну потужність**  $S_{\text{ном}} = U_{\text{ном}} \cdot I_{\text{ном}}$ . При заданій напрузі  $U_{\text{ном}}$  вони можуть бути навантажені струмом, що не перевищує номінального значення. Тому збільшення струму споживача внаслідок зниження його  $\cos\varphi$  не повинно перевищувати певних меж. Щоб струм генератора не став вище за номінальний при зниженні  $\cos\varphi$  споживача, необхідно знизити його активну потужність. У цьому разі генератор буде повністю навантажений за струмом і недовантажений за активною потужністю.

Для збереження незмінності активної потужності споживача при зниженні  $\cos\varphi$  можна скористатися генератором із більшою номінальною потужністю, щоб збільшення струму внаслідок зниження  $\cos\varphi$  не перевищувало його номінального значення. У цьому разі активна потужність  $P = S_{\text{ном}} \cdot \cos\varphi$ , на яку буде навантажений генератор, становитиме тільки частину номінальної потужності  $S_{\text{ном}}$ . Наприклад, при зниженні  $\cos\varphi$  від 1 до 0,5 навантаження генератора становить тільки 50 % від його номінальної потужності. Таким чином,  **$\cos\varphi$  показує, як використовується номінальна потужність джерела, тому його називають коефіцієнтом потужності.**

Робота споживача з малим коефіцієнтом потужності, крім погіршення умов економічного використання джерела живлення, призводить до збільшення потужності втрат у лінії передачі електричної енергії від джерела до споживача. Якщо опір проводів цієї лінії живлення  $R_{\text{л}}$  (рис. 5.1, а), то потужність втрат у ній

$$\Delta P_{\text{втр}} = R_{\text{л}} \cdot I_{\text{л}}^2 = R_{\text{л}} \cdot \frac{P_{\text{сп}}^2}{U_{\text{сп}}^2 \cos^2\varphi}, \quad (5.3)$$

де  $I_{\text{л}}$  – струм у лінії живлення споживача;

$U_{\text{сп}}$  – напруга на введеннях споживача;

$P_{\text{сп}}$  – активна потужність споживача.

Потужність втрат, як видно з (5.3), тим більша, чим нижче  $\cos\varphi$  електроспоживача. Отже, **чим менше  $\cos\varphi$  електроспоживача, тим дорожча передача до нього електроенергії.**

Щоб збільшити економічність роботи елементів розподілу ЕЕ (зменшити втрати потужності), вживають заходів щодо підвищення коефіцієнта потужності споживачів. Ідея підвищення  $\cos\varphi$  полягає в наступному. Загальний струм індуктивного споживача розглядають таким, що складається з

активної й реактивної складових. Активна потужність споживача визначається активною складовою його струму  $P = U_{\text{сп}} \cdot I_{\text{сп.а}}$ , тому при заданому значенні активної потужності активна складова струму повинна залишатися незмінною. Знизити струм споживача можна тільки шляхом зменшення його індуктивної складової. Цього можна досягти шляхом увімкнення паралельно з електроприймачем конденсаторної батареї (рис. 5.1, а), струм якої має ємнісний характер.

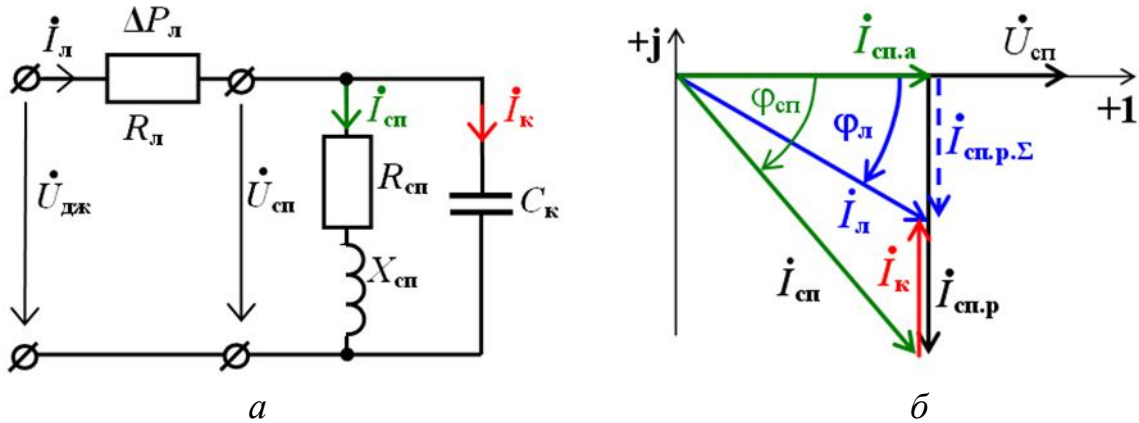


Рисунок 5.1 – Еквівалентна схема споживача й батареї конденсаторів (а) і її векторна діаграма (б)

Розглянемо приклад розрахунку ємності батареї конденсаторів, яку необхідно увімкнути паралельно до індуктивного споживача з  $\cos\varphi$ , щоб довести коефіцієнт потужності електроспоживача до заданого значення  $\cos\varphi$ . Активна потужність і напруга споживача задані.

З діаграми (рис. 5.1, б) видно, що для одержання кута зсуву фаз необхідної величини в ємнісній гілці кола має бути струм  $\dot{I}_к$ , який дорівнює різниці реактивних складових струмів споживача до компенсації кута зсуву фаз  $\dot{I}_{\text{сп.р}}$  і після компенсації кута зсуву фаз  $\dot{I}_{\text{сп.р.}\Sigma}$ :

$$\dot{I}_к = \dot{I}_{\text{сп.р}} - \dot{I}_{\text{сп.р.}\Sigma} . \quad (5.4)$$

З векторної діаграми ці струми можна визначити через активну складову струму споживача  $\dot{I}_{\text{сп.а}}$ :

$$I_{\text{сп.р}} = I_{\text{сп.а}} \operatorname{tg}\varphi_{\text{сп}} \quad \text{і} \quad I_{\text{сп.р.}\Sigma} = I_{\text{сп.а}} \operatorname{tg}\varphi_{\text{л}} , \quad (5.5)$$

де  $\operatorname{tg}\varphi_{\text{сп}}$  і  $\operatorname{tg}\varphi_{\text{л}}$  – коефіцієнти реактивної потужності споживача до і після компенсації відповідно.

Отже вираз (5.5) можна записати у такому вигляді:

$$I_к = I_{\text{сп.а}} \operatorname{tg}\varphi_{\text{сп}} - \operatorname{tg}\varphi_{\text{л}} . \quad (5.6)$$

Струм конденсаторної батареї  $I_k$  в цьому рівнянні можна виразити через напругу і ємність ( $I_k = U_{\text{сп}} \cdot \omega C_k$ ), а активну складову струму споживача  $I_{\text{сп.а}}$  – через потужність і напругу ( $I_{\text{сп.а}} = P_{\text{сп}}/U_{\text{сп}}$ ). Тоді замість (5.6) отримаємо таке рівняння:

$$U_{\text{сп}} \cdot \omega C_k = \frac{P_{\text{сп}}}{U_{\text{сп}}} (\text{tg}\varphi_{\text{сп}} - \text{tg}\varphi_{\text{л}}), \quad (5.7)$$

з якого можна знайти шукане значення ємності конденсаторної батареї:

$$C_k = \frac{P_{\text{сп}}}{\omega U_{\text{сп}}^2} (\text{tg}\varphi_{\text{сп}} - \text{tg}\varphi_{\text{л}}). \quad (5.8)$$

**Коефіцієнт реактивної потужності** споживача після компенсації  $\text{tg}\varphi_{\text{л}}$  фактично є коефіцієнтом реактивної потужності в лінії живлення споживача, втрати в якій зменшуються внаслідок зменшення струму від  $I_{\text{сп}}$  до  $I_{\text{л}}$  (див. рис. 5.1).

Після компенсації бажано отримати коефіцієнт реактивної потужності споживача  $\text{tg}\varphi \leq 0,35$ .

Проблема зменшення споживаної реактивної потужності на практиці вирішується шляхом застосування комплексу організаційно-технічних заходів. До **основних заходів організаційного характеру** відносяться наступні:

- заміна мало завантажених асинхронних двигунів двигунами меншої потужності;
- зниження напруги для двигунів, що систематично працюють з малим навантаженням;
- обмеження неробочого режиму двигунів;
- застосування синхронних двигунів замість асинхронних у випадках, коли це можливо за умовами технологічного процесу;
- заміна мало завантажених трансформаторів.

**Заходи технічного характеру** полягають у застосуванні пристроїв компенсації реактивної потужності, до яких належать статичні конденсатори, синхронні двигуни та синхронні генератори, синхронні компенсатори.

## 5.2 Несиметрія навантаження

За умови, що система електропостачання забезпечує споживачів ЕЕ з нормованими показниками якості, маємо трифазну симетричну систему напруг  $U_A = U_B = U_C$  джерела ЕЕ. При нерівномірному навантаженні за фазами порушається симетрія напруг і струмів в окремих точках електричної мережі. Несиметрію навантаження маємо у випадку нерівності комплексів опорів двох фаз, наприклад  $\underline{Z}_a \neq \underline{Z}_b$ , або нерівності комплексів опорів усіх трьох фаз навантаження  $\underline{Z}_a \neq \underline{Z}_b \neq \underline{Z}_c$ . Характер процесів залежить від схеми з'єднання фаз електроприймача.

### 5.2.1 З'єднання навантаження «зіркою» без нульового проводу.

Режим схеми для випадку з'єднання фаз електроприймачів «зіркою» без нульового проводу розглянемо за допомогою схеми заміщення (рис. 5.2). У разі відсутності нульового проводу опір між нейтраліями джерела живлення й споживача  $Z_{Nn} = \infty$  і нерівності опорів усіх трьох фаз електроприймача  $Z_a \neq Z_b \neq Z_c$  виникає напруга між нейтральною точкою системи електропостачання  $N$  і нейтральною точкою системи електроспоживання  $n$  (див. співвідношення (3.9))

$$\dot{U}_{Nn} = \frac{\dot{E}_A Y_a + \dot{E}_B Y_b + \dot{E}_C Y_c}{Y_a + Y_b + Y_c} \neq 0. \quad (5.9)$$

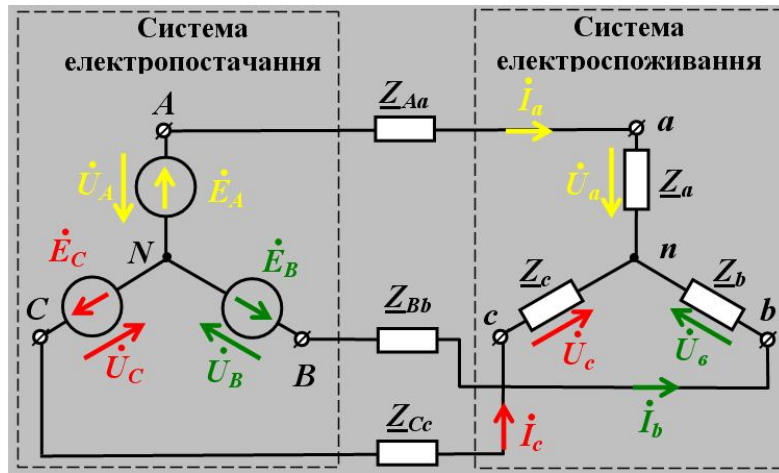


Рисунок 5.2 – Схема заміщення з'єднання «зірка» без нульового проводу

Напруги на фазах електроприймача:

$$\dot{U}_a = \dot{U}_A - \dot{U}_{Nn}; \quad \dot{U}_b = \dot{U}_B - \dot{U}_{Nn}; \quad \dot{U}_c = \dot{U}_C - \dot{U}_{Nn}. \quad (5.10)$$

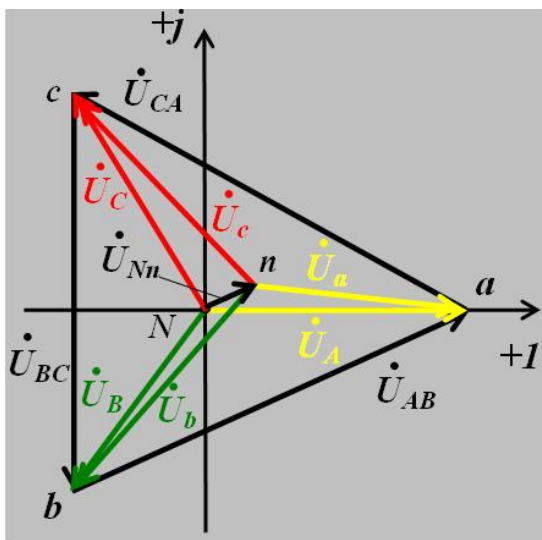


Рисунок 5.3 – Векторна діаграма напруг джерела й приймача схеми «зірка» без нульового проводу

Як наслідок маємо симетричну систему напруг джерела живлення й несиметричну систему напруг електроспоживача (рис. 5.3).

Фазні струми електроприймача:

$$\dot{I}_a = \frac{\dot{U}_a}{Z_a}; \quad \dot{I}_b = \frac{\dot{U}_b}{Z_b}; \quad \dot{I}_c = \frac{\dot{U}_c}{Z_c}. \quad (5.11)$$

Беручи до уваги перший закон Кірхгофа, матимемо

$$\dot{I}_a + \dot{I}_b + \dot{I}_c = 0. \quad (5.12)$$

Потужності фаз електроприймача визначаються за формулами (2.3), загальна потужність трифазного кола – за формулою (2.4).

Таким чином, у разі несиметричного навантаження споживача за схемою «зірка» без нульового провідника маємо несиметрію його фазних напруг.

**5.2.2 З'єднання навантаження «зіркою» з нульовим проводом.** Якщо фази споживача з'єднані за схемою «зірка» з нульовим проводом (див. рис. 3.8), за умови, що опір нульового проводу значно менший за опори фаз споживача ( $Z_{Nn} \ll Z_a, Z_{Nn} \ll Z_b, Z_{Nn} \ll Z_c$ ), можна вважати, що провідність нульового проводу  $Y_{Nn} = \infty$ . Тоді напруга між нейтральми джерела й споживача (див. співвідношення (3.9))  $U_{Nn} = 0$ . На підставі цього можна зробити висновок, що нульовий провідник вирівнює потенціали нейтралей джерела й споживача ЕЕ. Цей факт є однією з причин широкого розповсюдження чотирипровідних схем 220/380 В.

Розрахунок режиму схеми споживача «зірка» з нульовим проводом виконаємо на підставі схеми заміщення (рис. 5.4). Вихідні дані для розрахунку: фазні напруги джерела живлення –  $\dot{U}_A, \dot{U}_B, \dot{U}_C$ ; опори фаз споживача –  $Z_a, Z_b, Z_c$ ; опори провідників (фазних і нульового) –  $Z_{Aa}, Z_{Bb}, Z_{Cc}, Z_{Nn}$ .

Розрахуємо сумарні опори й провідності фаз:

$$\begin{aligned} Z_{a\Sigma} &= Z_a + Z_{Aa}, Y_{a\Sigma} = 1 / Z_{a\Sigma}; \\ Z_{b\Sigma} &= Z_b + Z_{Bb}, Y_{b\Sigma} = 1 / Z_{b\Sigma}; \\ Z_{c\Sigma} &= Z_c + Z_{Cc}, Y_{c\Sigma} = 1 / Z_{c\Sigma}; \\ Y_{Nn} &= 1 / Z_{Nn}. \end{aligned}$$

Напруга зміщення нейтралі (див. формулу 3.9)

$$\dot{U}_{Nn} = \frac{\dot{U}_A Y_{a\Sigma} + \dot{U}_B Y_{b\Sigma} + \dot{U}_C Y_{c\Sigma}}{Y_{a\Sigma} + Y_{b\Sigma} + Y_{c\Sigma} + Y_{Nn}}.$$

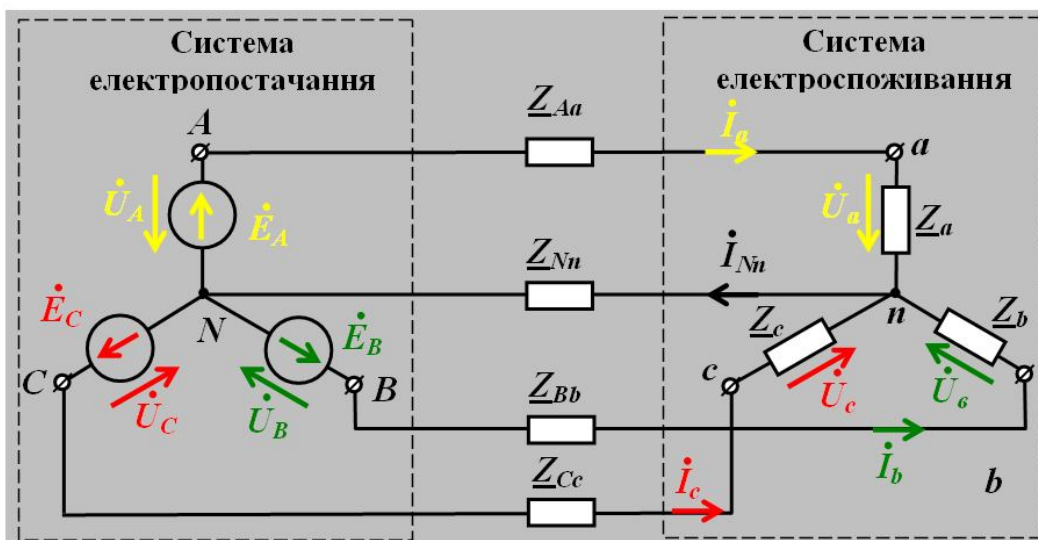


Рисунок 5.4 – Схема заміщення з'єднання «зірка» з нульовим проводом

Напруги на фазах електроспоживача:

$$\dot{U}_a = \dot{U}_A - \dot{U}_{Nn}; \dot{U}_b = \dot{U}_B - \dot{U}_{Nn}; \dot{U}_c = \dot{U}_C - \dot{U}_{Nn}.$$

Струми у фазах споживача і в нульовому провіднику:

$$\dot{I}_a = \frac{\dot{U}_a}{\underline{Z}_a}; \dot{I}_b = \frac{\dot{U}_b}{\underline{Z}_b}; \dot{I}_c = \frac{\dot{U}_c}{\underline{Z}_c}; \dot{I}_{Nn} = \frac{\dot{U}_{Nn}}{\underline{Z}_{Nn}}.$$

Потужності споживача визначаються за формулами (2.3) і (2.4).

Варіант можливої векторної діаграми струмів і напруг подано на рисунку 5.5.

**5.2.3 З'єднання навантаження «трикутником».** Для схеми з'єднання навантаження трикутником (рис. 3.6) відомі лінійні вхідні напруги на фазах приймача  $\dot{U}_{AB}$ ,  $\dot{U}_{BC}$  і  $\dot{U}_{CA}$  та опори фаз  $\underline{Z}_{ab}$ ,  $\underline{Z}_{bc}$  і  $\underline{Z}_{ca}$ .

Струми у фазах споживача визначаємо за законом Ома:

$$\dot{I}_{ab} = \frac{\dot{U}_{AB}}{\underline{Z}_{ab}}; \dot{I}_{bc} = \frac{\dot{U}_{BC}}{\underline{Z}_{bc}}; \dot{I}_{ca} = \frac{\dot{U}_{CA}}{\underline{Z}_{ca}}.$$

Лінійні струми знаходимо за першим законом Кірхгофа для вузлів  $a$ ,  $b$  і  $c$ :

$$\dot{I}_a = \dot{I}_{ab} - \dot{I}_{ca}; \dot{I}_b = \dot{I}_{bc} - \dot{I}_{ab}; \dot{I}_c = \dot{I}_{ca} - \dot{I}_{bc}.$$

Потужності споживача можна обчислити за формулами, аналогічними до (2.3) і (2.4). На рисунку 5.6 подано векторну діаграму струмів і напруг для випадку  $\varphi_{ab} = 0$ ,  $\varphi_{bc} = 0$ ,  $\varphi_{ca} < 0$ .

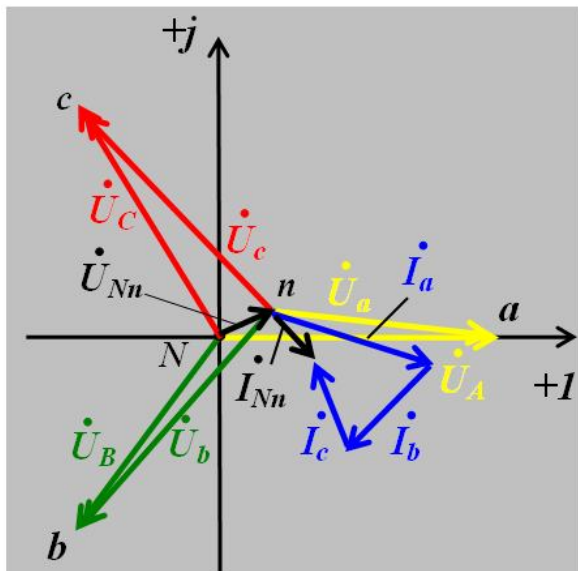


Рисунок 5.5 – Варіант векторної діаграми струмів і напруг для схеми «зірка» з нульовим проводом

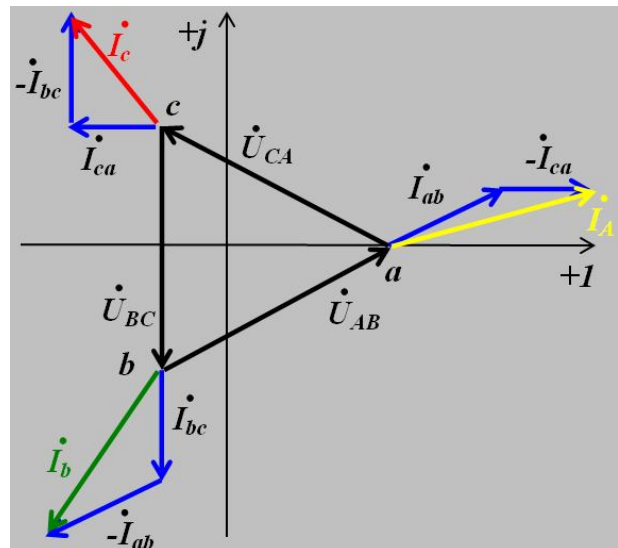


Рисунок 5.6 – Варіант векторної діаграми струмів і напруг для схеми «трикутник»

Завдання зменшення несиметрії напруги у споживача електричної енергії досить складне і потребує комплексного дослідження системи споживання ЕЕ: схеми розподілу, режимів схеми, режимів окремого обладнання тощо. Результатом аналізу й дослідження має бути система заходів щодо **симетрування напруги**. Розглянемо деякі питання, пов'язані з цією проблемою.

**5.2.4 Симетрування напруги у споживача.** Розрізняють два види несиметрії: систематичну й імовірнісну, або випадкову.

**Систематична несиметрія** зумовлена нерівномірним постійним перевантаженням однієї з фаз, **імовірнісна** відповідає непостійним навантаженням, за яких у різний час перевантажуються різні фази залежно від випадкового фактора.

Несиметричні режими в електричних мережах виникають з таких причин:

- не однакове навантаження в різних фазах;
- неповнофазна робота ліній або інших елементів мережі;
- різні параметри ліній у різних фазах.

Здебільшого несиметрія напруг виникає внаслідок нерівності навантаження фаз. Це явище властиве низьковольтним електричним мережам 0,4 кВ.

У міських і сільських мережах 0,4 кВ несиметрія напруг здебільшого спричиняється підключенням однофазних освітлювальних і побутових електроприймачів малої потужності. Таких однофазних електроприймачів багато, і їх потрібно рівномірно розподіляти за фазами, щоб зменшити несиметрію.

У мережах високої напруги несиметрія викликається наявністю потужних однофазних електроприймачів, а деколи і трифазних електроприймачів з неоднаковим споживанням за фазами. До останніх належать дугові сталеплавильні печі. Основними джерелами несиметрії в промислових мережах 0,4–10 кВ є однофазні термічні установки, руднотермічні печі, індукційні плавильні печі, печі опору й різні нагрівальні установки. Крім того, несиметричні електроприймачі – це зварювальні апарати різної потужності. Тягові підстанції електрифікованого на змінному струмі залізничного транспорту – потужне джерело несиметрії, оскільки електровози є однофазними електроприймачами. Потужність деяких однофазних електроприймачів на сьогодні досягає декількох мегават.

**Неповнофазну** роботу елементів системи споживання ЕЕ спричиняє короткочасне відключення однієї або двох фаз при *коротких замиканнях* або більш тривале відключення під час пофазних ремонтів. Одиночну лінію можна обладнати пристроями пофазного керування, що вимикатимуть ушкоджену фазу лінії якщо дія АПВ виявляється неуспішною через стійке коротке замикання.

Тривалі короткі замикання переважно однофазні. При цьому відімкнення пошкодженої фази призводить до збереження двох інших фаз лінії в роботі.

У мережі з заземленою нейтраллю електропостачання по неповнофазній лінії може виявитися припустимим і дозволяє відмовитися від будівництва другого ланцюга лінії. Неповнофазні режими можуть виникати і при відключенні трансформаторів.



**Вплив несиметрії електроспоживача на систему електропостачання.** Поява напруг і струмів зворотної і нульової послідовності  $U_2, U_0, I_2, I_0$  призводить до додаткових втрат потужності й енергії, а також втрат напруги в мережі, що погіршує її режими й техніко-економічні показники роботи. Струми зворотної і нульової послідовностей  $I_2, I_0$  збільшують втрати в поздовжніх гілках мережі, а напруги й струми цих послідовностей – у поперечних гілках.

Накладення  $U_2$  і  $U_0$  призводить до додаткових відхилень напруги в різних фазах. У наслідок чого напруги можуть вийти за припустимі межі. Накладення  $I_2$  і  $I_0$  призводить до збільшення сумарних струмів в окремих фазах елементів мережі. При цьому погіршуються умови їхнього нагрівання й зменшується пропускна здатність.

**Заходи щодо симетрування напруги.** Усі заходи умовно можна розділити на дві групи: заходи без застосування спеціальних пристроїв та заходи із застосуванням спеціальних пристроїв симетрування напруги (далі – ПСН).

*Заходи без застосування спеціальних ПСН:*

– підключення несиметричних навантажень  $S_{\text{оф}}$  на ділянках мережі з можливою більшою потужністю короткого замикання  $S_{\text{к.з}}$ :

$$S_{\text{оф}} < S_{\text{к.з}}/50; \quad (5.13)$$

– підключення несиметричних навантажень значної потужності до окремих трансформаторів;

– забезпечення рівномірного розподілу навантажень за фазами;

– зменшення опору нульової послідовності  $Z_0$  в мережах до 1 кВ шляхом збільшення перерізу нульового проводу, використання трансформаторів із меншими індуктивностями  $X_{\text{то}}$  (залежать від схем з'єднання обмоток, схеми вторинної обмотки «зигзаг», з'єднання обмоток «трикутник-зірка з нульовим проводом»).

Симетрування напруг у мережі зводиться до компенсації струму і напруги зворотної послідовності.

У випадку стабільного графіка навантажень зниження систематичної несиметрії напруг у мережі може бути досягнуто вирівнюванням навантажень фаз шляхом перемикання частини навантажень із перевантаженої фази на ненавантажену.

Раціональний перерозподіл навантажень не завжди дозволяє знизити коефіцієнт несиметрії напруг до допустимого значення (наприклад, коли частина потужних однофазних електроприймачів працює за умовами технології не увесь час, а також за умови профілактичних і капітальних ремонтів). У цих випадках необхідно застосовувати спеціальні симетрувальні пристрої.

*Застосування спеціальних пристроїв симетрування.*

За наявності несиметрії ( $K_{2u} > 2\%$ ), якщо інші заходи вичерпані, приймається рішення про симетрування навантаження додатковими

пристроями. Симетрувальний пристрій вирішує відразу два завдання: симетрування навантажень та компенсації реактивної потужності. Відомо багато схем ПСН, частина з них виконується керованими в залежності від особливостей графіка навантажень.

Для симетрування однофазних приймачів електричної енергії з постійним графіком навантажень і коефіцієнтом потужності, що наближається до одиниці (дугові печі непрямої дії, печі опору), застосовується схема Штейнметца (див. розд. 4.5).

Для симетрування однофазного індуктивного навантаження застосовують схему з дроселем-дільником (рис. 5.7). Симетрувальний пристрій, виконаний за схемою з дроселем-дільником, може бути керованим і некерованим, залежно від конкретних умов.

Симетрування дво- й трифазних несиметричних навантажень із низьким коефіцієнтом потужності можна здійснити за допомогою трифазної несиметричної батареї конденсаторів, увімкненої в «трикутник» (рис. 5.8). У загальному випадку потужності конденсаторів у кожній фазі можуть бути неоднаковими:

$$Q_{AB} \neq Q_{BC} \neq Q_{CA} . \quad (5.14)$$

Трифазні симетричні конденсаторні батареї компенсують тільки реактивну складову струму і не впливають на активну складову.

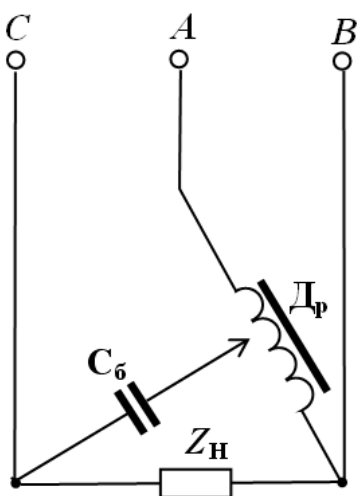


Рисунок 5.7 – Схема симетрування з дроселем-дільником

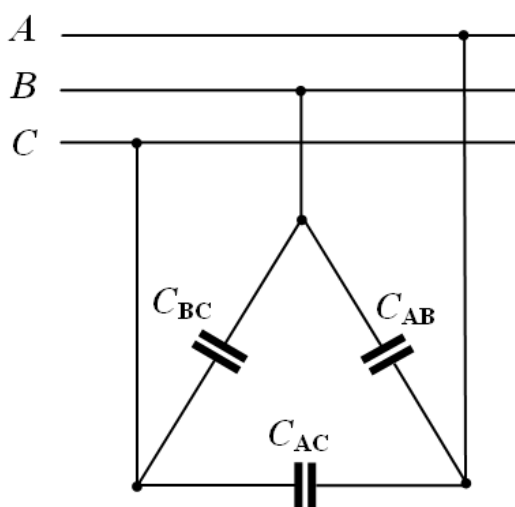


Рисунок 5.8 – Схема симетрування з несиметричною конденсаторною батареєю

Оскільки ПСН містять батареї конденсаторів, доцільно застосовувати такі схеми, у яких одночасно симетрується режим і генерується реактивна потужність  $Q_k$  з метою її компенсації. Пристрої для одночасного симетрування режиму й компенсації  $Q$  перебувають на стадії розробки.

Несиметрію в чотирипровідних міських мережах 0,38 кВ можна знизити, зменшивши струм нульової послідовності  $I_0$  і зниження опір нульової послідовності  $Z_0$  в елементах мережі.

Зменшення струму нульової послідовності  $I_0$  досягають насамперед шляхом перерозподілу навантажень. Навантаження вирівнюють використовуючи мережі, у яких всі або частина трансформаторів працюють паралельно на стороні низької напруги. Зниження опору нульової послідовності  $Z_0$  можна легко здійснити для повітряних ліній 0,38 кВ, що зазвичай споруджуються в районах з малою щільністю навантаження. Доцільність зменшення  $Z_0$  для кабельних ліній, тобто збільшення перетину нульового проводу, необхідно спеціально обґрунтовувати відповідними техніко-економічними розрахунками.

На несиметрію напруг у мережі істотно впливає схема з'єднання обмоток розподільчого трансформатора 6–10/0,4 кВ. Більша частина розподільчих трансформаторів, установлених у мережах, побудовані за схемою «зірка-зірка» з нулем ( $Y/Y_0$ ). Магнітний потік цих трансформаторів, створений струмами нульової послідовності, замикається через трансформаторне масло і бак, долаючи великий магнітний опір. Тому індуктивний опір нульової послідовності цих трансформаторів у 5–10 разів більший ніж для прямої і зворотної послідовностей. До того ж, такі розподільчі трансформатори дешевші.

Щоб знизити несиметрію напруг, спричинену розподільчими трансформаторами, доцільно застосовувати схеми з'єднання «трикутник-зірка» з нулем ( $\Delta/Y_0$ ) або «зірка-зигзаг» ( $Y/Z$ ). Для зниження несиметрії краще застосовувати схеми  $Y/Z$ . У трансформаторах із вторинною обмоткою, з'єднаною в зигзаг,  $X_{T0} \approx 0$ , тому що фазні обмотки, що складаються з двох секцій, розташовані на різних стрижнях магнітопроводу й майже повністю компенсують магнітні потоки нульової послідовності. Однак трансформатори з таким з'єднанням дорожчі, а їхнє виготовлення дуже трудомістке. Зазвичай їх застосовують у разі великої несиметрії, обумовленої несиметрією навантажень і опором нульової послідовності  $Z_0$  ліній.

Під час використання ПСН варто пам'ятати, що його установлення потребує додаткових капіталовкладень й експлуатаційних витрат. Тому економічно виправдано іноді використовувати трансформатори зі схемою з'єднання обмоток «зірка-зигзаг» з нулем без симетрувального пристрою замість трансформатора зі схемою з'єднання обмоток «зірка-зірка з нулем» і додатковим симетрувальним пристроєм. Крім того, замість симетрувальних пристроїв з магнітними зв'язками між елементами можна застосовувати спеціальний трансформатор з пофазним регулюванням. Співвідношення витків трансформаторів обираються такими, щоб несиметрія напруг у живильній мережі ( $U_{AB}$ ,  $U_{CA}$ ,  $U_{BC}$ ) не перевищувала припустимих значень. ПСН трансформаторного типу зазвичай індивідуальні і некеровані.

Докладніше з питаннями щодо контролю і регулювання несиметричних режимів у системах електропостачання можна ознайомитися в [17].

### 5.3 Нелінійність вольт-амперних характеристик

Як відомо, *вольт-амперна характеристика* (далі – ВАХ) – це залежність струму електроприймача від напруги на його затискачах  $I = f(U)$ . Багато елементів на змінному струмі мають нелінійну ВАХ. Навіть ті елементи, характеристики яких в робочому діапазоні змінювання параметрів вважаються лінійними, у разі виходу за ці межі, мають нелінійні ділянки характеристик. На рисунку 5.9 показані нелінійні характеристики деяких елементів електричних кіл. Наглядним прикладом електроприймачів із нелінійними ВАХ є обладнання з феромагнітними складовими (дроселі, трансформатори, електричні машини). В силу нелінійності кривої намагнічування сталі  $B = f(H)$  (рис. 5.9, а) ВАХ таких елементів загалом нелінійні. Залежно від призначення вони працюють на лінійних ділянках кривої намагнічування (силові трансформатори, електричні машини) або в зоні насичення (феромагнітні стабілізатори).

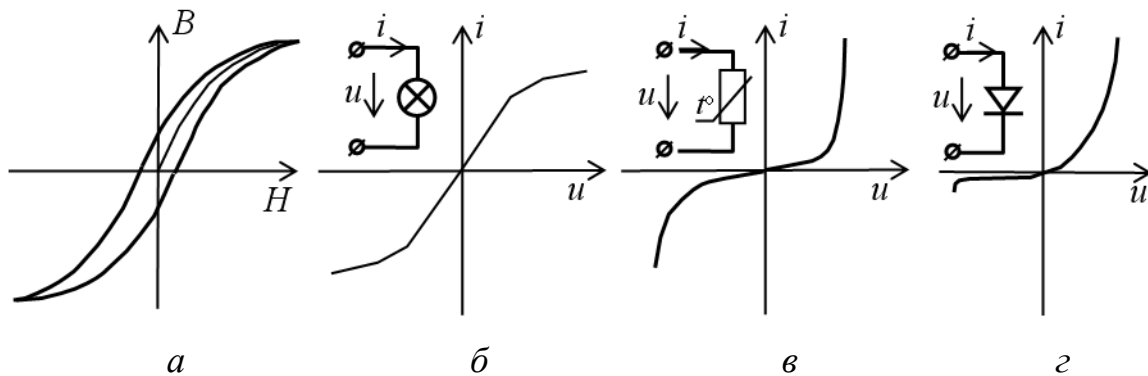


Рисунок 5.9 – Нелінійні характеристики:

а – крива намагнічування сталі; б–г – вольт-амперні характеристики:  
 б – лампи розжарювання; в – терморезистора; г – напівпровідникового діода

Електричний стум при проходженні через елемент з нелінійною ВАХ спотворюється, і його форма перестає бути синусоїдальною. На рисунку 5.10 зображено спотворення синусоїдальності форми струму для випадку прикладання до лампи розжарювання синусоїдальної напруги, амплітудне значення якої виходить за межі лінійної ділянки ВАХ лампи.

Несинусоїдальні криві струмів і напруг становлять складні гармонійні коливання, що складаються із сукупності коливань із різними частоти. Як відомо [39] подібні процеси можна представити тригонометричним рядом Фур'є:

$$U = \sum_{i=1}^n U_i \sin i\omega t + \varphi_i \quad (5.15)$$

де  $U_i$  – гармонічна складова,

$n$  – остання з гармонік, що береться до уваги.

Перша гармоніка ряду (5.6) – це промислова частота 50 Гц, а інші – вищі гармоніки по відношенню до промислової частоти. У трифазній сис-

темі вищі гармоніки можуть бути симетричними й несиметричними. Наприклад, магнітопровід трифазних трансформаторів несиметричний, оскільки довжини магнітних шляхів крайньої і середньої фаз різняться в 1,9 рази. Унаслідок цього діюче значення струму намагнічування крайніх фаз в 1,3 рази більше ніж струм середньої фази. Цим зумовлена несиметрія вищих складових гармонік, що створюють системи прямої і зворотної послідовностей.

У системах електропостачання промислових підприємств досить часто зустрічаються споживачі електричної енергії з нелінійними ВАХ, які стають джерелами вищих гармонік струму й напруги. До них належать вентиляльні перетворювачі, електродугові сталеплавильні печі, устаткування електродугового зварювання, газорозрядні джерела світла, а також силові трансформатори й електродвигуни.

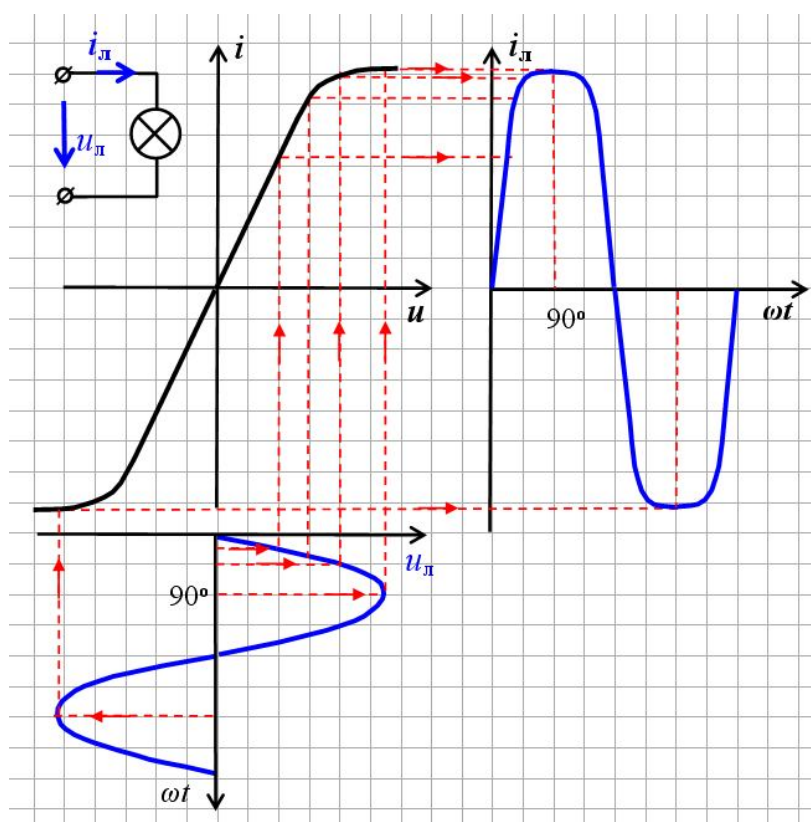


Рисунок 5.10 – Вплив нелінійності ВАХ на форму струму

*Негативний вплив вищих гармонік* на роботу системи електропостачання виявляється в такому:

- додаткові втрати потужності й електроенергії в елементах мережі;
- зменшення коефіцієнта потужності;
- обмеження діапазону застосування компенсаційних конденсаторних батарей унаслідок появи резонансних режимів на частотах вищих гармонік;
- скорочення терміну служби ізоляції електричних машин і апаратів унаслідок як діелектричного, так і додаткового її нагрівання;

– збільшення погрішності лічильників обліку активної і реактивної енергій та погрішності виміру струмів і напруг;

– завади нормальній роботі деяких видів релейного захисту, збої в роботі систем контролю, автоматики й телемеханіки.

*Заходи щодо зниження впливу вищих гармонік на мережу живлення:*

– збільшення потужності короткого замикання на шинах джерела гармонік;

– відокремлене живлення лінійного й нелінійного навантаження;

– збільшення кількості фаз випрямлення вентиляльних перетворювачів;

– застосування силових резонансних *CL*-фільтрів і фільтро-компенсувальних пристроїв.

Силові фільтри і фільтро-компенсувальні пристрої зменшують спотворення кривої струму і напруги й одночасно збільшують коефіцієнт потужності.

## **Висновки**

Коефіцієнт потужності  $\cos\varphi$  показує, як використовується номінальна потужність джерела живлення. Чим менше  $\cos\varphi$  електроспоживача, тим дорожча передача до нього електроенергії (більші втрати потужності при транспортуванні електричної енергії).

Щоб зменшити споживання реактивної потужності, застосовують організаційні й технічні заходи.

У випадку несиметричного навантаження споживача за схемою «зірка» без нульового провідника система напруг джерела симетрична, а система напруг у електроспоживача – несиметрична.

Несиметричне навантаження фаз електроспоживача спричиняє появу напруги зміщення нейтралі, і, як наслідок, струмів нульової та зворотної послідовностей, які погіршують економічність системи електропостачання.

Щоб зменшити негативний вплив несиметрії навантаження, застосовують заходи без та із застосуванням пристроїв симетрування напруги.

Нелінійність вольт-амперних характеристик електроприймачів спричинює появу вищих гармонійних складових електричного струму, які призводять до негативних наслідків у системі електропостачання.

## **Питання для самоконтролю**

1. Поясніть, як пов'язані потужність електроприймача та його вплив на режим роботи системи електропостачання?

2. Наведіть приклади електроприймачів зі специфічними режимами роботи. Поясніть наслідки їхнього впливу на режим роботи системи електропостачання.

3. Як розрахувати величину зменшення втрат в електричній мережі при підвищенні значення коефіцієнта потужності від  $\cos\varphi_1$  до  $\cos\varphi_2$ ?

4. Які організаційні заходи застосовують для зменшення споживання реактивної потужності?

5. Обґрунтуйте неминучість виникнення несиметрії навантаження в чотиріпровідних системах електропостачання.

6. Які негативні наслідки несиметричного навантаження електроприймачів?

7. За якої умови фазна напруга електроприймача буде більшою за фазну напругу джерела живлення?

8. Що спричиняє появу гармонійних складових струмів у системі електроспоживання?

9. У чому полягає негативний вплив вищих гармонік на роботу системи електропостачання?

10. Які заходи застосовують для зменшення впливу вищих гармонік на систему електропостачання?

#### **Список рекомендованих джерел:**

Основні джерела: [17, С. 13–57, 104–126], [28, С. 101–106], [3, С. 263–275].

Додаткові джерела: [71].

# Частина II

## ХАРАКТЕРНІ ГРУПИ

### СПОЖИВАЧІВ ЕЛЕКТРИЧНОЇ ЕНЕРГІЇ

---

---

#### Розділ 6 ЕЛЕКТРИЧНІ МАШИНИ ЯК ПРИЙМАЧІ ЕЛЕКТРИЧНОЇ ЕНЕРГІЇ

**Ключові поняття:** характеристика електричної машини (робоча, м'яка, жорстка, природна, штучна, механічна, швидкісна, моментна), жорсткість характеристики, критичний момент (ковзання), перевантажувальна здатність, режим роботи асинхронної машини (двигуна, гальмування противмиканням, генераторний, динамічне гальмування), пуск (прямий, реостатний, автотрансформаторний, реакторний).

Робота електричних машин базується на електромеханічному перетворенні енергії. Серед електричних машин різного призначення (генератори, двигуни, перетворювачі) споживачами електричної енергії є електричні двигуни. Вони становлять значну частку в загальному споживанні ЕЕ і використовуються як приводи електротехнологічного устаткування різного призначення: металооброблювальні верстати, підйомально-транспортне обладнання, насоси, вентилятори і т. ін.

#### 6.1 Основні відомості про електричні машини

**6.1.1 Класифікація електричних машин.** Електричні машини (далі – ЕМ) працюють в режимах генерації і споживання ЕЕ. Надалі ми розглянемо основні групи ЕМ, які дають наочне уявлення про загальні особливості цієї групи приймачів ЕЕ. Повний розгляд усіх видів ЕМ виходить за межі цього підручника.

За *принципом створення магніторушійної сили* ЕМ поділяють на гістерезисні та магнітоелектричні. Робота останніх базується на принципі магнітоелектричної індукції. Ці машини набули значного поширення як електропривод різноманітного устаткування.

За *родом струму* розрізняють ЕМ постійного, змінного струму та універсальні (працюють на змінному або постійному струмі).

За *ознакою наявності щітково-колекторного вузла* розрізняють колекторні і безколекторні ЕМ.

ЕМ змінного струму за *ознакою швидкості обертового моменту* поділяють на машини асинхронні та синхронні.

Асинхронні двигуни (далі – АД) за *особливостями конструкції ротора* поділяють на двигуни с короткозамкненим ротором та фазним ротором

За *особливостями переміщення рухомої частини* розрізняють машини обертові, лінійні та коливального руху.



За споживаною потужністю розрізняють такі машини:

- малої потужності – 80–1 000 Вт;
- середньої потужності – 1–100 кВт;
- великої потужності – від 100 кВт до декількох десятків МВт.

За швидкістю обертання розрізняють машини:

- малої швидкості – менше 10 об/хв;
- високошвидкісні – 600, 750, 1 000, 1 500, 3 000 об/хв;
- середньої швидкості – проміжні швидкості.

Електричні машини змінного струму за кількістю фаз системи живлення поділяють на однофазні та трифазні ЕМ.

**6.1.2 Параметри й характеристики електричних машин.** Серед параметрів ЕМ насамперед необхідно розглянути *номінальні параметри*. Номінальні – це ті параметри, що характеризують номінальний режим роботи машини, тобто режим роботи за умов, для яких вона призначена. За значеннями номінальних параметрів обирають тип ЕМ, визначають раціональність її використання в певній електротехнічній установці, забезпечують її правильну технічну експлуатацію.

Номінальні параметри машин постійного струму (далі – МПС):

- номінальна потужність  $P_{\text{ном}}$ , кВт;
- номінальна напруга якоря  $U_{\text{ном}}$ , В;
- номінальний струм якоря  $I_{\text{ном}}$ , А;
- номінальна частота обертання  $n_{\text{ном}}$ , об/хв;
- номінальна напруга збудження  $U_{\text{ном.зб}}$ , В;
- номінальний струм збудження  $I_{\text{ном.зб}}$ , А;
- коефіцієнт корисної дії  $\eta$ .

Номінальні параметри машин змінного струму (далі – МЗС):

- потужність на валу (механічна потужність)  $P_{\text{ном}}$ , кВт;
- номінальна напруга  $U_{\text{ном}}$ , В;
- номінальний струм статора –  $I_{\text{ном}}$ , А;
- частота напруги мережі  $f_{\text{ном}}$ , Гц;
- частота (швидкість) обертання ротора  $n_{\text{ном}}$ , об/хв;
- номінальний ККД  $\eta_{\text{ном}}$ ;
- номінальний коефіцієнт активної потужності  $\cos\varphi_{\text{ном}}$ .

Властивості й особливості ЕМ прийнято аналізувати за допомогою графіків – характеристик, які наводять у довідниках технічних даних або каталогах чи знімають експериментально (окремі характеристики можна розрахувати).

Розрізняють робочі й механічні характеристики ЕМ. **Робочі характеристики** – це залежності споживаних потужності  $P_1$ , струму, частоти обертання  $n$ , моменту  $M$ , ККД  $\eta$  від корисної потужності на валу двигуна  $P_2$  за умови наявності номінальної напруги живлення  $U_{\text{ном}} = \text{const}$  (для МПС також за умови номінального струму збудження  $I_{\text{ном.зб}} = \text{const}$ ).

**Механічна характеристика електродвигуна.** Механічну характеристику розглядають як залежність кутової швидкості  $\omega$  (рад/с), або частоти

обертання вала двигуна  $n$  (об/хв), від електромагнітного обертового моменту  $M$  (Н·м):  $\omega = f(M)$ ,  $n = f(M)$ . Ступінь змінювання швидкості обертання вала двигуна зі змінюванням моменту характеризує **жорсткість механічної характеристики**, яка визначається за виразом:

$$\beta = dM / d\omega, \quad (6.1)$$

де  $dM$  – зміна моменту двигуна;

$d\omega$  – відповідна зміна кутової швидкості.

У разі нелінійної механічної характеристики значення  $\beta$  залежить від робочої точки, а для лінійних характеристик залишається постійним і може бути обчислене, як

$$\beta = (M_2 - M_1) / (\omega_2 - \omega_1). \quad (6.2)$$

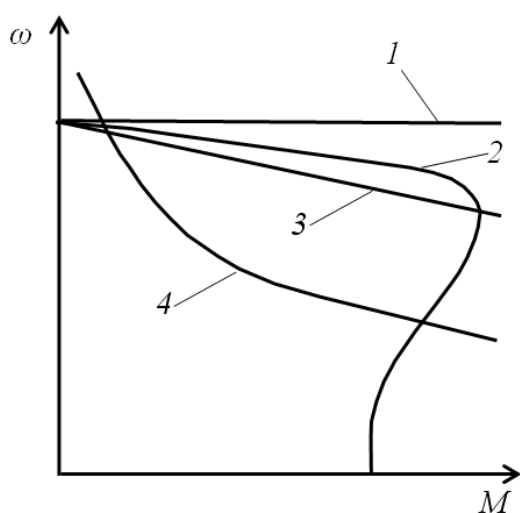


Рисунок 6.1 – Механічні характеристики електричних двигунів

За жорсткість розрізняють такі характеристики:

1. **Абсолютно жорстка механічна характеристика** (пряма 1 на рис. 6.1). Така характеристика властива синхронним електродвигунам. У них швидкість обертання вала не залежить від величини моменту, якщо він не перевищує певного критичного значення.

2. **Жорстка механічна характеристика**. Ця характеристика властива двигунам постійного струму з незалежним і паралельним збудженням (пряма 3).

Асинхронні двигуни в межах робочого діапазону також мають жорстку механічну характеристику (прямолінійна частина кривої 2). У таких електродвигунів швидкість обертання вала зменшується зі збільшенням моменту, але це зменшення не істотне.

3. **М'яка механічна характеристика**. Така характеристика властива двигунам постійного струму з послідовним збудженням (крива 4).

Усі механічні характеристики електродвигунів поділяють на природні й штучні. **Природна механічна характеристика** відповідає умовам роботи двигуна з номінальними значеннями параметрів. Наприклад, для двигуна з паралельним збудженням природну характеристику можна побудувати для випадку, коли напруга на якорі й струм збудження мають номінальні значення, а в ланцюзі якоря відсутній додатковий опір. Природна характеристика асинхронного двигуна відповідає номінальній напрузі й номінальній частоті змінного струму, що підводиться до статора двигуна за умови відсутності додаткового опору в ланцюзі ротора.

**Штучна механічна характеристика** описує роботу двигуна з параметрами, що відрізняються від номінальних.

Таким чином, для кожного двигуна можна побудувати тільки одну природну характеристику, а штучних – необмежену кількість. Наприклад, кожному новому значенню опору якоря двигуна постійного струму або ланцюга ротора АД відповідає певна механічна характеристика.

## 6.2 Режими роботи електричних машин

Робота електричних машин (ЕМ) характеризується різноманітними режимами, які розрізняються за тривалістю робочого циклу, особливістю й величиною навантаження, величиною втрат на різних етапах роботи, способом охолодження тощо. Розрізняють вісім номінальних режимів роботи ЕМ, які згідно з класифікацією ІЕС (МЕК<sup>2</sup>) та ГОСТ 183-74 [6] умовно позначаються *S1* – *S8*. Експлуатація ЕМ при номінальному навантаженні відповідно до режиму, зазначеному виробником у технічному паспорті, гарантує їй безвідмовну й надійну роботу у складі електротехнологічного устаткування. Режими розрізняються за характером і тривалістю навантаження, що супроводжується процесами виділення тепла й нагрівання електричної машини. З огляду на цей фактор виділення тепла й нагрівання ЕМ є базовою характеристикою, за якою розрізняють режими роботи ЕМ. Перші три режими (*S1*, *S2* і *S3*) є базовими, дані для них подають у паспортах ЕМ.

***S1*** – це **тривалий режим роботи**. Характеризується незмінним тривалим навантаженням, при якому температура всіх частин машини досягає усталеного незмінного значення. У тривалому режимі працюють електричні двигуни таких електроспоживачів, як насоси, компресори, вентилятори, конвеєри, транспортери тощо.

***S2*** – **короткочасний режим роботи** з тривалістю періоду незмінного номінального навантаження 10, 30, 60 і 90 хвилин. Протягом увімкненого стану температура всіх частин машини досягає сталого значення, після зупинки машина охолоджується до температури, вищої за температуру навколишнього середовища не більше ніж на 2 °С. У короткочасному режимі працюють підймальні механізми на будівельних майданчиках, ножиці для різання металу тощо.

***S3*** – **повторно-короткочасний режим роботи** з такою послідовністю ідентичних циклів роботи, коли кожен цикл включає час роботи при незмінному навантаженні, протягом якого машина не нагрівається до сталої температури, і час перерви, протягом якої машина не охолоджується до температури навколишнього середовища. Тривалість циклу в цьому режимі становить 10 хвилин. Вона недостатня для впливу пускових струмів на перевищення температури. Нормовані тривалості вмикання ТВ становлять 15, 25, 40 і 60 %.

---

<sup>2</sup> МЕК – Міжнародна електротехнічна комісія. Міжнародна некомерційна організація зі стандартизації у сфері електричних, електронних і суміжних технологій.

У режимах  $S1 - S3$  працюють електричні крани, преси, молоти, ліфти та інші механізми. Графіки змінювання температури електроприймача в режимах  $S1 - S3$  були розглянуті в розділі 3.1.

Номінальні режими  $S4 - S8$  уведені для того, щоб спростити задачу приведення довільного режиму до еквівалентного номінального.

**$S4$  – повторно-короткочасний режим роботи з частими пусками.** Режим характеризується послідовністю ідентичних циклів роботи (рис. 6.2, а), кожний з яких включає час пуску ( $t_{п}$ ), досить тривалий для того, щоб пускові струми впливали на температуру частин машини, час роботи при постійному навантаженні ( $t_{р}$ ), протягом якого машина не нагрівається до сталої температури, і неробочий час ( $t_{пер}$ ), протягом якого машина не охолоджується до температури навколишнього середовища.

Розрахункові тривалості вмикання ТВ у режимі  $S4$  приймають 15, 25, 40 і 60 %. Кількість вмикань – 30, 60, 120 і 240 протягом однієї години.

**$S5$  – повторно-короткочасний режим роботи з частими пусками й електричним гальмуванням.** Включає послідовність ідентичних циклів роботи (рис. 6.2, б), кожний із яких містить досить тривалий час пуску ( $t_{п}$ ), час роботи при постійному навантаженні ( $t_{р}$ ), протягом якого машина не нагрівається до сталої температури, час швидкого електричного гальмування ( $t_{г}$ ) і час перерви ( $t_{пер}$ ), протягом якого машина не охолоджується до температури навколишнього середовища. Розрахункові тривалості вмикання й кількість вмикань протягом однієї години у режимі  $S5$  такі самі, як і в режимі  $S4$ .

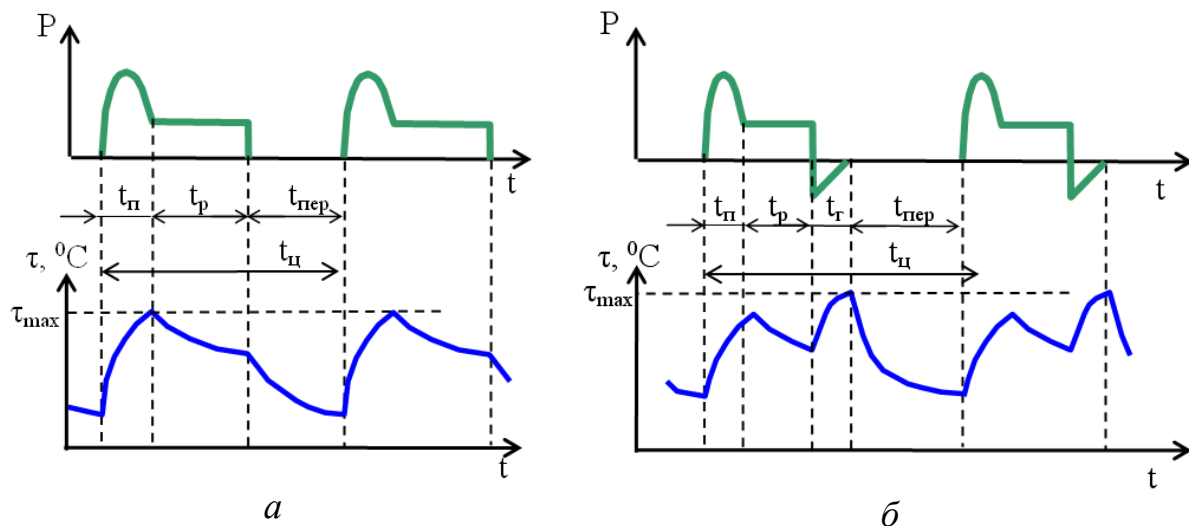


Рисунок 6.2 – Діаграми навантаження і криві охолодження:  
а – режиму  $S4$ ; б – режиму  $S5$

**$S6$  – перемежований режим роботи.** Характеризується послідовністю ідентичних циклів (рис. 6.3, а), кожний із яких включає час роботи з постійним навантаженням ( $t_{р}$ ) і час роботи без навантаження ( $t_{х.х.}$  – холостий хід), то того ж тривалість періодів така, що температура машини не досягає сталою значення.

**S7 – перемежований режим роботи з впливом пускових струмів і електричним гальмуванням.** Характеризується послідовністю ідентичних циклів (рис. 6.3, б), кожний із яких включає тривалий пуск ( $t_p$ ), час роботи з постійним навантаженням ( $t_r$ ) і швидке електричне гальмування ( $t_r$ ). Режим не передбачає перерв.

**S8 – перемежований режим роботи з періодично змінюваною частотою обертання.** Характеризується послідовністю ідентичних циклів, кожний із яких включає час роботи з незмінним навантаженням і незмінною частотою обертання. Далі слідкують один або декілька періодів із іншими постійними навантаженнями, кожному з яких відповідає своя частота обертання (цей режим спостерігається при перемиканні числа пар полюсів асинхронного двигуна). Режим не передбачає перерв.

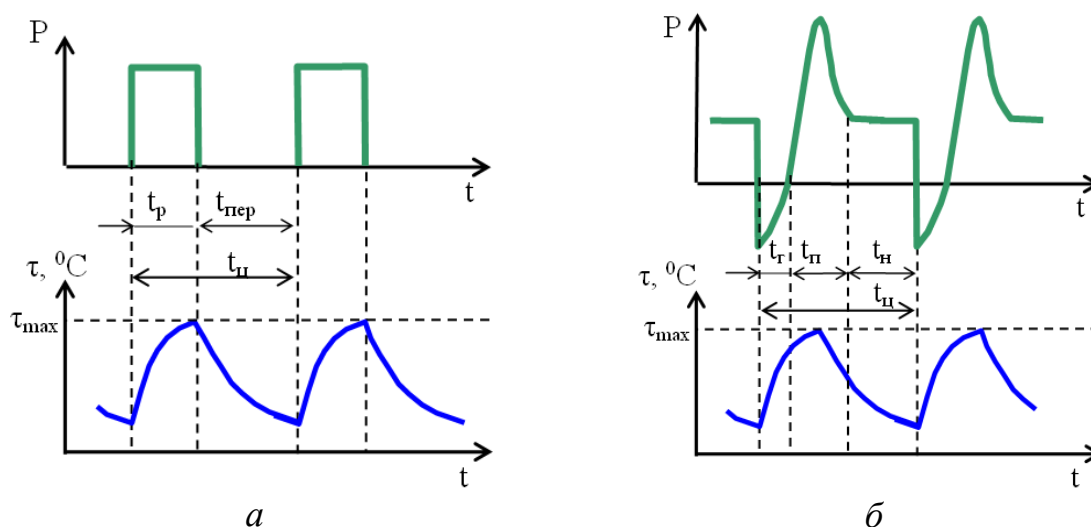


Рисунок 6.3 – Діаграми навантаження і криві охолодження:  
а – режиму S6; б – режиму S7

Режим роботи необхідно брати до уваги під час вибору двигуна для технологічного устаткування. У каталогах зазначають потужності двигунів при нормальних умовах роботи в режимі S1. Якщо двигун працює в режимі S2 або S3, він нагрівається менше, ніж у режимі S1, тому допускає більше навантаження, ніж зазначене в паспорті. Під час роботи в режимі S2 припустиму потужність двигуна можна підвищити на 50 % при тривалості навантаження 10 хвилин, на 25 % – при тривалості навантаження 30 хвилин і на 10 % – при тривалості навантаження 90 хвилин.

### 6.3 Асинхронні електричні машини

Асинхронні електричні машини, внаслідок простоти виготовлення й високої надійності, широко застосовуються в різних галузях господарства й виробництва. З огляду на кількість фаз статора й конструкцію ротора можна виокремити чотири основних типи асинхронних двигунів:

- однофазний із короткозамкненим ротором;
- двофазний двигун із короткозамкненим ротором;
- трифазний двигун із короткозамкненим ротором;
- трифазний двигун із фазним ротором.

**6.3.1 Робочі характеристики.** Під робочими характеристиками АД розуміють залежність низки величин, що визначають ті або інші властивості двигуна, від корисної потужності  $P_2$ , яка розвивається на його валу за умови постійної напруги мережі живлення. До таких величин належать: частота обертання  $n_2$  або ковзання  $s$ , момент на валу  $M$ , коефіцієнт потужності  $\cos\varphi$ , ККД і струм статора  $I_1$ . Будують робочі характеристики для інтервалу стійкої роботи АД ( $0 \leq s \leq (1,1-1,2) s_H$ ).

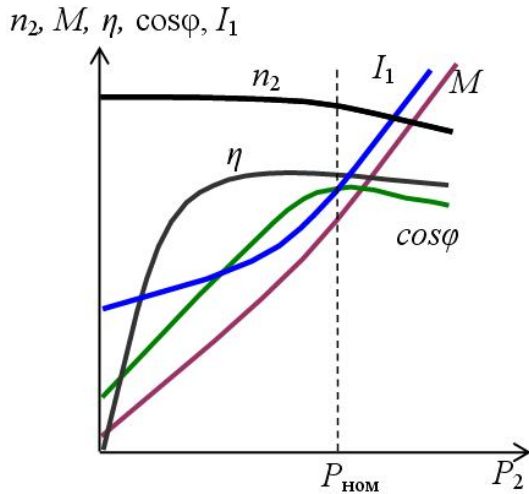


Рисунок 6.4 – Робочі характеристики асинхронного двигуна

навантажень змінюється дуже незначно, залежність  $M = f(P_2)$  виявляється близькою до лінійної. Обертний момент  $M$  на валу двигуна пропорційний потужності  $P_2$ , він менший, ніж електромагнітний момент  $M_{em}$  на значення гальмівного моменту  $M_T$ , створюваного силами тертя.

**Залежність  $\cos\varphi = f(P_2)$ .** Унаслідок наявності в магнітному колі двигуна повітряного зазору струм статора містить порівняно велику реактивну складову, що впливає на коефіцієнт потужності. Для АД середньої і великої потужностей при повному навантаженні  $\cos\varphi = 0,8-0,9$ . При навантаженнях 25–50 % від номінального коефіцієнт потужності зменшується до незадовільних з енергетичного погляду значень (0,5–0,75), а при холостому ході досягає значень 0,15–0,2. Тому недоцільно допускати роботу АД на холостому ході зі значним недовантаженням.

**Залежність  $\eta = f(P_2)$ .** ККД асинхронного двигуна має максимальне значення при номінальному або близькому до нього навантаженні ( $P_2 \approx P_H$ ). При цьому він досить високий. Важливо зазначити, що при навантаженнях  $P_2 = (0,25-1,25) P_H$  зміни ККД незначні. Це означає, що у великому діапазоні навантажень двигун працює економічно з ККД близьким до максимального.

**Залежність  $I_1 = f(P_2)$ .** Струм статора складається зі значної намагнічуючої складової  $I_0$ , що майже не залежить від навантаження, і складової  $I_2$ , що врівноважує навантаження ротора:

$$\dot{I}_1 = \dot{I}_0 + (-\dot{I}_2).$$

Характерні графіки зазначених залежностей для АД нормального виконання зображені на рисунку 6.4.

Залежність  $n_2 = f(P_2)$  або  $s = f(P_2)$  називається **швидкісною характеристикою**. При холостому ході ( $P_2 = 0$ ) частота обертання  $n_2$  близька до синхронної  $n_1$  (ковзання близьке до нуля). Зі збільшенням корисної потужності  $P_2$  частота обертання змінюється мало і  $n_2 = f(P_2)$  становить незначно нахилену до осі абсцис криву.

**Моментна характеристика  $M = f(P_2)$ .** Оскільки швидкість обертання двигуна в робочому діапазоні

Головним чином за рахунок  $I_0$  асинхронний двигун за відсутності навантаження споживає порівняно великий струм холостого ходу  $I_{х.х.}$ . Він може бути більшим ніж на 50 % за номінального. Зі зростанням навантаження струм статора зростає.

Окрім перелічених, до робочих характеристик відносять також перевантажувальну здатність двигуна та його механічну характеристику.

**6.3.2 Механічні характеристики.** Залежність обертового моменту асинхронної машини від ковзання  $M = f(s)$  (механічна характеристика) за умови  $U_1 = \text{const}$ , що має місце в нормальному режимі експлуатації, наведено на рисунку 6.5.

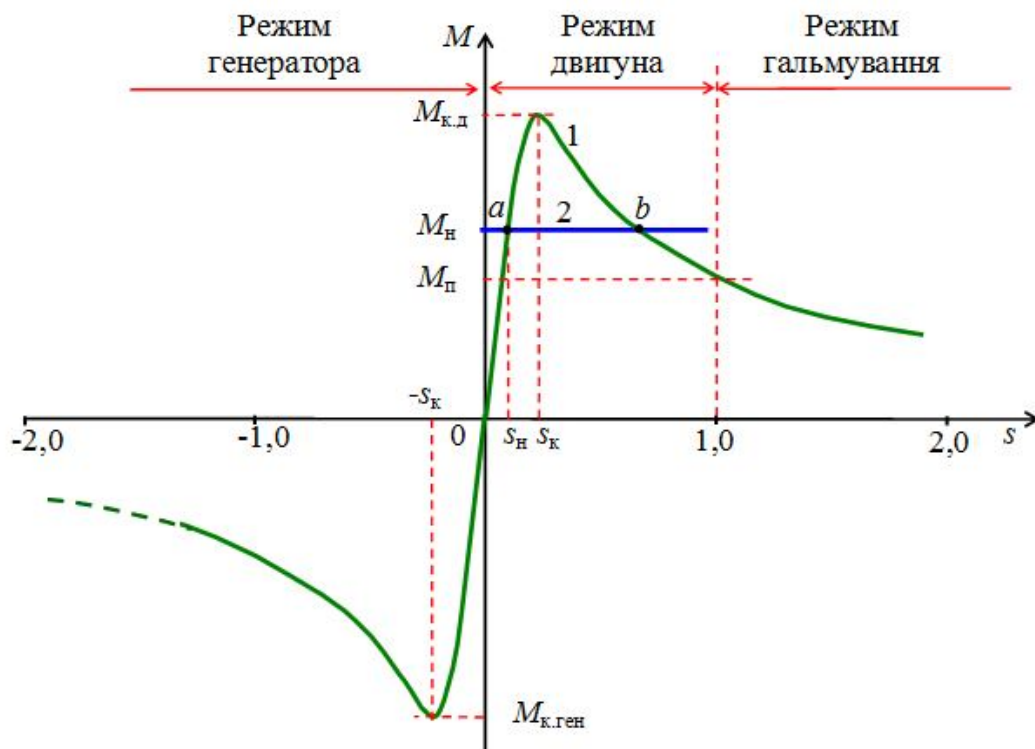


Рисунок 6.5 – Механічна характеристика асинхронної машини

При малих ковзаннях (менших за критичне значення  $s < s_k$ ) момент приблизно пропорційний ковзанню. Зі збільшенням ковзання лінійність характеристики порушується і момент, досягши свого найбільшого значення  $M_k$  при ковзанні  $s = s_k$ , далі зменшується до величини пускового моменту  $M_p$  при  $s = 1$ . **Максимальний обертовий момент  $M_k$  і ковзання  $s_k$  за якого він виникає, називаються критичними.**

Двигун працює зі сталою швидкістю обертання при рівновазі обертового моменту й моменту опору. Характер кривої моменту опору  $M_{оп}$  залежно від ковзання (або швидкості) визначається властивостями робочого механізму. Якщо  $M_{оп} = f(s)$  виглядає як крива 2 (рис. 6.5), то умова рівноваги моментів виконується при двох різних ковзаннях – точка  $a$ , якій відповідає невелике ковзання  $s < s_k$ , і точка  $b$  при ковзанні  $s > s_k$ .

Другою умовою усталеної роботи двигуна є виконання співвідношення

$$\frac{dM}{ds} > \frac{dM_{\text{оп}}}{ds}, \quad (6.3)$$

за умови дотримання якого двигун може відновити рівновагу в разі її можливого порушення.

Як зрозуміло з рисунка 6.5, зазначена нерівність має місце тільки на ділянці  $s < s_K$  (точка  $a$ ), тобто на лівій частині кривої  $M = F(s)$ . Тому асинхронний двигун працює стійко лише якщо ковзання менші за критичні. Права частина кривої  $M = F(s)$ , що належить ділянці ковзань  $s > s_K$ , називається нестійкою. За таких значень ковзання двигун працювати не може. Приміром, під час роботи з ковзанням, що відповідає точці  $b$ , будь-яке випадкове порушення рівноваги моментів у той або інший бік спричиняє розгін двигуна до ковзань  $s < s_K$  (перехід у точку  $a$ ) або його зупинку.

Обертний момент у режимі номінального навантаження, що відповідає допустимому нагріванню двигуна, повинен бути меншим за критичний  $M_K$  з певним запасом. Коли момент опору навантаження досягає величини критичного моменту, двигун переходить на нестійку частину характеристики  $M = F(s)$  і зупиняється. Відбувається «перекидання» двигуна. Що більшим є перевищення критичного моменту щодо номінального, то більші короточасні перевантаження здатний долати двигун. Перевантажувальну здатність двигуна прийнято характеризувати **коефіцієнтом перевантажувальної здатності  $k_M$**  (кратність максимального обертного моменту  $M_K$  щодо номінального моменту  $M_{\text{ном}}$ ):

$$k_M = \frac{M_K}{M_{\text{ном}}}. \quad (6.4)$$

Розглядають також кратність початкового пускового обертального моменту  $M_{\text{п}}$  стосовно номінального моменту  $M_{\text{ном}}$ :

$$k_{\text{п}} = \frac{M_{\text{п}}}{M_{\text{ном}}}. \quad (6.5)$$

У АД загальнопромислового застосування середньої і великої потужностей згідно зі стандартами ці кратності мають такі значення [53]:  $k_M = 1,6-2,2$ ;  $k_{\text{п}} = 1,0-2,0$ .

Під час оцінювання пускових властивостей двигуна важливого значення набуває величина початкового пускового моменту  $M_{\text{п}}$ . Як відомо [35], критичне ковзання  $s_K$  можна описати співвідношенням

$$M_K = C_1 \cdot U_1^2 \frac{1}{2X_{2\text{н}}}, \quad (6.6)$$

де  $C_1$  – постійна величина для цього двигуна;

$U_1$  – напруга на обмотці статора АД;

$X_{2\text{н}}$  – індуктивний опір обмотки нерухомого ротора.



Зі співвідношення (6.6) випливає, що **критичний момент**, а отже, і **перевантажувальна здатність АД, залежать від квадрата напруги**. Це зумовлює високу чутливість цих двигунів до відхилень напруги мережі. Навіть при невеликих зниженнях напруги різко зменшується перевантажувальна здатність, що може спричинити зупинку («перекидання») двигуна.

Критичне ковзання  $s_k$  АД залежить від активного опору ротора  $R_2$  [28]

$$s_k = \frac{R_2}{X_{2H}}. \quad (6.7)$$

Із (6.7) зрозуміло, що у АД з контактними кільцями внаслідок уведення до кола ротора додаткового активного опору можна отримати ряд кривих  $M = f(s)$ . Залежність  $M = f(s)$  визначає також зв'язок між швидкістю обертання й моментом.

Графік  $M = f(s)$  становить видозмінену, тобто побудовану в інших координатах, **механічну характеристику**. У звичайних координатах механічна характеристика  $n = f(M)$  виглядає так, як це показано на рисунку 6.6, де крива 1 – для двигуна короткозамкненого й двигуна з контактними кільцями без додаткового опору в колі ротора; крива 2 – для двигуна з контактними кільцями при введеному до кола ротора додатковому активному опорі.

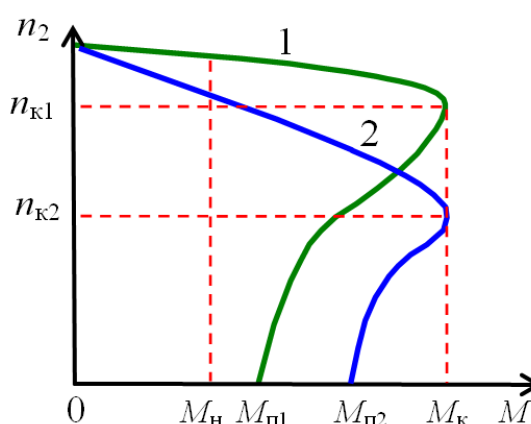


Рисунок 6.6 – Механічні характеристики АД

Окрім **режиму двигуна** ( $0 < s < s_k$ ), асинхронна машина може працювати в таких режимах: гальмування противмиканням ( $1 < s < 2$ ); гальмування з віддачею енергії до мережі живлення (генераторний режим  $-2 < s < 0$ ); режимі динамічного гальмування.

**6.3.3 Гальмові режими асинхронних машин.** Механічні характеристики АД в координатах  $M$  і  $\omega$  подано на рисунку 6.7. У квадранті I розташовані ділянки характеристик режиму двигуна для трьох різних опорів роторного кола. Відповідно до наближення швидкості двигуна до швидкості ідеального холостого ходу, або синхронної швидкості, момент двигуна наближається до нуля. У разі подальшого збільшення кутової швидкості під впливом зовнішнього моменту, коли  $\omega = \omega_0$ , двигун переходить у режим генератора і працює паралельно з мережею, якій він віддає електричну енергію, споживаючи при цьому реактивну потужність для збудження.

Режиму **гальмування АД з віддачею енергії до мережі** відповідають ділянки характеристик, розташовані у верхній частині квадранта II. У цьому режимі значення максимального моменту перевищує максимальний момент режиму двигуна. Цей режим застосовують для двигунів із перемиканням полюсів, а також для приводів вантажопідйомних машин тощо.

**Гальмування противмиканням** застосовують частіше. Цей режим отримують при рушійному моменті навантаження  $M_{оп} > M_{п}$ . Щоб обмежити струм і одержати відповідний момент, необхідно при використанні двигуна з фазним ротором у його роторне коло ввімкнути додатковий резистор. Сталому режиму при гальмуванні противмиканням на рисунку 6.7 відповідає точка  $(\omega_{стал}, M_{оп})$  на характеристиці  $R_2$ .

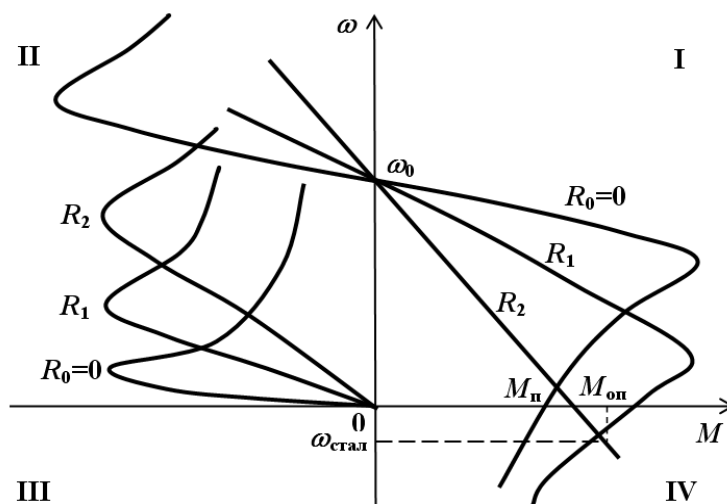


Рисунок 6.7 – Механічні характеристики АД в різних режимах роботи

Механічна характеристика  $R_1$  у режимі гальмування противмиканням і  $M_{оп} = \text{const}$  не забезпечує сталої роботи. Гальмування противмиканням можна досягти також шляхом перемикання на ходу двох фаз обмотки статора, що приводить до зміни напрямку обертання магнітного поля (перехід із точки А в точку В на рис. 6.8). Ротор при цьому обертається проти напрямку руху поля й поступово сповільнюється. Коли кутова швидкість спаде до нуля (точка С на рис. 6.8), двигун потрібно відімкнути від мережі, в іншому разі він може знову перейти в режим двигуна, до того ж його ротор буде обертатися в напрямі, зворотному до попереднього (точка D).

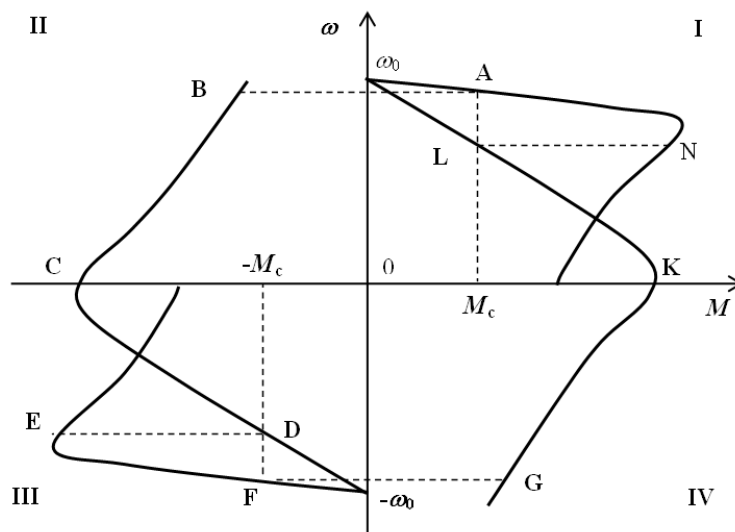


Рисунок 6.8 – Механічні характеристики АД при перемиканні двох фаз статора

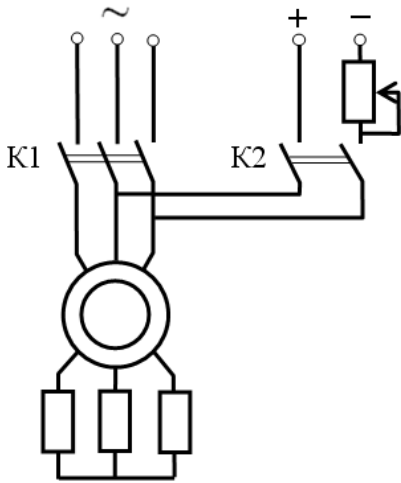


Рисунок 6.9 – Схема вмикання АД для переходу на режим динамічного гальмування

*Динамічне гальмування* АД здійснюється шляхом увімкнення обмотки статора на мережу постійного струму; обмотка ротора при цьому замикається на зовнішні резистори. Для переходу з режиму двигуна в режим динамічного гальмування контактор К1 (рис. 6.9) відмикає статор від мережі змінного струму, а контактор К2 вмикає обмотку статора до мережі постійного струму. Для обмеження струму й одержання різних гальмових характеристик у колі ротора передбачено зовнішні резистори.

Проходячи обмоткою статора, постійний струм утворює нерухоме поле, основна хвиля якого спричиняє синусоїдальний розподіл індукції. В обертовому роторі виникає змінний струм, який створює власне нерухоме відносно статора поле. Унаслідок взаємодії сумарного магнітного потоку зі струмом ротора виникає гальмовий момент, який залежить від магніторушійної сили статора, опору ротора й кутової швидкості двигуна. Механічні характеристики для цього режиму подано в нижній частині квадранта II (рис. 6.7). Вони проходять через початок координат, оскільки при кутовій швидкості, яка дорівнює нулю, гальмовий момент також дорівнює нулю. Максимальний момент пропорційний квадрату прикладеної до статора напруги й зростає зі зростанням напруги. Критичне ковзання залежить від опору роторного кола. Воно збільшується пропорційно до зростання опору. Максимальний момент при цьому не змінюється. На рисунку 6.7 характеристики динамічного гальмування подані для трьох різних опорів кола ротора й тому самому струмі статора.

Варто зазначити, що гальмування АМ – це важлива функція електроприводу багатьох механізмів і пристроїв різноманітного призначення. Вона має забезпечити зупинку виконавчого елемента електроприводу у фіксованому місці і протягом зазначеного часу. Якщо не використовувати способи гальмування, процес зупинки може відбуватися надто довго. Окрім розглянутих електричних способів гальмування, застосовують також механічне гальмування, яке передбачає використання гальмових колодок на гальмовому шківі. Електричне гальмування забезпечує більш точний гальмівний момент. Для фіксації механізму у чітко визначеній точці використовують обидва способи гальмування.

Порівняльну характеристику електричних способів гальмування АД подано в таблиці 6.1

Таблиця 6.1 – Порівняння способів гальмування АД

	Спосіб гальмування		
	Противмиканням	Динамічне	Рекуперативне
Переваги	Простота схеми. Наявність гальмівного моменту до зупинки. Висока інтенсивність гальмування	Відсутність силової схеми живлення. Можливість отримати жорсткі механічні характеристики з малими швидкостями обертання	Рекуперация електричної енергії у гальмівному режимі. Високий ККД
Недоліки	Відсутність рекуперативної рекуперації. Низький ККД. М'які механічні характеристики	Відсутність рекуперативної рекуперації. Гальмівний момент зменшується зі зменшенням швидкості обертання (мала інтенсивність гальмування)	Складність схем (наявність регульованого джерела напруги з можливістю режиму рекуперативної рекуперації)
Сфера застосування	Гальмування (реверс) двигунів у розімкнених системах. Опускання вантажів у піднімальних механізмах, керованих оператором	Гальмування двигунів у розімкнених системах. Отримання малих зупинкових швидкостей у піднімальних механізмах	Замкнуті системи електроприводів із широким діапазоном регулювання швидкості

**6.3.4 Неповнофазний режим асинхронних машин.** У практиці експлуатації АМ трапляються випадки, коли машина працює за відсутності однієї із фаз системи живлення, що відбувається внаслідок згорання одного з фазних запобіжників або обриву одного з фазних проводів. **Режим роботи** АД при відсутності живлення по одному з проводів трифазної системи називають **неповнофазним**. Неповнофазний режим є аварійним, і тривала робота АД в цьому режимі не допускається через додаткове нагрівання обмотки статора й ротора та можливе пошкодження АД.

Залежно від обставин, за яких відбулася втрата фази, можуть виникати різні режими роботи електродвигуна й різні наслідки цих режимів.

Аналіз неповнофазного режиму потребує врахування наступних факторів:

– схему з'єднання обмоток електродвигуна («зірка» чи «трикутник»);

- коли відбулася утрата фази, до чи після ввімкнення двигуна;
- ступінь завантаження двигуна й механічну характеристику робочої машини.

Варто звернути увагу на особливість неповнофазного режиму. У трифазному режимі кожною фазою обмотки протікають струми, зміщені у часі на одну третину періоду. У разі втрати однієї з фаз по двох обмотках протікає той же струм, а в третій фазі струм відсутній. Незважаючи на те, що кінці обмоток приєднані до двох фазних проводів трифазної системи живлення, струми в обох обмотках співпадають за часом. Такий режим роботи називається однофазним.

У разі з'єднання обмоток двигуна зіркою напруга в двох фазах розподіляється порівну і становить половину лінійної  $U_{\phi} = U_{л} / 2$ , а в третій фазі – відсутня.

Розглянемо роботу АД у неповнофазному режимі із застосуванням методу симетричних складових для випадку з'єднання обмоток статора за схемою «зірка» (рис. 6.10).

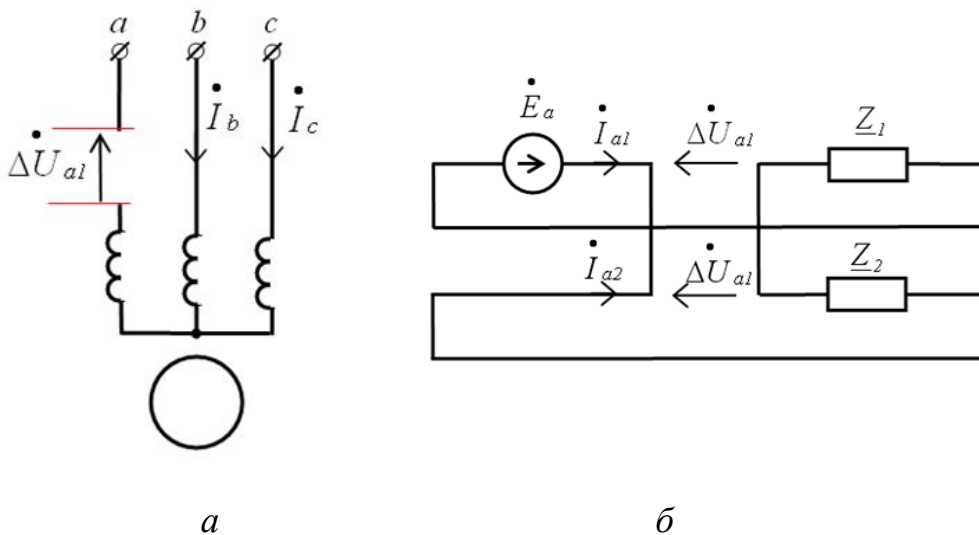


Рисунок 6.10 – Робота АД при обриві фази:  
*а* – схема з'єднання обмоток статора; *б* – схема заміщення

Рівняння падіння напруги в схемах прямої і зворотної послідовностей виглядають так:

$$\Delta \dot{U}_{a1} = \dot{E}_a - \underline{Z}_1 \cdot \dot{I}_{a1}; \quad (6.8)$$

$$\Delta \dot{U}_{a2} = -\underline{Z}_2 \cdot \dot{I}_{a2}, \quad (6.9)$$

де  $\Delta \dot{U}_{a1}$ ,  $\Delta \dot{U}_{a2}$  – симетричні складові падіння напруги фази «а» на несиметричній ділянці;  $\underline{Z}_1$ ,  $\underline{Z}_2$  – повні опори фаз двигуна для струмів прямої і зворотної послідовностей;  $\dot{E}_a$  – фазна ЕРС.

Нейтральна точка статорної обмотки не з'єднана з нульовим проводом, тому струм нульової послідовності відсутній.

У разі обриву фази «а» граничні умови будуть записані:

$$\dot{I}_a = 0, \quad (6.10)$$

$$\Delta \dot{U}_b = 0, \quad \Delta \dot{U}_c = 0, \quad (6.11)$$

де  $\Delta \dot{U}_b, \Delta \dot{U}_c$  – падіння напруги на несиметричній ділянці у фазах «b» і «с»

Зв'язок між симетричними складовими і фазними координатами для напруг можна записати:

$$\dot{U}_{a1} = \frac{1}{3}(\dot{U}_a + a\dot{U}_b + a^2\dot{U}_c); \quad (6.12)$$

$$\dot{U}_{a2} = \frac{1}{3}(\dot{U}_a + a^2\dot{U}_b + a\dot{U}_c); \quad (6.13)$$

$$\dot{U}_{a0} = \frac{1}{3}(\dot{U}_a + \dot{U}_b + \dot{U}_c); \quad (6.14)$$

$$\dot{U}_a = \dot{U}_{a1} + \dot{U}_{a2} + \dot{U}_{a0}; \quad (6.15)$$

$$\dot{U}_b = a^2\dot{U}_{a1} + a\dot{U}_{a2} + \dot{U}_{a0}; \quad (6.16)$$

$$\dot{U}_c = a\dot{U}_{a1} + a^2\dot{U}_{a2} + \dot{U}_{a0}. \quad (6.17)$$

Аналогічні рівняння можна записати для струмів і для приростів напруг.

Використавши рівняння (6.12) – (6.14) для падіння напруг і умови (6.11), отримаємо:

$$\Delta \dot{U}_{a1} = \Delta \dot{U}_{a2} = \frac{1}{3}\Delta \dot{U}_a. \quad (6.18)$$

Використавши вирази (6.9) і (6.18), можна записати:

$$\dot{I}_{a2} = -\frac{\Delta \dot{U}_{a1}}{\underline{Z}_2}. \quad (6.19)$$

Співвідношення (6.10) і рівняння для струмів виду (6.15) дають

$$\dot{I}_{a1} = -\dot{I}_{a2}. \quad (6.20)$$

Використавши рівняння (6.19), (6.20) і (6.8), отримаємо

$$\Delta \dot{U}_{a1} = \frac{\dot{E}_a \underline{Z}_2}{\underline{Z}_1 + \underline{Z}_2}. \quad (6.21)$$

Після підстановки  $\Delta \dot{U}_{a1}$  із (6.21) в (6.19) матимемо

$$\dot{I}_{a1} = -\dot{I}_{a2} = \frac{\dot{E}_a}{\underline{Z}_1 + \underline{Z}_2}. \quad (6.22)$$

Тепер із рівняння для струму  $\dot{I}_b$  виду (6.16) маємо

$$\dot{I}_b = -\dot{I}_c = (a^2 - a)\dot{I}_{a1} = -j\sqrt{3}\frac{\dot{E}_a}{\underline{Z}_1 + \underline{Z}_2}. \quad (6.23)$$

Якщо напруга мережі симетрична, то фазний струм трифазного двигуна

$$I_a = I_b = I_c = \frac{E_a}{|Z_1|}. \quad (6.24)$$

При малих значеннях ковзання ротора (обертах ротора близьких до номінальних) опір для струму зворотної послідовності  $Z_2$  невеликий, і ним можна знехтувати порівняно з опором  $Z_1$ . Зі співвідношень (6.23) і (6.24) отримаємо, що струм у разі обриву фази буде приблизно в  $\sqrt{3}$  більшим, за струм у симетричному режимі.

Якщо гальмовий момент постійний, то ковзання двигуна у разі обриву фази зросте, що спричинить зменшення  $Z_1$ . Це призведе до додаткового збільшення струму в непошкоджених фазах.

Зазвичай, двигун має навантаження близьке до номінального, тому обрив фази статора призводить до збільшення струму понад номінальне значення й перегрівання обмоток статора.

Однофазний режим роботи двигуна характеризується зменшенням максимального моменту, і він може виявитися меншим за момент навантаження. У цьому разі двигун «перекидається» і зупиняється під навантаженням. Коли ротор загальмований ( $s = 1$ ), опір прямої послідовності  $Z_1$  дорівнює  $Z_2$  (величина  $Z_1$  в діапазоні  $0 \leq s \leq 1$  майже не змінюється). Із (6.23) отримаємо:

$$\dot{I}_b(s-1) = -\dot{I}_c(s-1) = -j0,87\frac{\dot{E}_a}{\underline{Z}_2}. \quad (6.25)$$

Під час пуску двигуна

$$I_a = I_b = I_c = \frac{E_a}{|Z_2|}. \quad (6.26)$$

Порівняння (6.25) і (6.26) доводить, що в разі обриву фази двигуна й загальмування ротора, струм у непошкодженій фазі дорівнює 87 % пускового струму в трифазному режимі.

При однакових значеннях струмів і лінійних напруг співвідношення потужностей однофазного і трифазного режимів роботи двигуна буде таким:

$$\frac{P(1)}{P(3)} = \frac{U_{\text{л}} I_c \cos \varphi(1)}{\sqrt{3} U_{\text{л}} I_c \cos \varphi(3)} \approx 0,58 \frac{\cos \varphi(1)}{\cos \varphi(3)}. \quad (6.27)$$

Якщо вважати, що  $\cos\varphi(1) = \cos\varphi(3)$ , використання двигуна буде

$$\frac{P_1(1)}{P_1(3)} \approx 0,58. \quad (6.28)$$

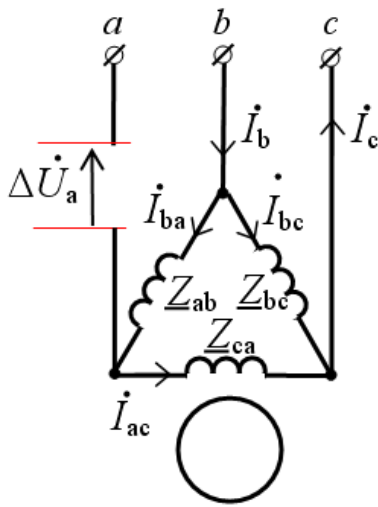


Рисунок 6.11 – Обрив фази при з'єднанні обмоток АД у трикутник.

Струми в лінійних проводах будуть дорівнювати сумі струмів у паралельних гілках:

$$I_b = I_c = I_{bc} + I_{ba} = 1,5 I_{bc}. \quad (6.29)$$

Таким чином, у разі втраті фази пусковий струм в одній з фаз буде дорівнювати пусковому струмові при трифазному живленні, а лінійний струм зростатиме не так інтенсивно (1,5 у порівняно з 1,732 при трифазному живленні).

У разі **втрати фази після ввімкнення двигуна** в роботу будемо вважати, що як у трифазному, так і в однофазному режимах двигун розвиває однакову потужність. Отже струм у найнавантаженішій фазі у разі утрати однієї з фаз збільшиться вдвічі порівняно зі струмом при трифазному живленні. Струм у лінійному проводі буде  $I_b = 3 \cdot I_{bc}$ , а при трифазному живленні –  $I_b = 1,732 \cdot I_{bc}$ .

Зазначимо, що фазовий струм зростає в два рази, а лінійний збільшується тільки в 1,732 рази. Це важливо для розрахунку захисту АД від аварійного (неповнофазного) режиму.

Напруги на фазах  $ca$  і  $ba$  залежать від швидкості обертання ротора. При загальмованому роторі  $U_{ca} = U_{ba} = U_{bc}/2$ .

Таким чином, напруги на фазах  $ca$  і  $ba$  зі змінюванням швидкості обертання від нуля до синхронної будуть змінюватися від значення, що дорівнює половині лінійного, до значення, що дорівнює лінійній напрузі.



## 6.4 Пуск асинхронних машин

Під пуском розуміють подачу змінної напруги на затискачі АД і його наступний розгін до швидкості, зумовленої частотою напруги живлення й моментом опору на валу.

Процес пуску є перехідним. На початку розгону ротор АД нерухомий, і в його обмотці наводиться ЕРС максимальної величини, частота якої дорівнює частоті напруги живлення. Ковзання ротора на цей момент становить  $s = 1$ , а струм ротора досягає найбільшого значення. Споживаний двигуном струм при  $s = 1$  називається пусковим струмом  $I_{\text{п}}$ . **Кратність пускового струму** відносно номінального  $I_{\text{н}}$  велика й зазвичай становить  $k_{\text{п}} = 5-7$  ( $I_{\text{п}} = (5-7) \cdot I_{\text{ном}}$ ). У процесі розгону двигуна струм повільно зменшується (рис. 6.12).

Для успішного пуску двигуна початковий пусковий момент  $M_{\text{п}}$  має бути більшим за зовнішній  $M_{\text{звн}}$ . На початку розгону момент двигуна трохи зменшується до величини  $M_{\text{мін}}$ , а потім зростає до  $M_{\text{макс}}$ .

Під час пуску потужних двигунів великий пусковий струм може спричинити значне зниження напруги мережі і, таким чином погіршувати або навіть повністю змінювати нормальну роботу суміжних електроприймачів. Підвищений пусковий струм становить небезпеку і для самого двигуна, оскільки збільшуються електродинамічні зусилля у лобових частинах обмотки статора і підвищується температура обмоток.

При частих або затяжних пусках температура обмоток може перевищити припустимі межі.

Залежно від типу двигуна, його потужності, опору навантаження виконавчого механізму використовують різні способи й схеми пуску АД. Далі ми розглянемо найхарактерніші схеми пуску. Детальніше зі способами керування пуском і режимом роботи АД можна ознайомитися в [4, 71].

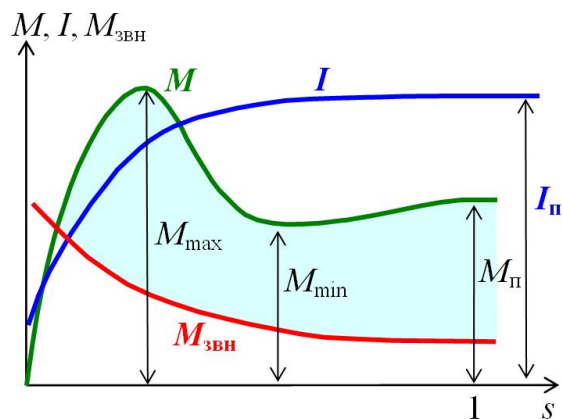


Рисунок 6.12 – Залежності струму і моменту АД від ковзання

**Прямий пуск АД.** Пуск АД шляхом безпосереднього вмикання в мережу змінного струму без обмеження струмів називають **прямим пуском**. Втрати в обмотках АД пропорційні квадрату струму, тому тривалість прямого пуску обмежують, щоб уникнути перегрівання обмоток і виходу з ладу двигуна.

Прямий пуск застосовують для двигунів з короткозамкненим ротором, які використовують для приводу механізмів із невеликим моментом інерції,

час розгону яких до сталої швидкості порівняно невеликий. Схема прямого пуску АД досить проста, що спричинило її поширення. На рисунку 6.13 наведена схема прямого пуску АД для випадку, коли виконавчий орган електроприводу передбачає зміну напрям (реверс) обертання двигуна. Для прямого пуску необхідно, щоб обертовий момент АД перевищував момент опору механізму.

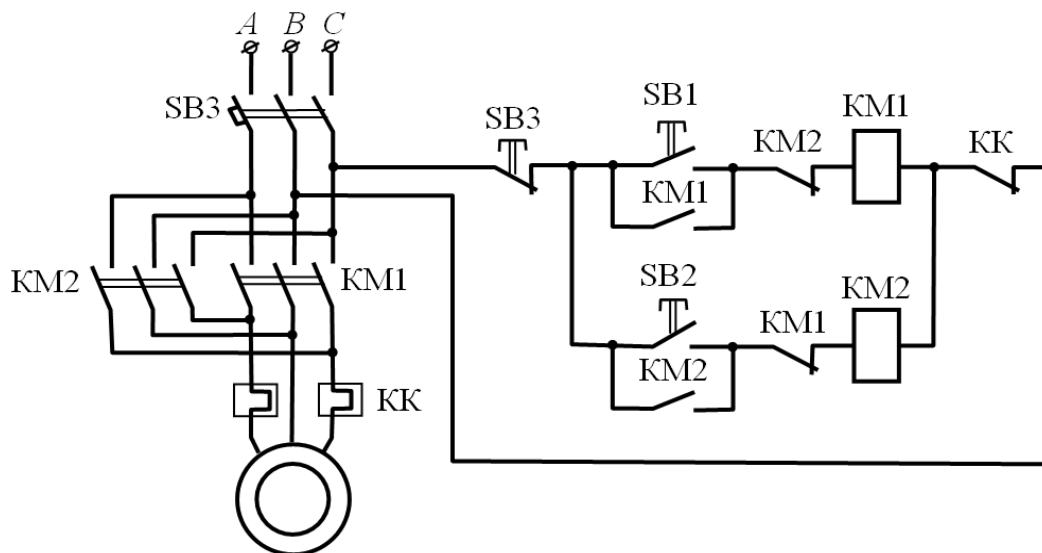


Рисунок 6.13 – Схема реверсивного прямого пуску АД

*Робота схеми прямого пуску* (рис. 6.13). Силкові контакти автоматичного вимикача QF, який виконує функцію захисту АД від режимів КЗ замкнені. Пуск АД реалізується шляхом подачі напруги на котушку пускача КМ1 за допомогою натискання на кнопку SB1 («Вперед»). Пускач замикає свої нормально розімкнені блок-контакти КМ1-1, розмикає нормально замкнені блок-контакти КМ1-2, замикає силкові контакти КМ1 і подає напругу (пряма послідовність фаз А-В-С) на обмотку статора АД. Відбувається прямий пуск двигуна.

Щоб змінити напрям обертання двигуна, потрібно спочатку вимкнути напругу. Натискається кнопка SB3 («Стоп»). Обмотка пускача КМ1 знеструмлюється. Його контакти КМ1-1 розмикаються, КМ1-2 замикаються, силкові контакти КМ1 розмикаються. Схема кіл керування повертається до початкового стану. Замиканням кнопки SB2 («Назад») подається напруга на котушку пускача КМ2, який своїми силівими контактами КМ2 подає напругу (зворотна послідовність фаз С-В-А) на обмотку статора АД. Відбувається пуск двигуна в зворотному напрямі.

Прямий пуск АД є небажаним, якщо потужність джерела живлення одного порядку з потужністю двигуна й джерело достатньо завантажене.

У цьому разі під час прямого пуску може знизитися напруги в мережі. Низка випадків не допускає прямого пуску. У такому разі застосовують інші методи пуску АД, а саме, пуск:

- перемиканням з'єднання обмоток із «зірки» на «трикутник»;
- уведенням в коло живлення реакторів;
- пониженням напруги, застосовуючи автотрансформатори.

Двигуни механізмів з великим моментом інерції запускають або подачею зниженої напруги на АД, або введенням до кола статора струмообмежувальних опорів.

**Пуск зі струмообмежувальними опорами** застосовується тоді, коли напруга в мережі під час пуску знижується більше ніж на 10–15 %. Під час пуску за схемою з струмообмежувальними опорами (рис. 6.14, *a* і *б*) спочатку вмикається контактор *S*. Розгін двигуна здійснюється за допомогою увімкнення в коло обмотки статора активних (рис. 6.14, *a*) або реактивних (рис. 6.14, *б*) опорів. Величину опору обирають так, щоб пусковий струм двигуна  $I_n$  був у  $k = 2-2,5$  разів менше, ніж пусковий струм за схемою прямого пуску. При цьому пусковий момент двигуна знижується в  $k^2$  разів. Після розгону двигуна струмообмежувальні опори шунтуються контактором *K*. Пуск з струмообмежувальними опорами застосовується тоді, коли умови пуску не є важкими (пуск на холостому ході або при малому навантаженні).

**Автотрансформаторний пуск.** Схема автотрансформаторного пуску наведена на рисунку 6.14, *в*. На першому етапі пуску вмикаються контактори *S* і *K1*. На двигун подається знижена напруга, обумовлена коефіцієнтом трансформації автотрансформатора (АТ)  $U_{дв} = U_1/k_{тр}$ , пусковий момент при цьому знижується в  $k_{тр}^2$  разів. У стільки ж разів знизиться споживаний з мережі струм.

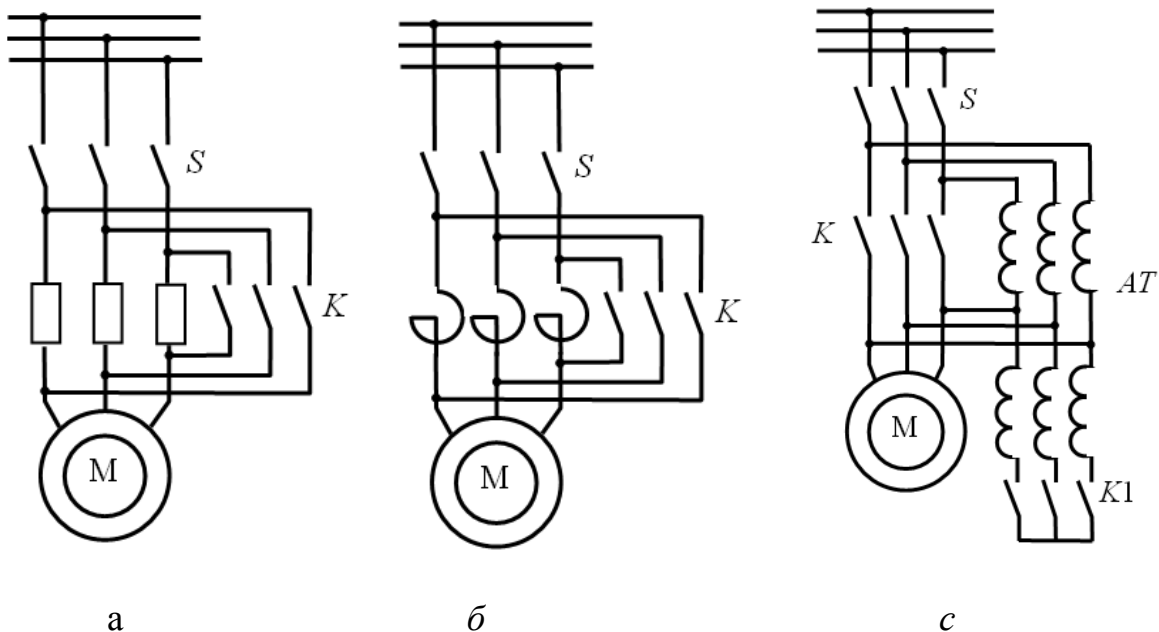


Рисунок 6.14 – Схеми обмеження пускового струму АД:  
*a* – з активними опорами; *б* – з реактивними опорами;  
*в* – автотрансформаторний пуск

Таким чином, у разі застосування автотрансформаторного пуску споживаний струм мережі  $I_n$  і пусковий момент двигуна  $M_n$  знижуються однаково, що є перевагою автотрансформаторної схеми порівняно з реактор-

ною. Однак ця перевага досягається ціною значного подорожчання й ускладнення схеми. Тому автотрансформаторний пуск застосовується в разі тяжких умов пуску для потужних двигунів.

На заключному етапі автотрансформаторного пуску перед замиканням контактора  $K$ , щоб уникнути короткого замикання автотрансформатора, спочатку вимикається контактор  $K1$ , а потім вмикається контактор  $K$ .

Знижена автотрансформатором напруга може бути сталою або змінюватися залежно від умов виробництва.

**Пуск АД з фазним ротором.** В особливо тяжких умовах пуску в електроприводах малої і середньої потужності застосовують асинхронні двигуни з фазним ротором. У цих двигунах з зниження пускових струмів і підвищення пускового моменту досягають шляхом введення в ланцюг ротора пускового реостата.

На рисунку 6.15, *a* показано схему реостатного пуску з уведенням у коло ротора резисторів. У цьому разі пуск АД здійснюється у функції часу. Двигун запускається з увімкненими в коло ротора реостатами  $R1$ ,  $R2$  і  $R3$ . Оператор натискає кнопку  $SB1$  («Пуск»), і на обмотку пускача  $KM1$  подається напруга. Пускач  $KM1$  замикає свої силові контакти, і напруга подається на обмотку статора. Пусковий момент при цьому  $M_{п} \approx M_{\max}$ , а пусковий струм  $I_{п} \approx (0,4-0,5) \cdot I_{\max}$ . Далі з витримкою часу  $t_1$  замикаються контакти реле часу  $KT1$ , і напруга подається на котушку контактора прискорення  $KM2$ , контакти якого шунтують перший ступінь резистори  $R_1$ . Далі з витримкою часу  $t_2$  замикаються контакти реле часу  $KT2$  і напруга подається на котушку контактора прискорення  $KM3$ , контакти якого шунтують другий ступінь – резистори  $R_2$ . І з витримкою часу  $t_3$  контакти контактора  $KM4$  шунтують третій ступінь – резистори  $R_3$ .

Увімкнення активних опорів у ротор АД приводить до збільшення критичного ковзання. Зростання  $s_{к}$ , у свою чергу, збільшує нахил механічних характеристик (рис. 6.15, *б*). Критичний момент АД не залежить від активного опору роторного кола, його величина, незважаючи на увімкнення  $R1-R3$ , залишається незмінною. Схему керування реостатним пуском виконують такою, щоб моменти перемикавання  $M_{п1}$  і  $M_{п2}$  для всіх ступенів пуску були однаковими.

На рисунку 6.15, *б* пусковим механічним характеристикам 1, 2, 3 відповідають додаткові активні опори  $R1 + R2 + R3 > R2 + R3 > R3$ . Після увімкнення АД працює на характеристиці 1. У точці 1У вмикаються контакти  $KM2$  і АД переходить на характеристику 2, а в точці 2У він переходить на характеристику 3. Після шунтування всіх додаткових резисторів у точці 3У АД переходить на природну характеристику й досягає сталої швидкості  $n_c$ , зумовленої моментом опору  $M_{on}$ . Момент перемикавання  $M_{п2}$  визначається величинами витримки реле часу кіл керування, які настроюються на необхідні значення.

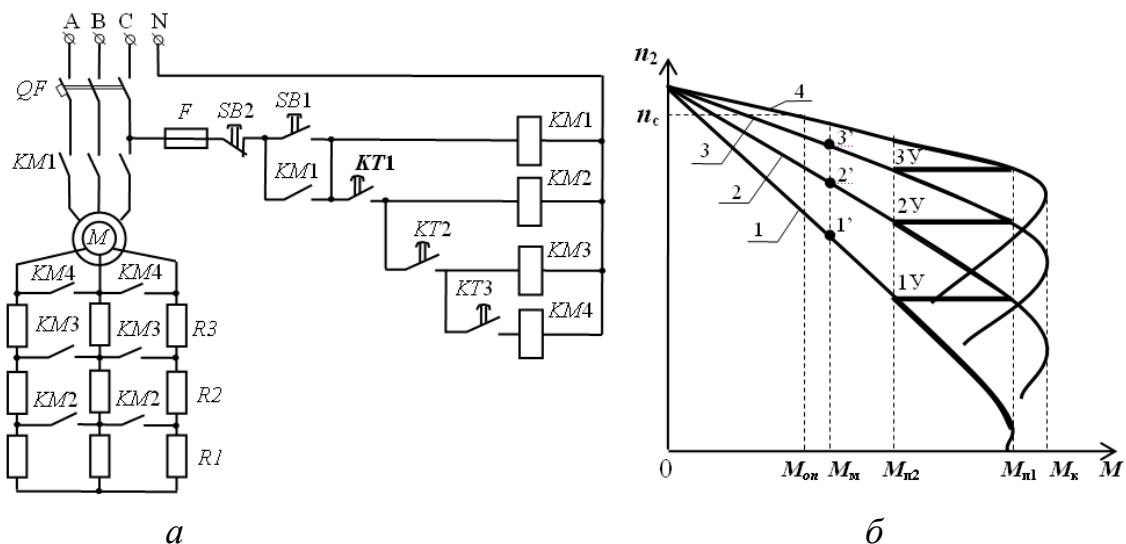


Рисунок 6.15 – Пуск АД з фазним ротором:  
а – схема; б – пускові характеристики

Пускові характеристики асинхронного двигуна в разі реостатного пуску найбільш зручні, оскільки високі значення моментів досягаються при невисоких значеннях пускових струмів. Однак двигуни з фазним ротором дорожчі за двигуни з короткозамкненим ротором і потребують додаткової пускорегулювальної апаратури.

**Пуск перемиканням з'єднання із «зірки» на «трикутник».** Схему можна використовувати при напрузі мережі, що передбачає з'єднання обмотки статора в робочому режимі в трикутник. Такий пуск еквівалентний пуску при пониженій в  $\sqrt{3}$  разів напрузі (з'єднання зіркою). До того ж максимальний пусковий струм становить близько 30 % від пускового струму, що виникає при прямому пуску. Відповідно зменшується і величина стартового пускового моменту порівняно з прямим пуском. Тому цей спосіб застосовують лише в разі незначного навантаження з боку механізму в момент пуску (механічні верстати, відцентрові вентилятори, помпи, компресори, деревообробні верстати).

## 6.5 Однофазні асинхронні двигуни

Однофазний двигун має одну обмотку, розташовану на статорі. Однофазна обмотка, що живиться змінним струмом, створює пульсуюче магнітне поле. Якщо розмістити в цьому полі ротор з короткозамкненою обмоткою, він обертається не буде. Якщо ж розкрутити ротор сторонньою механічною силою в будь-який бік, двигун буде стійко працювати. Пояснити це можна в такий спосіб. Пульсуюче магнітне поле можна замінити двома магнітними полями, що обертаються в протилежних напрямках із синхронною частотою  $n_1$  і мають амплітуди магнітних потоків, які дорівнюють половині амплітуди магнітного потоку пульсуючого поля. Одне з магнітних полів називається прямим, друге – зворотним. Кожне з магнітних полів індукує в

роторній обмотці вихрові струми. Їхня взаємодія з магнітними полями утворює обертові моменти, спрямовані назустріч один одному.

На рисунку 6.16 зображені залежності моменту від прямого поля  $M$ , моменту від зворотного поля  $M''$  і результуючого моменту  $M = M' - M''$  у функції ковзання  $s$ . Осі ковзань спрямовані назустріч одна одній. У пусковому режимі на ротор діють обертові моменти, однакові за величиною й протилежні за напрямом.

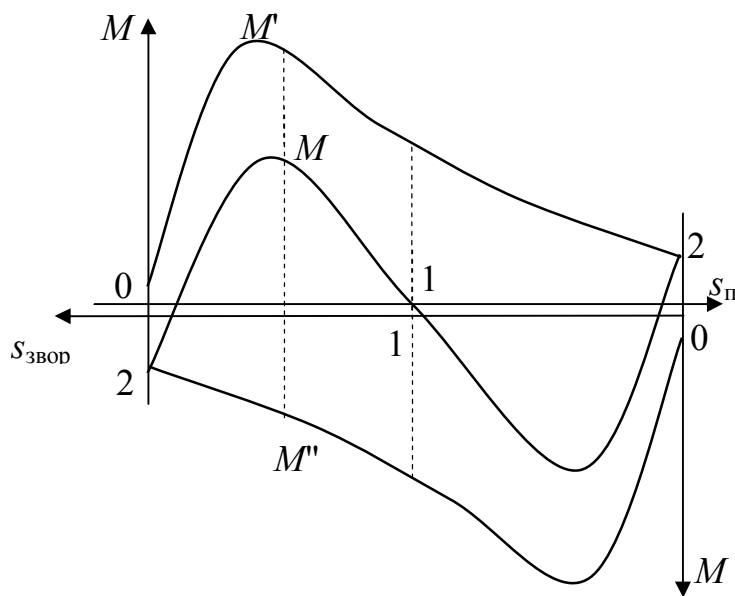


Рисунок 6.16 – Залежності прямого й зворотного моментів однофазного двигуна від ковзання

1. Однофазний двигун не має пускового моменту. Він буде обертатися в той бік, у який розкручений зовнішньою силою.

2. Характеристики однофазного двигуна гірші порівняно з характеристиками трифазного двигуна у наслідок істотного впливу зворотного поля.

Однофазні асинхронні двигуни (рис. 6.17) розраховують на живлення від однофазної мережі, на статорі вони мають дві обмотки: робочу А і пускову Б; ротор двигуна виготовляють короткозамкненим. Змінний струм, протікаючи робочою обмоткою, що зазвичай займає 2/3 пазів статора, створює пульсуючу намагнічувальну силу, а остання – пульсуюче магнітне поле.

Для пуску однофазного АД використовують пускову обмотку Б, зміщену в просторі відносно робочої обмотки на  $90^\circ$ . Струми робочої і пускової обмоток мають бути зміщеними в часі, що досягається підключенням їх або до симетричної двофазної мережі, або до однофазної мережі. В останньому випадку, для одержання зсуву фаз між струмами в обмотках, робочу обмотку А вмикають у мережу безпосередньо, а пускову Б – через активний опір (рис. 6.17, а) або конденсатор (рис. 6.17, б). Пускова обмотка Б вмикається тільки на період пуску двигуна; при частоті обертання порядку 0,7 від синхронної частоти обертання пускова обмотка за допомогою кноп-

Якщо розкрутити ротор сторонньою силою в напрямку прямого магнітного поля, з'явиться надлишковий (результуючий) обертовий момент, що розганяє ротор до швидкості, близької до синхронної. Ковзання двигуна відносно прямого магнітного поля  $s_n \approx 0$ ,  $n_1 \approx n_2$ .

Ковзання двигуна відносно зворотного магнітного поля

$$s \approx \frac{n_1 - (-n_1)}{n_1} \approx 2. \quad (6.30)$$

Аналіз результуючої характеристики дає підставу для таких висновків:

ки-вимикача або електромагнітного реле вимикається, а двигун далі працює як однофазний.

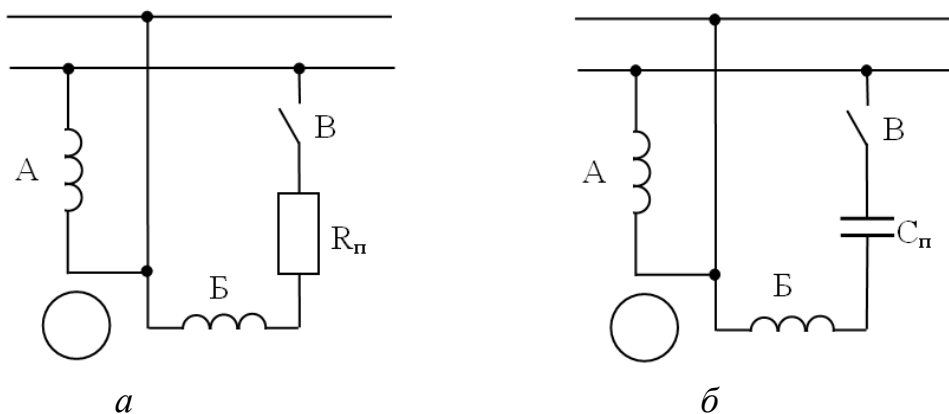


Рисунок 6.17 – Схеми вмикання однофазного двигуна:  
*a* – з активним опором; *б* – з конденсатором

Однофазні асинхронні двигуни порівняно з трифазними мають гірші експлуатаційні характеристики, менші ККД і коефіцієнти потужності.

Від однофазної мережі можуть працювати й трифазні асинхронні двигуни, якщо використати одну зі схем, представлених на рисунку 6.18.

У схемі на рисунку 6.18, *a* статорні обмотки з'єднані «зіркою», а в схемі на рисунку 6.18, *б* – «трикутником». Конденсатор *C* є пусковим, умикається в мережу тільки на час пуску, величина його ємності –  $C \approx 60$  мкф на 1 кВт потужності двигуна. Використовують і інші схеми вмикання трифазних АД в однофазну мережу, наприклад, через активний опір.

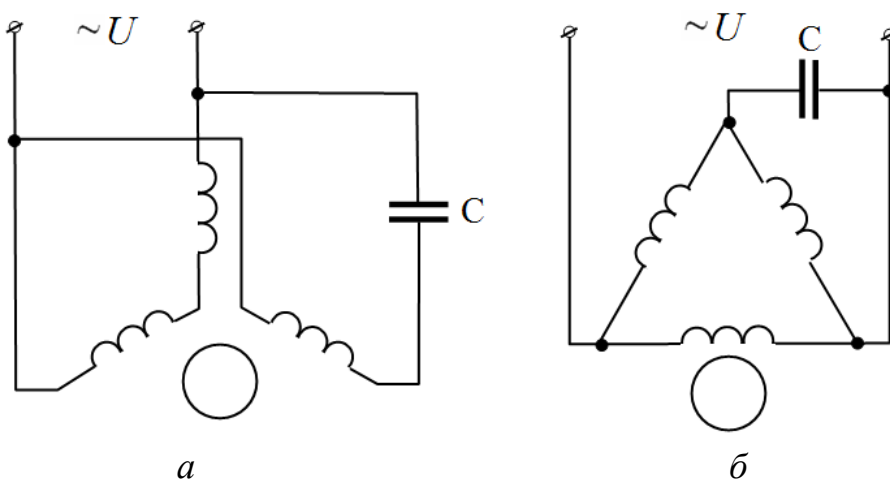


Рисунок 6.18 – Схеми вмикання трифазних двигунів в однофазну мережу

Трифазні двигуни, працюючи в однофазному режимі, можуть розвинути потужність  $P = (0,45-0,65) P_{\text{ном}}$ , де  $P_{\text{ном}}$  – номінальна потужність трифазного двигуна.

## Висновки

Вихідними даними під час вибору ЕМ для певного механізму є значення зазначених у паспорті її номінальних параметрів. Довільний режим ЕМ приводиться до її еквівалентного номінального режиму.

Основним режимом асинхронної машини є режим двигуна. Як гальмові режими використовують динамічне гальмування, рекуперативне гальмування й режим противмикання. Вибір режиму гальмування залежить від умов роботи певного електроприймача.

Вибір схеми пуску АД визначається особливостями її роботи під навантаженням.

Прямий пуск АД застосовують для механізмів з невеликим моментом інерції.

Для пуску двигунів механізмів із великим моментом інерції застосовують схеми з обмеженням пускових струмів. Струмообмежувальні опори застосовують тоді, коли умови пуску не є важкими. При тяжких умовах пуску застосовують автотрансформаторну схему.

Трифазні АД можна застосовувати в однофазній мережі, використовуючи пусковий і робочий конденсатори. Номінальна потужність двигуна в цьому разі зменшується на 45–65 %.

## Питання для самоконтролю

1. Назвіть основні групи класифікації електричних машин.
2. Які номінальні параметри машин змінного струму?
3. Які характеристики розрізняють за критерієм жорсткості?
4. Назвіть основні режими роботи електричних машин.
5. Опишіть робочі характеристики асинхронного двигуна?
6. Які режими роботи асинхронного двигуна відображаються на механічній характеристиці?
7. Порівняйте напрями обертання ротора АД і магнітного поля в режимах двигуна, генератора й гальмування противмиканням.
8. Поясніть механічну характеристику АД при перемиканні двох фаз статора.
9. Поясніть фізику процесів в АД у режимі динамічного гальмування.
10. Порівняйте способи гальмування АД.
11. Які способи пуску АД використовують на практиці? У яких випадках?
12. Поясніть схему прямого реверсивного пуску АД.
13. Поясніть причину наявності прямого й зворотного поля в однофазному АД.
14. Поясніть роботу схем вмикання однофазних АД.
15. Поясніть схеми вмикання трифазних АД в однофазну мережу.

## Список рекомендованих джерел:

Основна література: [28, С. 186–211, 294–302], [4, С. 563–577].  
Додаткова література: [6], [53], [35].



## Розділ 7 ЕЛЕКТРОПРИЙМАЧІ НАГРІВАЛЬНОГО УСТАТКУВАННЯ

**Ключові поняття:** електронагрівальне устаткування, пряме (непряме) нагрівання, електропрогрівання бетону (електродне, індукційне, інфрачервоне, непряме, електропрогрівання поза формою), електропропарювання, електропрогрівання ґрунту.

*Електронагрівальне устаткування* – це устаткування, в якому електрична енергія використовується для нагрівання матеріалів і виробів. На промислових і сільськогосподарських підприємствах, залежно від особливостей виробничого процесу, застосовують різні способи перетворення електричної енергії в теплову – нагрівання опором, індукційне, діелектричне, дугове нагрівання тощо.

Найчастіше застосовується нагрівання опором, яке базується на законі Джоуля–Ленца, що встановлює залежність між струмом  $I$  (А) у провіднику з активним опором  $R$  (Ом), часом  $t$  (с) проходження струму через провідник і виділеною у провіднику тепловою енергією  $Q$  (кал):

$$Q = 0,24 \cdot I^2 \cdot R \cdot t. \quad (7.1)$$

Активна потужність  $P$  (Вт), що споживається при цьому з електричної мережі, визначається співвідношенням:

$$P = \frac{U^2}{R} = I^2 \cdot R = I^2 \frac{\rho \cdot l}{F} \text{ (Вт)}, \quad (7.2)$$

де  $U$  – напруга, прикладена до провідника, В;

$\rho$  – питомий опір провідника, Ом·м;

$l$  – довжина провідника, м;

$F$  – площа перерізу провідника, м<sup>2</sup>.

Теплова енергія, що виділяється у провіднику, може бути використана безпосередньо для нагрівання самого провідника, який у цьому випадку є тілом, що нагрівається (принцип *прямого нагрівання*). При *непрямому нагріванні* енергія нагрівання передається спеціальними провідниками (нагрівачами), по яких проходить електричний струм до інших виробів, що підлягають нагріванню шляхом конвекції і випромінювання теплової енергії. В обох випадках об'єкт, що нагрівається, може бути в твердому, рідкому або газоподібному стані.

Електротехнічне обладнання і самі технології нагрівання набули поширення на сучасних підприємствах фактично всіх галузей господарства: металургія, машинобудування, хімічна промисловість, будівельна індустрія, комунальне господарство тощо.

У цій темі ми розглянемо основні види електроприймачів устаткування електричного нагрівання, опалення та обігрівання.

## 7.1 Електричне нагрівання

Електричні нагрівальні установки застосовують для: сушіння виробів після фарбування або просочення; сушіння приміщень під час будівельних робіт; підігрівання газів для різних технологічних цілей; опалення приміщень; розігрівання ємностей із рідиною, пластичними та грузлими матеріалами, а також для нагрівання твердих тіл і пристроїв пресів, штампів; прогрівання технологічних трубопроводів; прогрівання бетону, ґрунтів і дорожніх покриттів тощо.

У промисловості для нагрівання металів застосовують методи прямого електроконтактного й непрямого нагрівання. Електроконтактний спосіб застосовується для нагрівання металевих деталей, що мають електронну провідність. Прикладами електроконтактного способу є наскрізне нагрівання заготовок при їхній обробці тиском, контактне зварювання, прогрівання трубопроводів. Непряме нагрівання металевих виробів здійснюється в індукційних печах, змінне електромагнітне поле яких збуджує вихрові струми в тілі виробу і подальше його нагрівання.

Досить поширене електричне нагрівання у будівельному виробництві. Його застосовують при зварюванні й термообробці металевих частин будівельних конструкцій на підприємствах будівельної індустрії та будівельних майданчиках, прогрівання бетону й залізобетонних конструкцій, прогрівання ґрунту.

Електроприймачі електричного нагрівання можна поділити на такі характерні групи:

- за ознакою роду струму – постійного та змінного струму;
- за частотою змінного струму: промислової частоти (50 Гц), середньої частоти (до 10 кГц), високої частоти (понад 10 кГц);
- за способом перетворення електричної енергії в теплову (опором, індукційний, діелектричний, інфрачервоний тощо);
- за температурою: низькотемпературне (температура матеріалу не перевищує 400 °С; високотемпературне (з температурою більше 400 °С).

Окрім наведених, можлива класифікація устаткування електричного нагрівання за іншими ознаками.

**7.1.1 Нагрівальні елементи.** Основною складовою електроприймачів групи «Електричне нагрівання» є нагрівальні елементи, в яких відбувається перетворення ЕЕ в теплову і, відповідно, реалізується технологічний процес нагрівання. Вибір матеріалу й конструкції нагрівального елемента визначається особливостями технологічного процесу та конструкції устаткування.

Для виготовлення нагрівачів застосовують тугоплавкі сплави: ніхроми, фехралі та хромонікелеві сталі. Матеріали, із яких виготовляють нагрівачі, мають специфічні властивості: високий питомий електричний опір; малий температурний коефіцієнт питомого опору; постійний електричний опір нагрівального елемента в процесі тривалого терміну його служби; відсутність старіння.

За температурними діапазонами роботи нагрівальні елементи поділяють на три групи:

- низькотемпературні – нагрівання до 200–400 °С переважно конвективним способом теплообміну;
- середньотемпературні – нагрівання до 700–1 000 °С із теплообміном конвекцією, теплопровідністю й випромінюванням;
- високотемпературні – нагрівання до 2 200–3 000 °С з переважно радіаційним способом теплопередачі.

Конструктивно нагрівачі виготовляють відкритими або захищеними. У першому випадку конструкцію нагрівача виготовляють із дроту й стрічки великих перерізів. Відкриті нагрівальні елементи застосовуються в печах і побутових нагрівальних приладах.

Для нагрівання рідин або газів під час різних технологічних процесів використовують електронагрівники, виготовлені у вигляді циліндра з пористого металокерамічного матеріалу (пористість 40–80 мкм), що забезпечує проникнення рідини або газу крізь його стінки й одночасне їхнє нагрівання. Питоме теплове навантаження на нагрівачі становить 1 кВт/см<sup>2</sup>, робоча температура – 130–330 °С, напруга на елементі – 1–12 В.

Для обігрівання поверхонь, посудин, труб, панелей застосовують нагрівальні елементи, виготовлені з поліефірної смоли з наповнювачем, що забезпечує електропровідність. Електропровідність такого електронагрівача складає 0,01–2 Ом<sup>-1</sup>·м<sup>-1</sup>. Цей синтетичний матеріал легко формується, а також використовується у вигляді гнучких покриттів, плівок тощо. Робоча температура матеріалу – 130–230 °С.

Для низькотемпературного нагрівання широко застосовують **трубчасті електронагрівники** (аббревіатура ТЕН – трубчастий електронагрівник). ТЕНи призначені для нагрівання різноманітних речовин шляхом конвекції, теплопровідності та випромінювання. Вони використовуються як комплектуючі вироби у промисловому обладнанні та побутових нагрівальних приладах. Сфера застосування дуже широка: у промисловості – нагрівання води у ваннах, для гальваніки, плавлення легкоплавких металів, нагрівання штампів, для вулканізаторів тощо; у харчовій промисловості – варочні котли, виробництво шоколаду, молока, майонезу, хлібопекарне виробництво.

Конструктивно ТЕН (рис. 7.1) становить металеву трубку 1, заповнену теплопровідним електроізоляційним наповнювачем 2, у якому розміщується електронагрівальна спіраль 3. Як наповнювач застосовується плавлений периклаз. Порівняно з відкритими електронагрівниками ТЕНи електробезпечніші, можуть працювати у воді, рідких вуглеводнях, рідкому металі, розплавах солей, оксидів та в інших середовищах. ТЕНи стійкі до вібрацій і механічних навантажень. Потужність ТЕНів становить від 100 Вт до 15 кВт, робоча напруга – 36–380 В, робоча температура – 400–1 000 К. Термін служби ТЕНів становить 10–40 тис. год.

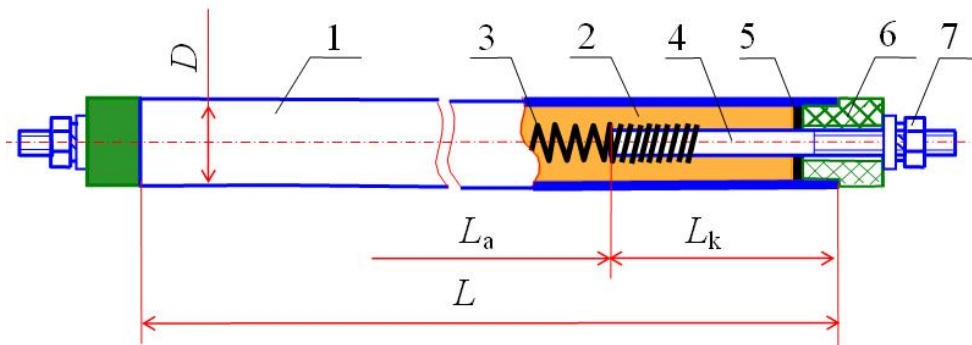


Рисунок 7.1 – Конструкція трубчастого електронагрівника:  
 1 – металічний корпус; 2 – наповнювач; 3 – спіраль; 4 – контактний стрижень; 5 – герметик; 6 – ізолятор; 7 – контактні шайби й гайка;  $L$  – розгорнута довжина труби;  $L_a$  – активна довжина;  $L_k$  – довжина контактних стрижнів у трубі

У практиці використовують ТЕНи різної конструктивної форми (рис. 7.2): патронні, двокінцеві, кільцеві, плоскі, гнучкі та ін.



Рисунок 7.2 – Конструктивні форми ТЕНів

Технічні характеристики ТЕНів промислового призначення регламентуються ГОСТ 13268-88 [13], ТЕНів побутового призначення – ГОСТ 19108-81 [14].

Основні конструктивно-технічні характеристики й параметри ТЕНів промислового призначення:

- напруга живлення – 12, 24, 36, 42, 48, 60, 127, 220 або 380 В;
- потужність – від 0,1 до 25 кВт;
- максимальна температура нагрівання – 750 °С;
- максимальна розгорнута довжина 250–6 300 мм;
- матеріал корпусу: нержавіюча сталь, титан, алюміній, мідь, латунь, алюмінієві сплави; неметалеві оболонки – фторопласт, силікон, гума тощо;
- діаметр оболонки – 6,5; 8; 8,5; 9,5; 10; 13 або 16 мм;
- наповнювач – кристалічний оксид магнію (периклаз).

**7.1.2 Електричні печі опору.** *Електрична піч* – це плавильна або нагрівальна установка, у якій тепловий ефект досягається за допомогою електричного струму.

Електричні печі опору (далі – ЕПО) застосовуються в машинобудуванні, металургії, легкій і хімічній промисловості, будівництві, комунальному й сільському господарстві тощо. За **ознакою призначення** ЕПО поділяють на **дві групи: нагрівальні печі й плавильні печі**. Нагрівальні печі застосовують для нагрівання металів з метою випалу, сушіння, спікання різних металевих і керамічних матеріалів, для надання металові пластичних властивостей перед обробленням тиском, для термічної обробки, для зміни внутрішньої структури металу. Плавильні печі призначені для одержання металів з руд або шляхом переплавлення відходів металу.

Електричні печі, порівняно з іншими видами печей, мають такі переваги:

- зручність механізації й автоматизації печі;
- легкість автоматичного керування потужністю, а отже, і температурним режимом печі;
- можливість одержання в пічній камері будь-яких температур до 3000 °С;
- достатньо рівномірне нагрівання виробу шляхом відповідного розташування нагрівачів на стінках пічної камери або застосування примусової циркуляції пічної атмосфери.

За **ознакою способу нагрівання** ЕПО поділяють на печі прямої дії і печі непрямої дії. У **печах прямої дії** нагрівання здійснюється теплом, що виділяється в самому виробі, під час проходження по ньому електричного струму. Нагрівання матеріалу в **печах непрямої дії** (рис. 7.3) відбувається за рахунок тепла, що виділяється нагрівальними елементами під час проходження по ним електричного струму.

Залежно від потужності печі виготовляють одно або трифазними (до 3 МВт). Живлення здійснюється струмом промислової частоти 50 Гц від мереж 380/220 В або через знижувальні трансформатори від мереж більш високої напруги. Коефіцієнт потужності міститься в інтервалі від 0,8 до 1,0. Більша частина печей опору стосовно безперебійності електропостачання належить до електроприймачів II категорії



Рисунок 7.3 – Електрична піч для випалювання кераміки

**7.1.3 Електричні водонагрівачі.** У водонагрівачах і парових казанах використовуються електродні системи з плоскопаралельними, дугоподібними й коаксіальними циліндричними електродами. При електродному

способі нагрівання використовується тільки змінний струм (трифазний або однофазний), щоб уникнути електролізу води. Трифазний струм застосовується в установках потужністю 25 і більше кВт.

Промисловість випускає електричні водонагрівачі (далі – ЕВН) промислового і побутового призначення. Побутові ЕВН будуть розглянуті в розділі 14.1.

Промислові ЕВН призначені для гарячого водопостачання житлових і промислових об'єктів, лікарень, навчальних закладів, готельних комплексів тощо.

Корпус бака водонагрівача й нагрівальних елементів виготовляють з нержавіючої сталі. У разі застосування водонагрівача для нагрівання води для технологічних потреб виробництва корпус може бути виготовлений із вуглецевої сталі. Зовні бак ізольований високоякісною теплоізоляцією. Водонагрівач легко забезпечує пікові витрати системи гарячого водопостачання і може застосовуватися разом з іншими джерелами гарячого водопостачання як основний або резервний. Економічність його експлуатації підвищується при вмиканні у часи мінімальних навантажень.

Конструкція й типова схема ЕВН наведені на рисунку 7.4.

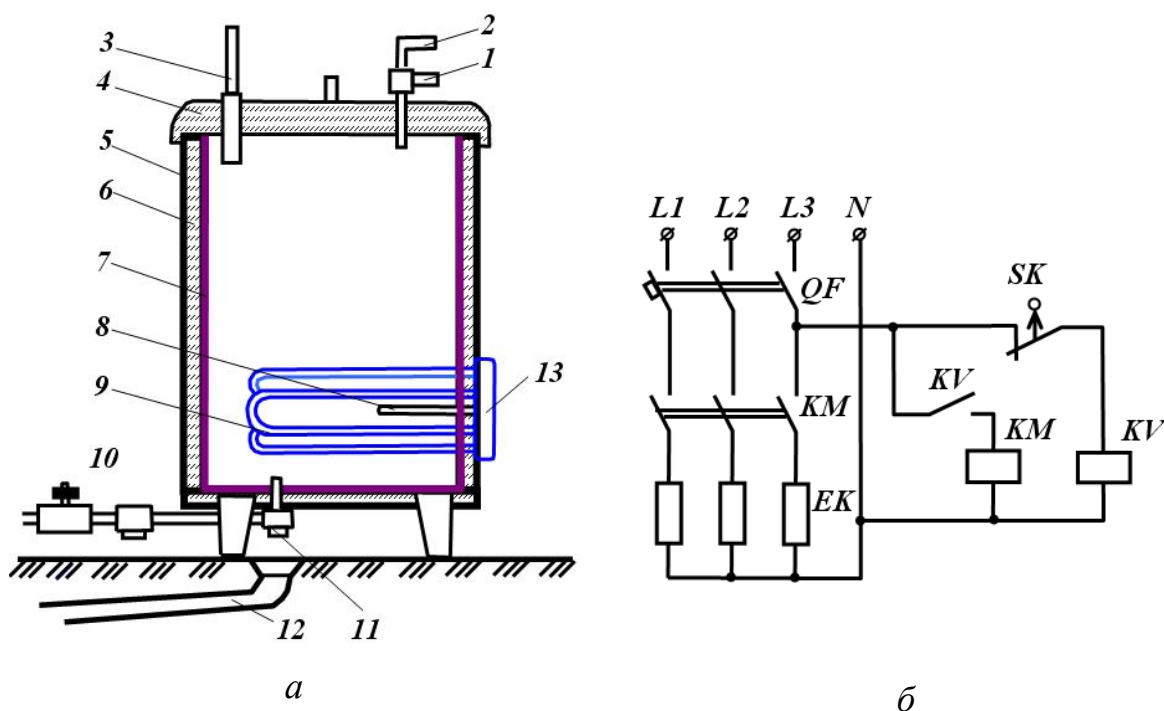


Рисунок 7.4 – Електричний водонагрівач:

*a* – загальний вид; *б* – електрична схема; 1 – запобіжний клапан; 2 – розбірний клапан; 3 – термометр; 4 – кришка; 5 – кожух; 6 – теплоізоляція; 7 – резервуар; 8 – термодатчик з температурним реле; 9 – ТЕН; 10 – зворотний клапан; 11 – зливальний кран; 12 – трубопровід; 13 – блок ТЕНів; QF – автоматичний вимикач; SK – контакт температурного датчика; KV – реле напруги; KM – магнітний пускач; EK – нагрівальні елементи (ТЕНи)

Бак водонагрівача (рис. 7.4, а) виготовлений у вигляді циліндричного резервуара 7, навколо якого розташований шар теплоізоляції 6, закритий кожухом 5. У нижній частині резервуара закріплений блок ТЕНів 13 (ТЕНи 9 і температурне реле 8). Зверху резервуар закритий кришкою 4. Для контролю температури у водонагрівачі встановлений термометр 3 і температурний датчик із температурним реле 8, за допомогою яких підтримується постійна температура й забезпечується автоматичний режим роботи. Холодна вода в резервуар подається знизу через вхідний патрубок зі зворотним клапаном 10. Вода нагрівається до 90 °С і під тиском холодної води піднімається вгору. Розбирання гарячої води з бака здійснюється шляхом переливання через розбірний патрубок 2. За необхідності зливу води з бака відкривається зливальний кран 11, унаслідок чого вода по трубопроводу 12 переливається у водозбірник.

Для гарантування безпеки в разі можливого вибуху пари води водонагрівач має запобіжний клапан 1.

Керування водонагрівачем здійснюється апаратами, змонтованими в станції керування. Схема керування показана на рисунку 7.4, б.

Водонагрівач вмикається в електричну мережу автоматичним вимикачем *QF*. Через замкнутий контакт *SK* температурного датчика вмикається котушка реле *KV*, яке своїм контактом подає напругу на котушку магнітного пускача *KM*. Головні контакти пускача *KM* вмикають нагрівальні елементи *EK*.

У разі підвищення температури понад 90 °С спрацьовує температурний датчик, що розмикає контакт *SK*. Ланцюг реле *KV* розмикається, і магнітний пускач вимикає ТЕНи. У разі зниження температури нижче заданої контакти датчика знову замикаються, і вмикаються нагрівальні елементи.

Електричні водонагрівачі поділяють на **дві великі групи**: *проточні та накопичувальні* (акумуляційні, ємнісні). Зовні вони схожі – квадратної або циліндричної форми. Накопичувальні водонагрівачі зазвичай більші за розмірами, ніж проточні. Головна їхня відмінність – спосіб підігрівання води.

**Електричні проточні водонагрівачі** мають компактні розміри та невелике масу. Вони зазвичай бувають двох або більше ступенів потужності, тобто в них застосовують два або більше ТЕНів з окремими або загальним перемикачем. На кожному ступені температура регулюється потоком води за допомогою водопровідного крану на вході пристрою (більший потік – менша температура, і навпаки: менший потік – більша температура).

Температура води на виході залежить від початкової температури води, швидкості або кількості потоку, загальної потужності водонагрівача й кількості ввімкнених на цей момент ступенів потужності (кількості ввімкнених ТЕНів).

У проточного водонагрівача немає ємності, він повинен нагріти до потрібної температури весь об'єм води, яка проходить через нього. Щоб швидко нагріти велику кількість води, потрібен пристрій значної потужності (3–27 кВт). В залежності від потужності нагрівача під час підключення

до електричної мережі потрібно правильно обрати електричний кабель, місце ввімкнення (електричний щиток та автоматичний вимикач).

Проточні елементні водонагрівачі застосовують у промисловості, у системах напування тварин, приготування кормів, для обігрівання невеликих приміщень та ін.

Температуру води регулюють її подачею і контролюють за термометром. При 75–80 °С термореле відмикає водонагрівач від мережі. В автоматичному режимі роботи водонагрівач вмикається через 15–45 с після ввімкнення до мережі.

Перевагами проточних водонагрівачів є миттєве нагрівання води та компактні розміри, недоліком – споживання значних обсягів електроенергії.

**Накопичувальні водонагрівачі** використовують у відкритих системах водозабору в разі нерівномірного графіку споживання гарячої води.

Призначені для нагрівання та зберігання гарячої води. Становлять металевий теплоізолюваний (з використанням твердого пінопласту або мінеральної вати) резервуар, усередині якого встановлені один або два (обсяг резервуара 800 л і більше) нагрівальні блоки (ТЕНи). Гаряча вода витісняється через верхній патрубок шляхом подачі холодної води з водопроводу.

У промислових водонагрівачах гарячу воду перекачують насосом по замкнутій системі подачі гарячої води або опалення. Втрати води заповнюють з водопроводу за рахунок природного припливу через зворотний клапан. Максимальна температура води – близько 90 °С. Температуру води в резервуарах підтримують за допомогою терморегулятора.

До переваг накопичувальних електричних водонагрівачів відносять: великий запас гарячої води; економічність (невелике споживання енергії, можливість використання нічного тарифу); монтаж без додаткової електропроводки. До недоліків – досить великі габарити; відносно тривалий час нагрівання води.

У таблиці 7.1 наведені типові параметри промислових накопичувальних ЕВН серії «Горизонтальний», на рисунку 7.5 – їхнє конструктивне виконання і зовнішній вигляд [68].

Таблиця 7.1 – Характеристики водонагрівачів серії «Горизонтальний»

1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
Ємність, л	1 000	2 000	3 000	4 000	5 000	6 000	7 000	8 000	10 000
Зовнішній діаметр, мм	968	1 412	1 514	1 514	1 714	1 714	2 014	2 014	2 014
Довжина, мм	2 250	2 130	2 675	3 375	3 200	3 750	3 119	3 520	4 530
Маса, кг	200	350	650	1 000	1 200	1 400	1 500	1 700	2 000
Номинальна напруга, В	380								
Потужність вбудованих ТЕНів (опція), кВт	35	35	40	60	70	70	70	75	75



### Продовження таблиці 7.1

1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
Рекомендована потужність теплообмінника, кВт	60	60	120	120	180	180	270	270	450
Час нагрівання від +5 до +65 °С, годин	2,7	4	5,2	4,6	5	6	7	7,4	9,3
Межі налаштування термостата (±5), °С	від +30 до +85								

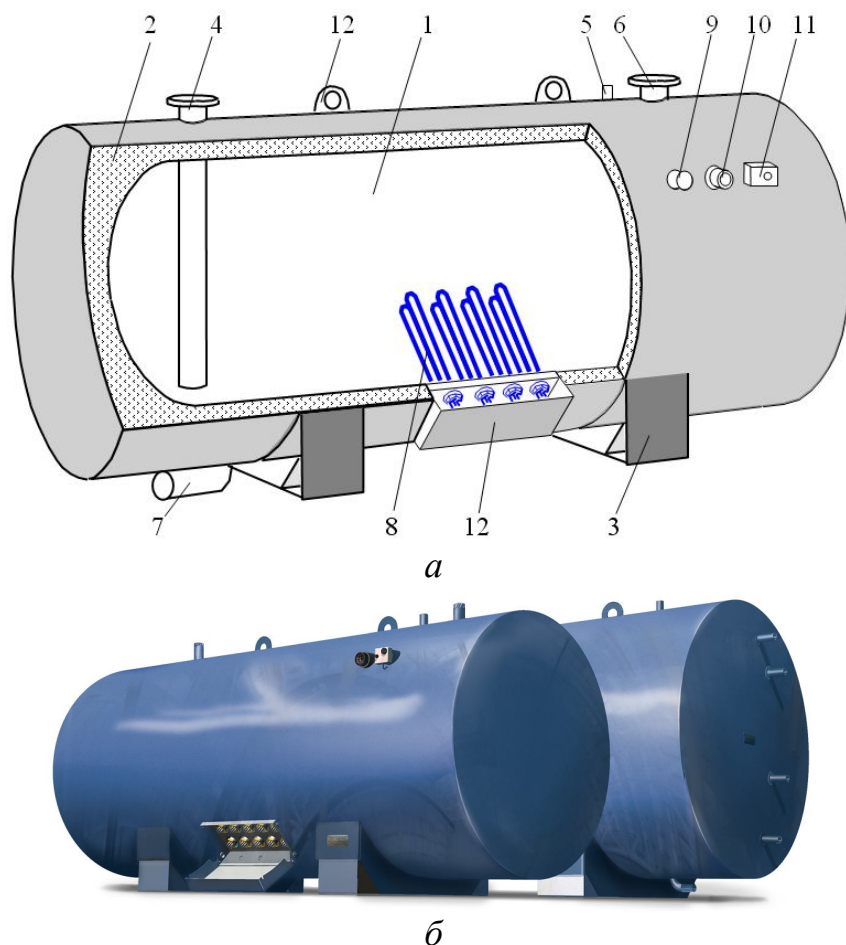


Рисунок 7.5 – Промислові ЕВН серії «Горизонтальний»:  
*а* – конструктивне виконання; *б* – зовнішній вигляд; 1 – бак; 2 – теплоізоляція; 3 – опора; 4 – вхідний патрубок; 5 – патрубок запобіжного клапана; 6 – вихідний патрубок; 7 – патрубок зливу води; 8 – блоки ТЕНів; 9 – датчик рівня води; 10 – термоманометр; 11 – терморегулятор з термовимикачем; 12 – коробка підключення ТЕНів

## 7.2 Електричне опалення

Досить тривалий час електричне опалення вважалося дорогим, пожежонебезпечним і екологічно шкідливим. Прогрес у галузі виробництва конвекторів і термостатів, поява нових типів електроопалювальних прила-

дів, а саме кабельного обігрівання підлог і інфрачервоних стельових обігрівачів, докорінно змінили експлуатаційні характеристики сучасного електричного опалення. Обладнання, призначене для житлових приміщень екологічно чисте (температура нагрівальних елементів незначна, вони не змінюють вологість), пожежобезпечним, має відповідний клас захисту від ураження електричним струмом, працює безшумно, не виділяє ніяких шкідливих речовин. Електромагнітне поле цих приладів перебуває на фоновому рівні. Загалом сучасні системи електричного опалення будівель відповідають найжорсткішим вимогам щодо екології та безпеки.

Широкими є можливості електричного опалення щодо економічного й раціонального використання електроенергії. В опалюваних приміщеннях можна встановити термостат і регулювати температуру в широкому діапазоні (5–30 °С). Зазначимо, що зниження температури на 1°С зменшує витрати електроенергії на 4–5 %. При гнучкому змінюванні температурних режимів у кожному окремому приміщенні економія може сягати 30–50 %. Особливо істотної економії (до 80 %) досягають для високих (понад 4,5 м) об'єктів у разі використання інфрачервоних обігрівачів або «теплої підлоги». Змінювання температури можна запрограмувати на будь-який графік, можна відімкнути будь-яку кімнату, групу кімнат або цілий поверх. Після тимчасового відімкнення електроживлення опалення працює без втручання людини.

У житлових будинках електроопалення дуже зручне як доповнення до вже існуючої системи центрального опалювання. Це дуже важливо під час похолодання у весняно-осінні періоди, коли центральне опалення відімкнене. У критичні періоди взимку (при значному похолоданні), коли центральна опалювальна система не забезпечує необхідного рівня комфорту, пряме стаціонарне електричне опалення автоматично підтримує необхідний температурний режим, до того ж експлуатаційні витрати незначні. Особливо важливим є додаткове резервне електроопалення у разі аварій та інших позаштатних ситуацій.

Найскладніші проблеми з опаленням виникають у приміщеннях з високими стелями (5–10 м) і незадовільною теплоізоляцією. Це заводські корпуси, склади, автобази, криті спортивні й концертні зали, виставочні й торговельні павільйони та ін. Для таких споруд найефективнішими опалювальними приладами вважаються інфрачервоні обігрівачі, економія електроенергії тут може досягати 80 %.

Для електричного опалювання використовується дуже багато різноманітних електронагрівальних пристроїв, а саме: електричні котли, радіатори, калорифери; теплові панелі, вентилятори; різні пристрої радіаційного обігрівання; електричні теплоаккумуляційні пристрої, пристрої для відтавання ґрунту, обігрівання бетону, дорожніх покриттів і т. ін.

**Електричні опалювальні пристрої.** Електричне опалення економічно виправдане в тих випадках, коли для використання іншого виду енергії потрібні значні капітальні витрати (будівництво нової котельні), виника-

ють значні труднощі щодо забезпечення паливом, коли необхідно врахувати екологічний фактор – чистоту навколишнього середовища, а також коли використання електричної енергії в нічний час вирівнює добовий графік навантаження електричної станції і системи.

Можна виокремити такі способи електроопалення: опалення електричними калориферами з підігріванням повітря; опалення за допомогою панельних нагрівачів; опалення з використанням низькотемпературного променистого обігрівання.

Для опалення будинків або окремих приміщень із підвищеними гігієнічними вимогами (лікарень, операційних і ін.) у деяких випадках застосовують повітряне опалення з використанням електрокалориферів. Для обігрівання приміщень також застосовують електричні обігрівачі з природною конвекцією (панельні нагрівачі), що вигідно відрізняються від калориферів відсутністю вентилятора. Крім того, під час обігрівання приміщень обігрівачі можна розмістити в різних їхніх частинах, що без спеціального розведення повітря забезпечує більш рівномірний розподіл теплоти.

Для опалення приміщень використовуються також теплоакumuляційні пристрої. У години нічного мінімуму електричних навантажень вони підключаються до електричної мережі й працюють на обігрів приміщень, одночасно запасують теплоту в теплоакumuляторі. Потім у денний час вони віддають цю теплоту в опалювальне приміщення, будучи відключеними від електричної мережі. Вибір потужності й теплоакumuляційної здатності установки визначається площею опалюваного приміщення й кліматичними умовами місцевості. В окремих випадках як теплоакumuлюючий елемент використовуються електричні котли великої ємності.

Електрокалорифери складаються з нагрівального елемента й вентилятора. Вони використовуються для нагрівання повітря й різних газів у технологічних процесах. Електрокалорифери завдяки примусовій конвекції забезпечують інтенсивний теплообмін, мають у декілька разів меншу поверхню нагрівання порівняно з поверхнями електронагрівальних пристроїв з вільно конвективним способом теплообміну. У разі наявності невисоких температур нагрівальних елементів у калориферах застосовується підвищена на ізоляторах відкрита дротова спіраль.

У калориферах можуть застосовуватися прості й ребристі трубчасті електронагрівачі з розгалуженою поверхнею нагрівання.

Опалювальний калорифер із трубчастими ребристими нагрівачами призначений для нагрівання повітря до 400 К у системах повітряного опалення, вентиляції, штучного клімату й у сушильних установках. Він складається з кожуха й трубчастих нагрівальних елементів. Задана температура вихідного повітря підтримується автоматично електроконтактними термометрами, датчики яких установлені на виході повітря з калорифера.

Сучасні опалювальні системи також проектують із використанням електроконвекторів. Назва «конвектор» відображає принцип розподілу гарячого повітря у приміщенні – природну конвекцію. Нагрівання повітря відбувається під час його проходження через нагрівальний елемент. Холо-

дне повітря проходить через нагрівальний елемент, нагрівається і виходить через жалюзі, а його місце займає повітря з приміщення. Таким чином, тепле повітря циркулює в приміщенні, забезпечуючи швидке й комфортне тепло. Конвектор нагріває приміщення, не використовуючи пристроїв для примусової циркуляції повітря, тому це більш надійний і економічний прилад порівняно з обігрівачами з вбудованим вентилятором. До того ж, на відміну від тепловентиляторів, конвектори, забезпечуючи ефективний рух теплого повітря, не створюють шуму під час роботи.

Температуру повітря в приміщенні контролює вбудований термостат із датчиком. Користувач виставляє необхідну температуру на термостаті, а датчик повітря вимірює температуру повітря, що надходить, і в разі досягнення заданих параметрів вимикає обігрівання. У разі зниження температури в приміщенні знову вмикається обігрівання. Таким чином, конвектор підтримує постійну задану температуру. Точність підтримання температури в приміщенні в деяких моделях конвекторів досягає  $0,1^{\circ}$ .

Сучасні конвектори, завдяки застосуванню новітніх і унікальних технологій, мають наступні переваги в порівнянні з традиційними обігрівачами:

- ККД нагрівальних елементів досягає 95–99 %;
- повна відсутність шуму під час нагрівання повітря й охолодження нагрівального елемента;
- повітря нагрівається ефективно, що не порушує його природної вологості й не спалює кисень;
- великий ресурс безперервної роботи (у деяких моделей до 25 років).
- висока швидкість виходу на робочу температуру (1–1,5 хв).

Витрата електричної енергії залежить від тепловитрат опалювального приміщення. За середньостатистичним даними [67] при зовнішній температурі  $-20^{\circ}\text{C}$  і температурі в приміщенні  $+18^{\circ}\text{C}$  для опалення  $1\text{ м}^3$  приміщення необхідно 40–45 Вт електричної енергії, що становить 120 Вт встановленої потужності на  $1\text{ м}^2$  при висоті стелі 250–270 см.

Більш детально роботу електрокалориферів і електроконвекторів розглянуто в розділі 13.1.

### 7.3 Електропрогрівання бетону

На теплову обробку бетону витрачається близько 70 % часу, необхідного для виготовлення залізобетонних виробів, тому на практиці застосовують різні методи теплової обробки бетону, що забезпечують зменшення часу на цю операцію. До таких методів належить електричне нагрівання як у процесі формування бетонної суміші, так і під час знаходження її у формах. У разі попереднього електропрогрівання бетонної суміші й форм час теплової обробки бетону може істотно знизитися – до декількох годин.

Існує кілька методів електротермообробки бетону.

**Електродна наскрізна.** Електроди розміщують вертикально щодо товщі бетону. Застосовується для збірних і монолітних фундаментів, стін, блоків.

**Електродна периферійна.** Електроди закріплюють в опалубці в спеціальних щитах або термоактивному шарі тирси, змоченої розчином хлористого натрію (NaCl). Застосовується для однобічного прогрівання конструкцій товщиною більше за 20 см або двостороннього – до 20 см.

**Індукційна електротермообробка.** Виріб розміщують в змінному магнітному полі, утвореному електричною обмоткою, і він нагрівається вихровими струмами. Застосовується під час прогрівання збірних і монолітних конструкцій: колон, балок, рам, стовбурів, труб та ін.

**Інфрачервоне прогрівання високотемпературними нагрівачами** за допомогою ламп розжарювання, трубчастих, дровових та інших нагрівачів. Застосовується для прогріву монолітних конструкцій складної конфігурації і при сушінні виробів.

**Непряме прогрівання низькотемпературними нагрівачами** за допомогою трубчастих, плоских, струнних та інших нагрівачів, вмонтованих у опалубку або мати. Застосовується для всіх видів виробів.

**Інфрачервоне прогрівання у камерах з випромінювальними поверхнями.** Застосовується під час виготовлення плит і панелей.

**Електропрогрівання бетонної суміші поза формою,** при якому суміш у гарячому стані укладається у форму. Застосовується для зведення монолітних конструкцій і під час виготовлення виробів у заводських умовах.

Прогрівання електродним способом можна здійснювати тільки за допомогою змінного струму, тому що постійний струм спричиняє зворотні хімічні реакції, які змінюють структуру бетону. Величина струму, що протікає через бетон, залежить від прикладеної напруги, питомого опору бетону, поверхні зіткнення електродів із бетоном і відстані між електродами. Електропровідність бетону залежить від вмісту в ньому вологи і в міру затвердіння бетону зменшується. Щоб підтримати розрахункове тепловиділення, до бетону вводять домішки – CaCl, NaCl, що прискорюють твердіння і зменшують опір бетону.

Технічні характеристики трансформаторів, що застосовуються для прогрівання бетону, наведені в таблиці 7.2.

Таблиця 7.2 – Параметри трансформаторів для прогрівання бетону

Параметр	Трансформатор ТСДЗ-63/0,38 Уз	Трансформатор ТСДЗ-80/0,38 Уз
Р <sub>н</sub> , кВА	63	80
U <sub>н</sub> , В	3 х 380	3 х 380
Ступені вторинної напруги холостого ходу, В	50; 65; 80; 100	55; 65; 85
Струм на стороні низької напруги при напрузі 50-65 В, А	350–450	500–600
Струм на стороні низької напруги при напрузі 80-100 В, А	250–300	400
Габаритні розміри, мм	750 х 650 х 750	1040 х 700 х 1040
Вага, кг	300	380

Застосовувані для прогрівання електроди поділяють на пластинчасті, смугові, стрижневі й струнні (рис. 7.6). Для перших двох видів застосовують покрівельну сталь, для інших – прутки діаметром 5–12 мм. Пластинчасті електроди виглядають як пластини, що повністю або частково закривають протилежні площини по товщині виробу. Струнні електроди закріплюють уздовж осі довгомірних конструкцій. Відстані між електродами обирають відповідно до рисунка 7.6.

Особливо важливо застосовувати електропрогрівання в зимовий період. Замерзання бетону в процесі твердіння знижує його міцність, причому тим більше, чим раніше він був заморожений. У разі досягнення бетоном 50–60 % міцності заморожування не впливає на кінцеву міцність бетону. Виходячи з цього обирають режим прогрівання. Тривалий режим застосовують для масивних конструкцій, прискорений – для полегшених конструкцій, проміжний – для інших конструкцій.

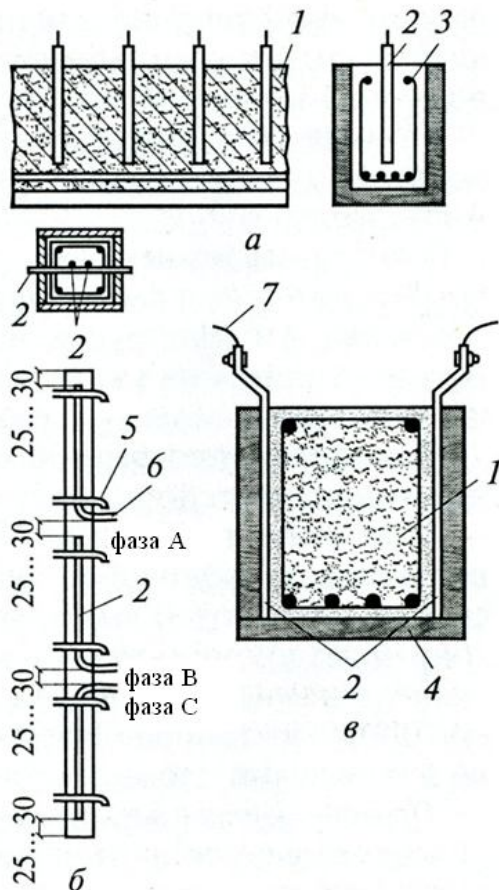


Рисунок 7.6 – Електродний метод електропрогрівання бетону: *a* – стрижневими електродами; *б* – струнними; *в* – пластинчастими; 1 – бетон; 2 – електроди; 3 – арматура; 4 – опалубка; 5 – гаки; 6 – виводи електродів для приєднання до живильної мережі; 7 – проводи

Окрім цього, можна застосувати й такі режими: ступеневий режим із кількома ізотермічними ступенями (застосовують для монолітних, попередньо навантажених конструкцій); режим «ізотермічного прогрівання й охолодження», при якому прогрівання здійснюється за методом електророзігрівання поза формою (застосовується для монолітних конструкцій); саморегулюючий режим із постійною напругою струму прогрівання (для масивних конструкцій), імпульсний режим із почерговим відключенням струму. Максимальна температура процесу обмежується гранично припустимою для певної марки бетону (зазвичай 40–80 °С).

Електропрогрівання бетону здійснюється за допомогою спеціальних трифазних трансформаторів з масляним охолодженням. На первинну обмотку подається напруга 380 В, вторинна обмотка має три-чотири ступені напруги в межах 50–100 В. Поряд з трифазними використовують однофазні, зокрема зварювальні трансформатори, що підключаються три-

фазними групами. Зварювальні трансформатори розраховані на повторно-короткочасний режим, і їхнє безперервне навантаження під час прогрівання повинно становити 60–70 % від номінального.

Електропроводку від знижувальних трансформаторів до місця електропрогрівання виконують тільки ізольованими проводами з кріпленням на дерев'яних опорах, на ізоляторах або спеціальних переносних опорах у вигляді козел. Щоб уникнути втрат у лініях, трансформатори необхідно розташовувати якнайближче до електродів у місці прогрівання бетону. Контакткування сполучних проводів з електродами та іншими проводами забезпечують за допомогою болтів або знімних затискачів.

Перед увімкненням вторинної мережі трансформатор перевіряють в режимі холостого ходу, при цьому перевіряють також можливість регулювання вторинної напруги. Під час роботи треба стежити за допомогою амперметрів або вимірювальних кліщів за рівномірним навантаженням на фазах.

У процесі твердіння бетону його опір зменшується. Для підтримання струму необхідно зменшувати напругу на виході трансформатора.

Температуру бетону під час електропрогрівання вимірюють термометрами в шпарах, заздалегідь заготовлених, і не менше трьох у кожному конструктивному елементі. У перші 5–6 годин температуру вимірюють щогодини, у наступні 18 годин – через 2 години. далі – 2 рази на зміну.

Для електропрогрівання бетону, цегельної кладки, оштукатурених поверхонь використовують зовнішні джерела тепла. Електропрогрівання виробів з використанням зовнішніх джерел тепла, на відміну від електродного прогрівання, відбувається за рахунок тепла, що виділяється поза конструкцією й передається бетону через проміжні матеріали (тирсу, воду, повітря, пар, металеві стінки) або шляхом випромінювання. Оскільки зовнішнє електропрогрівання менш економічне, порівняно з електродним, його застосовують тільки для виробів складної конфігурації.

**Прогрівання бетону електричними печами опору.** В електричних печах опору, застосовуваних для непрямого прогрівання бетону, нагрівальним елементом слугує ніхромовий або фехрелевий дріт. Найпростіша піч, призначена для електропрогрівання бетонних і залізобетонних виробів невеликої товщини, становить дерев'яну ринву параболічної форми зі шпунтованих дощок завтовшки 40 мм.

Для прямого електропрогрівання використовують інвентарні електрощити. Електрощит становить раму з кутиків, усередині якої на сталевому листі товщиною 1 мм по шару тонкої ізоляції покладений нагрівальний сталевий або ніхромовий дріт. Зверху дріт ізольований листовим азбестом і шаром мінеральної вати товщиною 20–30 мм, захищеним листом дахового заліза. Під час прогрівання кілька таких щитів підключаються послідовно. Температуру бетону регулюють підключенням у коло різної кількості електрощитів.

Для прогрівання залізобетонних труб і кілець використовують циліндричні печі з нагрівальною спіраллю, намотаною на шматок азбоцементної труби.

**Електропрогрівання за допомогою термоактивного шару.** Конструкцію, що прогривається, вкривають шаром тирси, змоченої для підвищення електропровідності слабким розчином солі (3–5 %). У тирсу закладають електроди з круглої або смугової сталі й вмикають до мережі. Під час проходження струму тирса нагрівається й тепло передається конструкції. Для збільшення електропровідності тирси після засипання її злегка пресують. Температура тирси підтримується на рівні 80–90 °С. Необхідна потужність під час підйому температури – 7–8 кВт на 1 м<sup>3</sup> бетону, а витрата електроенергії на прогрівання такого самого обсягу бетону становить 120–160 кВт·год.

**Прогрівання за допомогою термоформ із нагрівальними елементами.** Під час електропрогрівання збірних залізобетонних виробів застосовують панелі зі струмопровідної гуми. Електропровідність такої гуми забезпечується за рахунок значного вмісту в ній сажі. Нагрівальні панелі мають середній струмопровідний шар товщиною 2 мм, у який забиті електроди з латунної сітки, або смуги, і два зовнішні шари зі звичайної гуми товщиною 0,5 мм.

Важливою перевагою цього способу є герметизація виробу в процесі його прогрівання, що унеможливорює випарювання вологи з бетону.

**Електропропарювання.** Парове середовище в пропарювальній камері створюється за допомогою електричних нагрівальних елементів – спіралей або електродів, установлених у нижній частині камери. Потужність нагрівальних пристроїв визначається з розрахунку 7–8 кВт на 1 м<sup>3</sup> виробів, що прогриваються. До нагрівачів подається мережева напруга. Для прискорення нагрівання виробу рекомендується застосовувати замість води 0,5 %-й розчин кухонної солі.

Спосіб електропропарювання залізобетонних виробів застосовують для виробів складної конфігурації.

**Електропрогрівання інфрачервоними променями.** Під час інфрачервоного прогрівання, на відміну від інших способів зовнішнього обігрівання бетону, забезпечується безпосередня передача теплової енергії від джерела випромінювання до виробу, що нагрівається. Як джерела інфрачервоного випромінювання використовують лампи розжарювання типу ЗН потужністю 300 і 500 Вт при напрузі 127 і 220 В. Застосовують також звичайні лампи розжарювання потужністю 200–500 Вт.

Потужність, необхідна для електропрогрівання бетону, яка є одним з основних факторів, що визначають вибір електрообладнання й розрахунок живильної мережі, залежить від поверхні конструкції, що прогривається,



температури прогрівання, температури зовнішнього повітря, початкової температури бетону, конструкції опалубки, ефективності утеплення й особливо від швидкості розігрівання бетону.

Джерелами живлення для електропрогрівання зазвичай слугують трансформатори. Під час електротермообробки бетону для підтримання заданого режиму застосовують трансформатори із східчастим регулюванням напруги, автотрансформатори й індукційні регулятори. Трансформатори обирають за потужністю та напругою.

Промисловістю випускається комплектна трансформаторна підстанція зовнішньої установки КТП-ОБ-63В1, призначена для електропрогрівання ґрунту й бетону. В КТП установлений трансформатор ТМОБ-63 номінальною потужністю 63 кВА.

Витрату електроенергії ( $W$ ) і необхідну потужності ( $P$ ) для електропрогрівання бетону орієнтовно розраховують за формулами:

$$W = W_{\text{пит}} \cdot V; \quad P = \rho \cdot V, \quad (7.3)$$

де  $W_{\text{пит}}$  – питома витрата електроенергії, кВт·год/м<sup>3</sup>;

$\rho$  – питома потужність на 1 м<sup>3</sup> бетону, кВт/м<sup>3</sup>;

$V$  – обсяг бетону, м<sup>3</sup>.

Питома витрата електроенергії  $W_{\text{пит}}$  (кВт·год/м<sup>3</sup>) під час прогрівання бетону різними способами:

- електродний спосіб – 80–120;
- індукційний спосіб – 120–150;
- інфрачервоний спосіб – 100–200.

Таблиця 7.3 – Питома потужність для електропрогрівання бетонних конструкцій, кВт/м<sup>3</sup>

Температура повітря, °С	Температура прогрівання, °С	
	40	80
0	7,7–9,3 / 15,6–18	8,3–10,4 / 16,2–19,2
-5... -30	8,2–10,1 / 16,1–18,9	8,7–11,2 / 16,6–20
	8,6–10,9 / 16,5–19,7	9,1–12 / 15–25

*Примітка.* До rischi вказані межі питомої потужності при швидкості підвищення температури під час нагрівання 10 °С/год, після rischi – 20 °С/год.

#### 7.4 Електропрогрівання ґрунту

Електропрогрівання ґрунтів застосовують у тих районах, де є вільна електрична потужність (наприклад поблизу потужних гідроелектростанцій).

Відомо кілька способів електропрогрівання ґрунтів, серед яких найбільш зручним, дешевим і безпечним є електродний спосіб із безпосереднім підключенням установок електропрогрівання до існуючих електромереж напругою до 380 В.

Електродний спосіб полягає в тому, що через ґрунт пропускають електричний струм напругою 220 або 380 В. Електропровідність ґрунту залежить від ступеня його вологості, стану й температури, наявності в ґрунті розчинів солей, кислот, від будови ґрунту та ін. Складність структури ґрунту й теплових фізичних процесів у ньому значно впливають на його електричний опір.

Поверхню ділянки ґрунту, що прогрівається, засипають на 15–25 см шаром тирси, змоченої водяним розчином солі (кухонної, хлористого кальцію) або соляної кислоти, які мають проводити струм і утеплювати ґрунт (навіть при напрузі 380 В струм практично не проходить через мерзлий ґрунт).

Під час електропрогрівання ґрунту горизонтальними електродами (рис. 7.7, а) тепло передається ґрунту головним чином від шару тирси, що нагрівається, а участь самого ґрунту в колі струму відносно невелика. Тільки незначний верхній шар ґрунту, що прилягає до електродів, включається до електричного кола і є опором, у якому виділяється тепло.

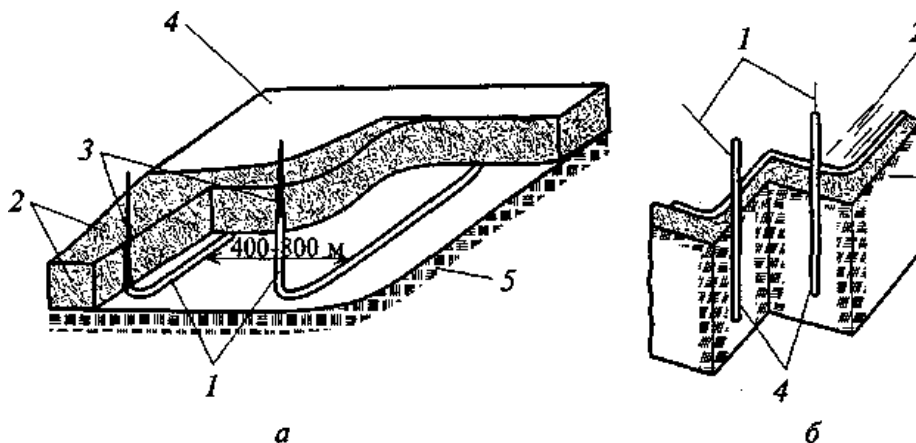


Рисунок 7.7 – Електропрогрівання ґрунту:

*а* – горизонтальними електродами: 1 – електроди; 2 – тирса, змочена розчином солі; 3 – підведення електроенергії; 4 – верхнє утеплення (толь, мати та ін.); 5 – ґрунт; *б* – вертикальними електродами: 1 – підведення електроенергії; 2 – тирса з утеплювачем; 3 – ґрунт; 4 – електроди

Горизонтальні електроди застосовують під час відігрівання ґрунту на невелику (до 0,5–0,7 м) глибину, а також у тих випадках, коли вертикальні електроди не застосовують внаслідок малої електропровідності ґрунту або неможливості забити їх у ґрунт, змішаний, наприклад, із щебенем.

Відігрівання вертикальними електродами (рис. 7.5, б) ефективніше й застосовується при глибині мерзлого ґрунту понад 0,7 м, а також у разі незначного контакту між горизонтальними електродами та ґрунтом. У жорсткі ґрунти (глинясті й піщані з вологістю понад 15–20 %) електроди забивають на глибину 20–25 см, а потім вони осідають у процесі відтавання ґрунту. У разі відтавання на глибину 1,5 м рекомендується мати два ком-

плекти електродів – коротких і довгих. Із відтаванням ґрунту короткі електроди замінюють на довгі. Відігрівання ґрунту на глибину 2 м і більше виконують ступенями, періодично видаляючи розмерзлі шари (при вимкненому струмі).

Якщо електроди вертикальні, ґрунт засипають тирсою, яка спочатку слугує збудником для прогрівання верхнього шару ґрунту. В міру відтавання шари ґрунту включаються до кола, після чого тирса тільки зменшує тепловтрати ґрунту. Замість тирси збудником можуть слугувати жолобки, пробиті зубилом між усіма електродами на глибину 6 см і залиті розчином солі. У разі покриття поверхні ґрунту, що відігривається, шаром сухої тирси, як показує практика, влаштування жолобів дає хороші результати.

Щоб зекономити електроенергію й максимально використати потужності, середня позитивна температура ґрунту, що прогрівається, не повинна перевищувати 2–5 °С, в окремих точках – 15–20 °С; прогрівання необхідно проводити ділянками, із перервами в живленні їх струмом.

Необхідна потужність і витрати енергії при температурі ґрунту 15 °С на кожний кубічний метр в середньому становлять 3,5 кВт при витраті електроенергії 30 кВт·год.

Останнім часом розроблено й впроваджено у виробництво в північних районах відігрівання ґрунту електроенергією напругою до 10 кВ.

Порівняно з напругою 380 В застосування для електропрогрівання мерзлого ґрунту електродів з напругою 10 кВ дає змогу прискорити проведення робіт і зменшити їхню вартість. Потрібна кількість електродів зменшується, а відстань між ними збільшується. Скорочується обсяг підготовчих робіт щодо занурення електродів у ґрунт. Основна кількість тепла виділяється біля електродів, інша частина ґрунту прогрівається до негативної температури, близької до 0 °С за допомогою теплової енергії, акумульованої біля електродів. Ґрунт прогрівається знизу вгору, у наслідок чого зменшуються втрати тепла в атмосферу. Прогрівання мерзлого ґрунту до температури -1,5 – -0,5 °С створює сприятливі умови для його розроблення землерийними механізмами, оскільки в разі повного відтавання ґрунт примерзає до ковша екскаватора або відвалу бульдозера. Крім того, зволожений ґрунт, вилучений у відвал, змерзається, що спричиняє додаткові витрати під час його завантаження в транспортні засоби або при зворотному засипанні.

## **Висновки**

Електроприймачі нагрівального устаткування широко використовуються на сучасних промислових підприємствах, у комунальному господарстві, в побуті.

Принцип їхньої роботи базується на перетворенні електричної енергії в теплову енергію.

Довгостроковий режим роботи електроприймачів нагрівального устаткування створює рівномірне навантаження з незначними коливаннями в часі.

Коефіцієнт потужності устаткування визначається способом отримання теплової енергії. Для устаткування нагрівання опором його значення близькі до одиниці, для устаткування індукційного нагрівання – низькі значення (0,3 – 0,4).

Поширеним є устаткування нагрівальними елементами якого є ТЕНи. Випускаються ТЕНи промислового й побутового призначення з широким класом потужностей і напруг живлення.

Застосування електронагрівального устаткування в будівництві (електропрогрівання бетону, ґрунту) забезпечує зменшення часу здійснення технологічних процесів, підвищення якості робіт.

### **Питання для самоперевірки**

1. Поясніть основні принципи роботи електронагрівального устаткування.
2. На які характерні групи поділяють електроприймачі електричного нагрівання?
3. Коротко охарактеризуйте нагрівальні елементи.
4. Поясніть принцип роботи й особливості електричних печей опору.
5. Охарактеризуйте електричні водонагрівачі.
6. Якою є сфера застосування електричного опалювання? Назвіть переваги та недоліки електричного опалювання.
7. За допомогою яких методів здійснюється електротермообробка бетону?
8. Охарактеризуйте електродний наскрізний і периферійний методи електротермообробки бетону.
9. Які електроди застосовують під час прогрівання бетону?
10. Охарактеризуйте індукційний метод електротермообробки бетону.
11. Які трансформатори застосовуються для електропрогрівання бетону?
12. Як змінюється опір бетону у процесі його твердіння? Яким чином підтримується значення струму прогрівання?
13. Як здійснюється вимірювання температури бетону під час електропрогрівання?
14. Як здійснюється прогрівання бетону електричними печами опору?
15. Поясніть особливості технології електропропарювання бетону.
16. У чому полягають особливості електропрогрівання бетону інфрачервоними променями?

### **Список рекомендованих джерел**

Основна література: [28, С. 348–356], [54, С. 151–201], [67].  
Додаткова література: [65], [13], [14].

## Розділ 8 ЕЛЕКТРООСВІТЛЮВАЛЬНЕ УСТАТКУВАННЯ

**Ключові поняття:** система загального (місцевого, комбінованого) освітлення, робоче (аварійне, евакуаційне) освітлення, сила світла, світловий потік, освітленість, світність, яскравість, ефективний потік випромінювання, світлова віддача, індекс передачі кольору, пульсація світлового потоку, колірна температура, джерело світла, лампа розжарювання, тіло розжарювання, галогенна лампа, газорозрядна лампа (люмінесцентна, ртутна, металогалогенна, натрієва, ксенонова), світлодіодна лампа, індукційна лампа.

### 8.1 Загальні відомості

Характерною і поширеною групою приймачів ЕЕ є освітлювальні прилади різноманітного призначення. Їхня основна функція – створення санітарно-гігієнічних умов виконання робіт, надання послуг в приміщеннях організацій і установ, комфортного проживання в житлових будівлях. Освітлювальне устаткування міст і населених пунктів також забезпечує виконання вимог нормального функціонування складових міської інфраструктури (транспорту, теплопостачання, водопостачання та водовідведення, навчальних закладів, торгівлі, закладів відпочинку тощо).

Особлива увага приділяється системам освітлення на промислових підприємствах. На підприємствах, які працюють у дві й три зміни, раціональна організація освітлення сприяє зростанню продуктивності праці у вечірні та нічні години до рівня продуктивності денних змін.

Протягом останніх років впроваджуються нові види світильників і джерел світла, застосовуються автоматичні пристрої для керування штучним освітленням залежно від природного освітлення, розробляються нові системи освітлення.

Для виробничих приміщень встановлено вісім розрядів робіт залежно від характеру зорової роботи. Якщо розмір деталей менше ніж 0,5 мм (відстань до ока 0,5 м), робота належить до розряду I, при більших розмірах – відповідно до розрядів II – VI (в останньому розряді розрізняються деталі понад 5 мм). До розряду VII відносять роботи, за яких освітленість необхідна для зменшення контрасту між деталями, що світяться, і фоном. Розряд VIII відноситься до робіт, які потребують лише загальне спостереження за виробничим процесом.

Важливими також є показники якості освітлення, які обмежують бляклість освітлювальних приладів: показник осліпленості для виробничих приміщень і відкритого простору та показник дискомфорту для громадсько-адміністративних будівель. Показник осліпленості не повинен перевищувати 20 одиниць для I та II розрядів робіт у разі постійної присутності людей у приміщенні; 40 – для III, IV, V, VII розрядів при постійній присутності і 60 – при періодичній; 60 – для VI та VIII розрядів при постійній присутності і 80 – при періодичній. Щодо показника дискомфорту, то для

більшої частини приміщень муніципальних будівель він не повинен перевищувати значення 40 – 60.

Джерела світла як приймачі ЕЕ, – це прилади, що перетворюють електричну енергію на енергію випромінювання з такими частотами оптичної області спектра електромагнітних випромінювань: невидимих ультрафіолетових випромінювань (довжина хвиль 10–400 нм); видимих світлових випромінювань (довжина хвиль 400–750 нм), що сприймаються оком як світло; невидимих інфрачервоних (теплових) випромінювань (довжина хвиль від 750 нм до 540 мкм).

Залежно від способу перетворення енергії в оптичне випромінювання джерела світла поділяють на:

- джерела теплового випромінювання (лампи розжарювання);
- газорозрядні джерела низького, високого та надвисокого тиску (люмінесцентні лампи, лампи ДРЛ, ДРІ, ДНаТ та ін.);
- джерела змішаного (теплового та газорозрядного) випромінювання (лампи ДРВ, ДРВЕД та ін.);
- джерела люмінесцюючої дії.

Класифікація світлових приладів і джерел світла детально розглянута в [34, 16, 22].

В якості джерел світла традиційно використовують лампи розжарювання і газорозрядні лампи. Останнім часом усе більшого поширення набувають енергоефективні, зокрема світлодіодні та індукційні джерела світла.

**8.1.1 Системи та види освітлення.** З погляду способу розміщення світильників розрізняють [22] системи загального й комбінованого освітлення.

*Системи загального освітлення* призначені для освітлення всього приміщення разом із робочими поверхнями. Загальне освітлення може бути *рівномірним* і *локалізованим*. Світильники загального освітлення розташовують у верхній зоні приміщення й кріплять їх на будівельних основах будинку безпосередньо до стелі, на фермах, на стінах, колонах або на технологічному виробничому устаткуванні, на тросах тощо.

*Загальне рівномірне освітлення* створюється для рівномірної освітленості по всій площі приміщення. Освітлення з рівномірним розміщенням світильників застосовується у виробничих приміщеннях, у яких технологічне устаткування розташоване рівномірно по всій площі з однаковими умовами зорової роботи або в приміщеннях громадського чи адміністративного призначення.

*Загальне локалізоване освітлення* передбачається у випадках, коли на різних ділянках виконуються роботи, що потребують різної освітленості, або коли робочі місця в приміщенні зосереджені групами й необхідно створити певні напрями світлового потоку.

Переваги локалізованого освітлення перед загальним рівномірним полягають у зменшенні потужності освітлювальних установок, можливості

створити необхідний напрям світлового потоку, уникнути на робочих місцях тіней від робітників та від виробничого устаткування.

**Місцеве освітлення** передбачається на робочих місцях для збільшення їхньої освітленості. Зазначимо, що місцеве освітлення застосовується як доповнення до системи загального освітлення. Застосовувати у приміщеннях тільки місцеве освітлення нормами заборонено.

Місцеве ремонтне освітлення виконується переносними світильниками, які підключаються через знижувальний трансформатор на безпечній напрузі 12, 24, 42 В залежно від категорії приміщення щодо безпеки обслуговуючого персоналу.

**Комбіноване освітлення** – одночасне використання місцевого й загального освітлення. Застосовується в приміщеннях де виконуються зорові роботи, що потребують значної освітленості. За такої системи світильники місцевого освітлення забезпечують освітленість тільки робочих місць, а світильники загального освітлення – усього приміщення, робочих місць і головним чином проходи й проїзди.

У системі комбінованого освітлення лампи місцевого освітлення вмикаються тільки на час виконання робіт безпосередньо на робочому місці, що забезпечує зменшення загального споживання ЕЕ.

За **функціональним призначенням освітлення** поділяють на *робоче, аварійне, охоронне й чергове*. Аварійне освітлення може бути освітленням безпеки й евакуаційним.

**Робоче освітлення** – це освітлення, що забезпечує нормовані умови освітленості (освітленість, якість освітлення) у приміщеннях і в місцях провадження робіт поза будинками.

Робоче освітлення виконується для всіх приміщень будинків, а також ділянок відкритих просторів, призначених для роботи, проходу людей і руху транспорту. Світильники робочого освітлення включаються, як правило, на напругу 220 В.

Нормовані характеристики освітлення в приміщеннях, зовні будинків можуть забезпечуватися як світильниками робочого освітлення, так і спільною дією з ними світильників освітлення безпеки й евакуаційного освітлення. У разі необхідності частину світильників робочого або аварійного освітлення можна використати для чергового освітлення.

**Аварійне освітлення** – це освітлення, що використовується для продовження роботи при аварійному відключенні робочого освітлення. Такий вид освітлення передбачається у випадках, коли відключення робочого освітлення і спричинене цим порушення обслуговування обладнання й механізмів може призвести до вибухів, пожеж, отруєння людей тощо.

**Аварійне евакуаційне освітлення** – це освітлення, яке забезпечує евакуацію людей із приміщень у разі аварійного відключення робочого освітлення. Евакуаційне освітлення передбачається в приміщеннях або в місцях провадження робіт поза будинками у таких випадках:

- у місцях, небезпечних для проходження людей;

- у проходах і на сходах, що використовуються для евакуації людей, якщо кількість евакуйованих понад 50 осіб;
- в основних проходах виробничих приміщень, у яких працює понад 50 осіб;
- у приміщеннях суспільних, адміністративних і побутових будинків промислових підприємств, якщо в приміщеннях можуть одночасно перебувати більше 100 чел.;
- у виробничих приміщеннях без природного освітлення тощо.

**Охоронне освітлення** призначене для забезпечення чергування протипожежної та воєнізованої охорон, передбачається уздовж меж територій, охоронюваних у нічний час.

**Черговим освітленням** називається освітлення, що використовується в неробочий час. Сфера застосування, величини освітленості, рівномірність і вимоги щодо якості для чергового освітлення не нормуються.

**8.1.2 Основні світлові величини.** У Міжнародній системі одиниць (SI) основною світловою величиною вважається **сила світла** (позначається латинською буквою  $I$ ). Одиниця виміру сили світла – *кандела* (скорочено – кд).

**Сила світла** – просторова щільність світлового потоку, яка чисельно дорівнює відношенню потоку випромінювання  $\Phi$  до тілесного кута  $\omega$ , в якому він випромінюється

$$I = \Phi/\omega. \quad (8.1)$$

**Світловий потік** ( $\Phi$ ) – частина потужності променевої енергії (променевого потоку), що сприймається оком людини як світлове відчуття.

Одиниця виміру світлового потоку – люмен (лм). Один люмен відповідає світловому потоку, що випромінюється в одиничному тілесному куті (стерадіан) точковим джерелом із силою світла одна кандела.

**Тілесний (просторовий) кут** ( $\omega$ ) – частина простору, обмежена конусною поверхнею. Величина тілесного кута визначається як відношення площі ділянки сфери  $S$ , на яку спирається кут, до квадрату радіуса  $R$  сфери

$$\omega = S/R^2. \quad (8.2)$$

Одиниця виміру тілесного кута – стерадіан (ср).

**Потужність променевої енергії (променевий потік)** – кількість енергії, що випромінюється за одиницю часу. Одиницею променевого потоку є ват (Вт).

Променева енергія поширюється з довжинами хвиль в діапазоні від десятків нанометрів до кілометрів. Орган зору людини сприймає тільки незначну частину діапазону в межах довжини хвиль 0,38–0,77 мкм.

Достатність освітлення на тій або іншій площині або в тій або іншій точці визначається величиною **освітленості**: позначається латинською буквою  $E$ , одиниця виміру освітленості – люкс (лк).



Світловий потік, що падає на деяку поверхню, освітлює її. Для кількісного оцінювання щільності світлового потоку на поверхні освітлення застосовують поняття «освітленість».

**Освітленість** ( $E$ ) – це щільність світлового потоку на поверхні освітлення, тобто відношення світлового потоку  $\Phi$  до площі освітлюваної поверхні  $S$  за умови його рівномірного розподілу:

$$E = \Phi/S. \quad (8.3)$$

Якщо світловий потік в 1 лм рівномірно розподілений на одиниці площі поверхні  $1 \text{ м}^2$ , за одиницю освітленості  $E$  приймають 1 люкс (лк). Освітленість поверхні не залежить від її світлових властивостей.

**Світність** ( $R$ ) – оптична характеристика поверхневої інтенсивності світлового потоку, випромінюваного з даної точки поверхні тіла. Світність визначається як відношення світлового потоку, що надходить від малого елемента поверхні, у якому міститься ця точка, до площі цього елемента

$$R = d\Phi/dS. \quad (8.4)$$

Одиницею світності в Міжнародній системі одиниць (SI) є люмен на квадратний метр ( $\text{лм}/\text{м}^2$ ).

**Яскравість** ( $L$ ) – відношення сили світла, що випромінюється елементом поверхні в даному напрямі, до площі поверхні, що світиться:

$$L = \frac{I}{S \cos \alpha}, \quad (8.5)$$

де  $I$  – сила світла, що випромінюється поверхнею у заданому напрямі;

$\alpha$  – кут між нормаллю до елемента поверхні  $S$  і напрямом, для якого визначається яскравість.

Одиниця вимірювання яскравості –  $\text{кд}/\text{м}^2$ .

**8.1.3 Параметри джерел світла.** Дослідження джерел світла як приймачів ЕЕ потребує першочергового розгляду їхніх параметрів. Розрізняють електротехнічні, світлотехнічні, енергетичні і експлуатаційні параметри та показники джерел світла.

До **електротехнічних параметрів** належать номінальні потужність, напруга, струм і коефіцієнт потужності.

До **світлотехнічних параметрів** відносять: ефективний потік випромінювання лампи, світловіддачу лампи, спектральний склад випромінювання лампи, пульсації світлового потоку.

**Ефективний потік випромінювання** – це потужність випромінювання, оцінена за рівнем реакції на нього приймача енергії випромінювання (наприклад реакція ока на світло).

**Світлова віддача лампи** характеризує ефективність використання лампи й визначається як відношення світлового потоку лампи  $\Phi$  до її потужності  $P$

$$H = \Phi/P, \text{ лм}/\text{Вт}. \quad (8.6)$$

**Спектральний склад** випромінювання лампи – сукупність усіх діапазонів частот світлових хвиль. На рисунку 8.1 наведено частоти видимого спектру сонячного світла.

**Індекс передачі кольору** (англ. colour rendering index, CRI або Ra) – параметр, що характеризує ступінь відповідності природного кольору предмета до кольору цього предмета, що сприймається під час освітлення його джерелом світла. Індекс передачі кольору показує ступінь натуральності предметів у світлі лампи. Діапазон індексу коливається від 0 до 100, де 100 Ra – передача кольору при сонячному світлі. При значеннях Ra > 90 передача кольору вважається дуже доброю, 80–90 – доброю, 51–80 – середньою, Ra < 51 – слабкою.

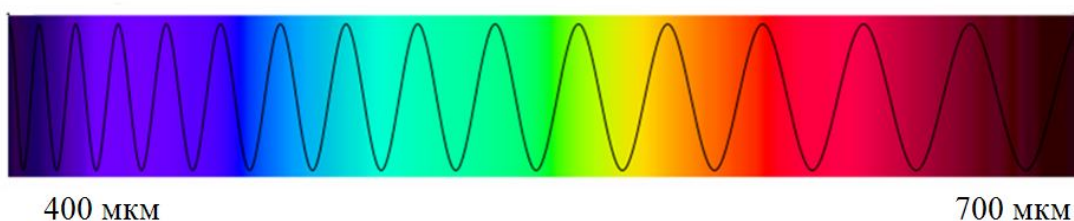


Рисунок 8.1 – Видимий спектр сонячного світла

**Пульсації світлового потоку** оцінюються коефіцієнтом пульсації освітленості  $K_n$  який розраховується за виразом

$$K_n = \frac{E_{\max} - E_{\min}}{2 \cdot E_{\text{cp}}} 100 \% , \quad (8.7)$$

де  $E_{\max}$ ,  $E_{\min}$  – максимальна та мінімальна освітленість за період її коливання, лк;

$E_{\text{cp}}$  – середнє значення освітленості за цей же період, лк.

Чисельні значення коефіцієнта пульсації становлять: для ламп розжарювання – 7 %; для галогенних ламп розжарювання – 1 %; для газорозрядних ламп – 25–65 %.

**Колірна температура** – характеристика спектрального складу випромінювання джерела світла. Колірна температура визначає колір предметів, який відчуває людське око при спостереженні в світлі даного джерела. Вимірюється у Кельвінах (К). Розрізняють такі групи світла за колірною температурою: 2 700 К – надтепле біле; 3 000 К – тепле біле; 4 000К – природне біле; понад 5 000 К – холодне біле (денне).

Значення колірної температури для деяких джерел світла подані в таблиці 8.1.

До **енергетичних показників** належать енергетичний ККД лампи  $\eta_{\text{ен.л}}$  та ефективний ККД потоку випромінювання лампи  $\eta_{\text{еф.л}}$ :

$$\eta_{\text{ен.л}} = \Phi_{\text{п.л}} / P_{\text{л}} , \quad (8.8)$$

$$\eta_{\text{еф.л}} = \Phi_{\text{еф.л}} / \Phi_{\text{п.л}} , \quad (8.9)$$

де  $\Phi_{\text{п.л}}$  – повний потік випромінювання лампи;

$\Phi_{\text{еф.л}}$  – ефективний потік випромінювання лампи;

$P_{\text{л}}$  – потужність лампи.

Таблиця 8.1 – Колірна температура деяких джерел світла

Джерело світла	Колірна температура, К
1. Натрієва лампа високого тиску	2 000
2. Лампа розжарювання	2 200 – 2 800
3. Галогенні лампи	2 800 – 2 854
4. Люмінесцентні лампи	3 000 – 4 000
5. Пряме денне сонячне світло	5 000
6. Люмінесцентні лампи денного світла	5 600 – 7 000

До *експлуатаційних показників* відносять: надійність, залежність основних параметрів лампи від відхилень напруги мережі, корисний строк служби, середню тривалість роботи до зміни одного з параметрів лампи понад припустимі стандартами межі.

Надійність – це здатність джерела світла виконувати всі задані функції за певних умов експлуатації протягом визначеного періоду при збереженні його основних параметрів у встановлених межах.

Надійність характеризується низкою показників: безвідмовність, довговічність і т. д. Для джерел світла найважливішим показником надійності є різновиди строку служби.

Під *повним строком служби* ( $\tau_{\text{повн}}$ ) розуміють час горіння від початку експлуатації до моменту повної втрати працездатності (для теплових джерел світла – це час до перегорання тіла розжарювання; для розрядних ламп – час до втрати здатності запалювання).

*Корисний строк служби* ( $\tau_{\text{кор}}$ ) – це час від початку експлуатації до моменту відхилення одного з параметрів за встановлену межу, що призводить до недоцільності використання лампи.

**8.1.4 Конструктивні особливості джерел світла.** Основними конструктивними елементами джерел світла є цоколь і колба лампи. Розглянемо особливості цих елементів.

**Цоколь лампи** є конструктивним елементом, який забезпечує розміщення лампи в патроні і її живлення за допомогою струмових контактів. Випускають металічні, керамічні та пластмасові цоколі.

Існує багато видів цоколів, основними з яких є дві групи – різьбові та штиркові.

Система позначення цоколя включає декілька елементів [15]. Перша літера вказує на тип цоколя: Е – різьбовий цоколь (цоколь Едісона); G – штировий цоколь; R – цоколь з утопленим контактом; P – фокусувальний цоколь; В – штифтовий цоколь (байонет); S – софітний цоколь; Т – телефонний цоколь; Н – цоколь для ксенонових ламп.

Якщо до першої букви додається друга буква, то вона уточнює тип лампи: U – енергозберігаюча; V – цоколь з конічним кінцем; А – автомобільна лампа.

Цифри після букв позначають діаметр з'єднувальної частини цоколя або відстань між контактами.

Якщо далі зазначені букви, вони вказують на кількість контактних пластин, штирів або гнучких з'єднань: s – один контакт; d – два контакти; t – три контакти; q – чотири контакти.

Наприклад, цоколь лампи E14U означає, що лампа енергозберігаюча з цоколем діаметром 14 мм.

В Україні, як і в країнах Європи, побутові лампи мають різьбовий цоколь Едісона трьох стандартних розмірів: E14 (діаметр різьбового з'єднання 14 мм), E27 і E40. У США й Канаді використовують лампи з цоколем E12, E17, E26, E39.

Приклади поширених типів лампових цоколів наведені на рисунку 8.2.



Рисунок 8.2 – Різновиди лампових цоколів

**Колба лампи** захищає джерело світла від зовнішнього впливу. Її розміри та конструкція визначаються особливостями фізичних процесів перетворення ЕЕ в світлову енергію. У лампи розжарювання це скляна посудина з вакуумом або інертним газом, де розміщене тіло розжарювання – вольфрамова нитка на скляній ніжці. Для лінійної газорозрядної лампи – це скляна трубка, покрита зсередини люмінофором і заповнена інертним газом.

Колба світлодіодної лампи складається з двох частин – тепловідведення, де вмонтований драйвер (перетворювач струму) і розсіювача, який рівномірно розподіляє світло від світлодіодів.

У лампах розжарювання колба захищає тіло розжарювання від впливу атмосферних газів. Її розміри визначаються швидкістю осідання матеріалу тіла розжарювання. Лампи малої потужності (до 25 Вт) виготовляють із вакуумною колбою. Колби більш потужних ламп наповняють хімічно інертними газами (азотом, аргоном, зрідка – криптоном). Підвищений тиск у колбі газонаповнених ламп зменшує швидкість випарування вольфрамової нитки. Що не тільки збільшує термін служби лампи, але й дозволяє підвищити температуру тіла розжарювання. У результаті підвищується світловий ККД лампи, а спектр випромінювання наближається до білого. У процесі роботи внутрішня поверхня колби газонаповненої лампи при розпиленні матеріалу тіла розжарювання темніє повільніше, ніж у вакуумній лампі.

За формою колби лампи бувають кулеподібними, циліндричними, трубчастими тощо. Саму колбу виготовляють прозорою, із дзеркальним

або матовим покриттям. На рисунку 8.3 показано поширені типи форми колб і їхнє маркування.

Колба типу А (Arbitrary, стандартна, звичайна, грушоподібна) застосовується в лампах розжарювання. Цифра поряд із буквою А означає діаметр лампи в міліметрах (наприклад А60).

Колби типів В, С і F використовують в люстрах і декоративних світильниках. Цифра біля букви позначає діаметр лампи (наприклад С37).



Рисунок 8.3 – Поширені типи лампових колб

Колби типу G забезпечують більший радіус освітлення за рахунок меншого світлового потоку і більших розмірів.

Колби типу R (Reflector, відбивач) застосовуються для концентрованого освітлення, а також у світильниках, що вбудовуються в натяжну або підвісну стелю. Найпоширеніші варіанти – R39, R50, R63. Цифра позначає діаметр колби у міліметрах.

Колби типу MR (багатофасетний рефлектор – відбивач, що має багато плоских поверхонь) точкового освітлення. Основні відмінності від колби типу R: трохи відмінна форма колби і її розміри, інший цоколь (штировий замість гвинтового), можливість використання низьковольтних ламп (12/24В).

Колби типу T використовуються в лампах денного світла та лампах світлодіодного освітлення.

**8.1.5 Маркування джерел світла.** У даний час існує багато стандартів і норм маркування джерел світла. Приміром, виробники країн європейської спільноти на упаковках джерел світла й інших споживачів ЕЕ обов'язково наносять літерний знак класу ефективності (рис. 8.4). Для джерел світла прийнята семилітерна шкала (А, В, С, D, Е, F): найбільша ефективність – літера А, найменша – літера G.

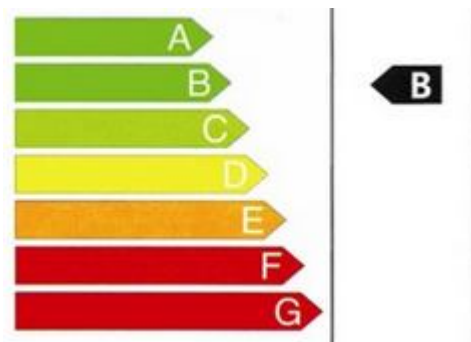


Рисунок 8.4 – Літерне маркування енергоефективності

У таблиці 8.2 наведені умовні позначення джерел світла, встановлені згідно з ГОСТ 17677-82 [10].

Таблиця 8.2 – Маркування джерел світла

Тип джерела світла	Маркування
Лампи розжарювання загального призначення	Н
Лампи-світильники (рефлекторні й дифузійні)	С
Лампи кварцові галогенні (розжарювання)	И
Лампи лінійні люмінесцентні	Л
Лампи фігурні люмінесцентні	Ф
Лампи еритемні люмінесцентні	Э
Лампи ртутні типу ДРЛ	Р
Лампи ртутні типу ДРИ, ДРИШ	Г
Лампи натрієві типу ДнаТ	Ж
Лампи бактерицидні	Б
Лампи ксенонові трубчасті	К

## 8.2 Лампи розжарювання

**8.2.1 Загальні відомості.** Лампи розжарювання – це джерела світла, у яких тіло розжарювання випускає світловий потік внаслідок нагрівання електричним струмом до високої температури. Як тіло розжарювання використовується спіраль з тугоплавкого металу (вольфраму), або вугільна нитка. Щоб виключити окислювання тіла розжарювання під час контакту з повітрям та збільшити термін служби вольфрамової нитки, її розміщують у колбі з вакуумом або заповненій інертним газом (аргон, ксенон, криптон) чи парама галогенів.

У даний час існує багато різновидів ламп розжарювання: вакуумні, аргонові, криптонові (приблизно на 10 % яскравіші за аргонові), ксенонові (у 2 рази яскравіші за аргонові), галогенні, ксенон-галогенні (до трьох разів яскравіші за аргонові); ксенон-галогенні з відбивачем інфрачервоного

випромінювання; лампи розжарювання з покриттям, що перетворює інфрачервоне випромінювання на видимий діапазон.

Лампи розжарювання класифікують за такими ознаками:

– за призначенням (загального призначення, прожекторні, автомобільні тощо);

– за формою тіла розжарювання (лампи розжарювання з плоскою спіраллю, біспіраллю та ін.);

– за формою і світлотехнічними властивостями колби лампи (дзеркальні, декоративні, з розсіюючим покриттям тощо);

– за габаритними розмірами розрізняють надмініатюрні, мініатюрні, малогабаритні, нормальні й великогабаритні лампи розжарювання.

Конструкції ламп розжарювання досить різноманітні й залежать від призначення. Характерними конструктивними елементами лампи є цоколь, колба й тіло розжарювання (рис. 8.5).

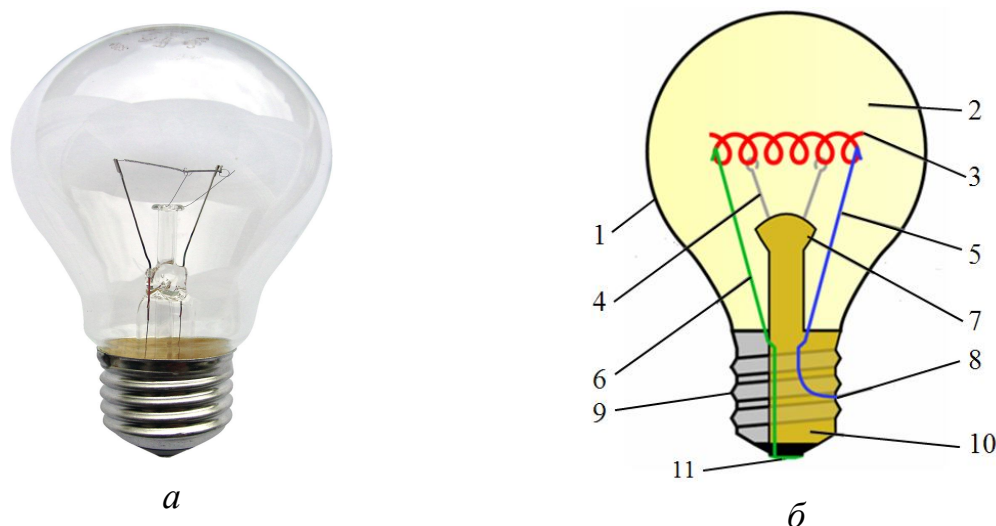


Рисунок 8.5 – Лампа розжарювання загального призначення [57]: а – зовнішній вигляд; б – конструкція; 1 – скляна колба; 2 – вакуум або інертний газ; 3 – нитка розжарювання; 4 – утримувач нитки розжарювання; 5 і 6 – контактні проводи; 7 – скляна ніжка; 8 – вивід контакту на цоколь; 9 – цоколь лампи; 10 – ізолятор цоколя (скло); 11 – контакт денця цоколя

**Тіло розжарювання.** Частину споживаної електричної енергії лампа розжарювання перетворює на видиме випромінювання, частина розсіюється у вигляді тепла. Тільки 10–15 % випромінювання вольфрамової нитки належить до області видимого світла, основна частка припадає на інфрачервоне випромінювання. Щоб підвищити ККД лампи й одержати максимально «біле» світло необхідно підвищувати температуру нитки розжарювання, яка обмежена властивістю матеріалу нитки – температурою плавлення. У сучасних лампах розжарювання застосовують матеріали з максимальними температурами плавлення – вольфрам (температура плавлення 3 400 °С), реній (температура плавлення та сама, але він міцніший при граничних температурах) і, зрідка, осмій (температура плавлення 3 045 °С).

Щоб уникнути інтенсивного випарювання нитки розжарювання, її температуру знижують до 2 300–2 800 °С. Для цих температур світлова віддача ламп коливається від 6 лм/Вт для ламп малої потужності до 20 лм/Вт для ламп великої потужності.

Під час експлуатації має місце поступове випаровування вольфраму нитки розжарювання і, як наслідок, збільшення її електричного опору та зменшення струму, і, відповідно, температури розжарювання нитки та світлового потоку.

Виготовляються лампи розжарювання на всі стандартні напруги до 220 В потужністю до 1 000 Вт.

Лампи розжарювання дуже чутливі до коливання напруги в мережі. У разі збільшення напруги на 5 % від номінальної термін їхньої служби зменшується з 1 000 до 400 годин, а при зменшенні напруги на 5 % світловий потік зменшується до 82 %, а строк служби підвищується до 2–2,5 тис. годин. Щоб зменшити теплові втрати й збільшити світловіддачу ламп, у них зазвичай використовують біспіральні нитки розжарювання (вольфрамова нитка розжарювання сплітається в спіраль два рази). При цьому при тому ж світловому потоці зменшується потужність, що споживається з мережі, тобто забезпечується реальна економія електроенергії.

За функціональним призначенням найбільш поширеними є лампи розжарювання загального призначення. Їх застосовують для зовнішнього та внутрішнього, а також для декоративного освітлення в побутових і промислових приміщеннях.

Геометричні розміри ламп залежать від їхньої потужності й наповнення. Цоколь лампи розжарювання випускають трьох розмірів: E14 – 14 мм, E27 – 27 мм (для ламп потужністю 25–250 Вт) і E40 – 40 мм (для ламп потужністю > 300 Вт).

**Маркування ламп розжарювання** [10]. Перша літерна частина вказує на особливості конструкції та фізичні властивості лампи (Б – аргонна біспіральна, В – вакуумна, Г – газонаповнена аргонна моноспіральна, БК – біспіральна криптонова, МЛ – у колбі молочного кольору, МТ – матова колба, О – опалова колба). Друга літерна частина позначає призначення лампи (Ж – залізнично-дорожня, СМ – для літаків, КМ – комутаційна, А – автомобільна, ПЖ – прожекторна). Перша цифрова частина – номінальна напруга й потужність. Друга цифрова частина – номер доопрацювання. Наприклад, маркування B220-230-100-1 означає, що це аргонна біспіральна лампа, напруга живлення 220–230 В, потужність 100 Вт, перша серія доопрацювання.

У таблиці 8.3 як приклад наведені параметри деяких ламп розжарювання загального призначення.



Таблиця 8.3 – Параметри ламп розжарювання загального призначення

Тип лампи	U, В	P, Вт	Світловий потік, Лм	Тип цоколя
Б 220-230-25-1	225	25	200	E27
Б 220-230-60-1	225	60	730	E27
Б 220-230-75-1	225	75	960	E27
Б 220-230-100-1	225	100	1 380	E27
Б 220-235-40-2	230	40	335	E27
Б 220-235-60-2	230	60	655	E27
Б 220-235-100-2	230	100	1 203	E27
Б 230-245-150-1	240	150	2 180	E27
РН 220-230-15-4	225	15	90	E14
РН 220-230-200-1	225	200	2 950	E27
РН 220-240-300	235	300	4 800	E40
РН 215-225-500	220	500	8 400	E40

**Переваги ламп розжарювання** зумовлюють тривалість і масовість їхнього застосування. До переваг належать відносно низька вартість, зручність в обігу, відсутність пускорегулюючої апаратури, досить низький коефіцієнт пульсацій світлового потоку ( $K_p = 5-19\%$ ), відсутність стробоскопічного ефекту, простота в обслуговуванні, малі початкові витрати під час встановлення освітлювального устаткування, різноманітність конструкцій, напруг і потужностей, високий рівень механізації виробництва.

**Недоліки ламп розжарювання:** висока кратність пускового струму, низька світловіддача (10–20 лм/Вт), обмежений термін служби (1 000 год), спектр переважно жовто-червоного випромінювання, висока залежність світлового потоку і строку служби від напруги, висока температура колби лампи ( $> 100\text{ }^\circ\text{C}$ ) потребує протипожежної уваги, низьке значення ККД (4–7 %).

**Різновиди ламп розжарювання.** Лампи розжарювання із дзеркальним відбиваючим покриттям застосовуються для зовнішнього освітлення, у високих виробничих приміщеннях, для підсвічування архітектурних елементів.

Декоративні лампи розжарювання застосовують для загального, місцевого й декоративного освітлення житлових і громадських приміщень.

Ілюмінаційні лампи розжарювання застосовують для святкового освітлення вулиць та майданів, для декоративного підсвічування вітрин.

Лампи розжарювання спеціального призначення застосовують у сигнальних вогнях аеродромів, на маяках.

Лампи з матованими колбами застосовують у випадках, коли освітлення блискучих поверхонь дає осліплюючі відблиски.

**8.2.2 Галогенні лампи розжарювання.** Це нове, покращене покоління ламп розжарювання (рис. 8.6). Вони містять у газі-наповнювачі домішки галогенів (фтору, хлору, броду та йоду). Колба галогенної лампи виготовляється з тугоплавкого кварцового скла, яке більш стійке до високої температури і хімічного впливу. Розмір колби галогенної лампи значно менший порівняно з лампою розжарювання, що дозволяє збільшувати тиск у лампі. Збільшення тиску й домішки галогенів дозволяють підвищити температуру спіралі. Унаслідок цього збільшується світлова віддача й термін служби галогенної лампи.

Галогенні лампи компактні, довговічні й економічні. Вони дають яскраве, насичене й рівномірне світло, спектр якого наближається до спектру сонця. Індекс передачі кольору  $Ra = 100$ . Також випускаються галогенні лампи з покриттям, що відбиває інфрачервоне випромінювання, вони характеризуються підвищеною світловою віддачею.

Галогенні лампи виготовляють на напругу 6, 12, 24, 110, 240 В і потужності до 20 кВт. Вони мають світловіддачу 20–30 лм/Вт, термін їхньої служби досягає 2 000–3 500 год, тому вони конкурують з газорозрядними потужними лампами (ксеноновими), особливо при освітленні великих площ.

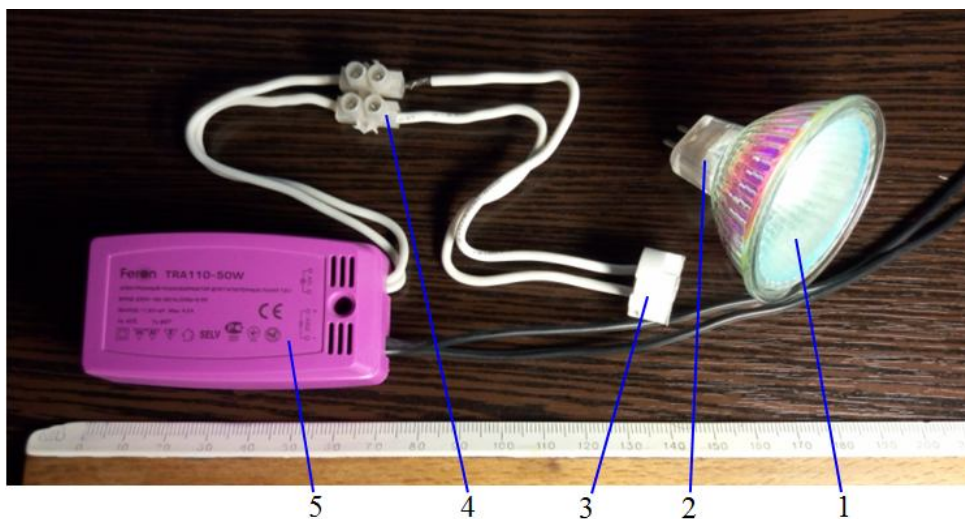


Рисунок 8.6 – Галогенна лампа 12 В, 35 Вт:  
1 – лампа; 2 – цоколь лампи; 3 – вилка; 4 – клемник;  
5 – трансформатор 220/12 В, 50 Вт

- Переваги галогенних ламп порівняно з лампами розжарювання:
- підвищена світловіддача;
  - більший термін служби;
  - біле світло з колірною температурою до 3 200 К і відмінною кольоропередачею;
  - стабільність світлового потоку протягом усього терміну служби;
  - малі розміри;
  - можливість регулювання яскравості.

Недоліками галогенних ламп є чутливість до перепадів напруги мережі та до жирових забруднень колби.

### 8.3 Газорозрядні лампи

На відміну від ламп розжарювання, функціонування яких базується на принципі теплового випромінювання, газорозрядні лампи засновані на явищі люмінесценції речовини, яке виникає в разі дії на неї електричної або променевої енергії. Джерелом світла в газорозрядних лампах є електричний розряд в середовищі розрідженого газу. Залежно від типу інертного газу газорозрядні лампи поділяють на ртутні, металогалогенні, натрієві й ксенонові.

У свою чергу ртутні лампи, як різновид газорозрядних, становлять джерело світла, у якому для генерації оптичного випромінювання використовується газовий розряд у парах ртуті. Залежно від тиску наповнення розрізняють ртутні лампи низького тиску (РЛНД, величина парціального тиску менше 100 Па), високого тиску (РЛВД, величина парціального тиску 100 кПа) і надвисокого тиску (РЛСВД, величина парціального тиску більше 1 МПа).

Газорозрядні джерела світла мають наступні особливості: їх включають у мережу через пускорегулювальний пристрій (надалі – ПРП) і (за винятком ксенонових ламп) через баластний опір (активний, індуктивний чи ємнісний); викликають в мережі коливання високої частоти, що створює радіоперешкоди; чутливі до зниження напруги. Зниження напруги до 90 % від номінальної може призвести до згасання ламп, при цьому повторне запалення (за винятком трубчастих люмінесцентних ламп) має місце через 8–10 хвилин після відновлення напруги; світловий потік дугових ламп змінного струму коливається з подвійною частотою, що призводить до коливань освітленості та спричиняє стробоскопічний ефект.

Головною перевагою газорозрядних ламп порівняно з лампами розжарювання є більша світловіддача (у 4–5 разів, 70–100 лм/Вт).

**8.3.1 Люмінесцентні лампи.** *Люмінесцентна лампа* низького тиску (1–1,5 Па), становить довгу (порядку 450–1 500 мм) скляну трубку з двома цоколями на кінцях, заповнену розрідженим газом – аргоном і невеликою кількістю парів ртуті (рис. 8.7). На внутрішню поверхню трубки нанесений шар спеціального складу – люмінофора. У цоколь лампи впаяні вольфрамові електроди. Під час вмикання лампи в електричну мережу між її електродами в парах ртуті у трубці виникає газовий розряд і невидиме ультрафіолетове випромінювання, під впливом якого люмінофор починає світитися – дає яскраве видиме світло.

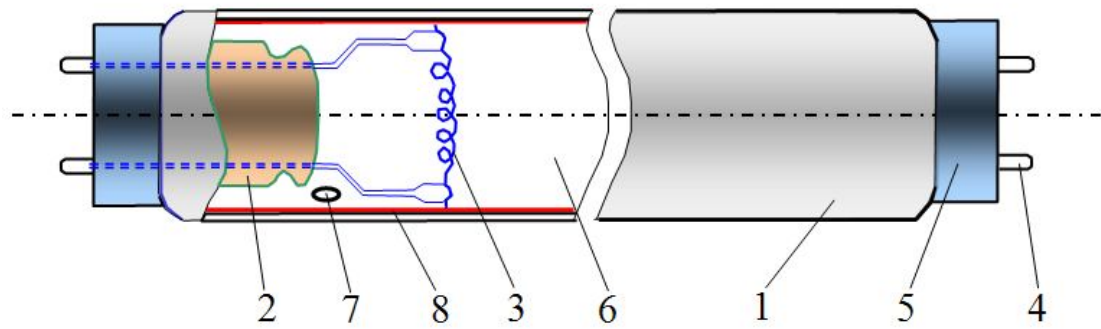


Рисунок 8.7 – Будова люмінесцентної лампи:

1 – колба; 2 – скляна ніжка; 3 – електроди; 4 – контактні штирі;  
5 – цоколь; 6 – інертний газ; 7 – крапля ртуті; 8 – люмінофор

Принцип дії люмінесцентної лампи заснований на дуговому розряді в парах ртуті низького тиску. Ультрафіолетове випромінювання дугового розряду перетворюється на видиме в шарі люмінофора, що вкриває внутрішні стінки лампи. Лампи являють собою довгі скляні трубки, у торці яких упаяні ніжки, з двома електродами, між якими розміщується катод у вигляді спіралі. У трубку лампи введено пари ртуті й інертний газ, головним чином аргон. Призначенням інертних газів є забезпечення надійного загорання лампи й зменшення розпилення катодів. На внутрішню поверхню трубки нанесено шар люмінофора, який забезпечує різнокольоровість випромінювання лампи, а саме:

- лампи ЛХБ – холодно-білого кольору з колірною температурою 4 800 К, що відповідає колірній температурі денного неба, укритего тонким шаром білих хмар;
- лампи ЛБ – білого кольору з колірною температурою 4 200 К, що відповідає колірній температурі яскравого сонячного дня;
- лампи ЛТБ – тепло-білого кольору з колірною температурою 2 800 К, що відповідає кольоровості випромінювання ламп розжарювання;
- лампи ЛД – денного світла;
- лампи ЛДЦ – денного світла з покращеною передачею кольору.

Люмінесцентні лампи випускають потужністю від 8 до 200 Вт, найпоширеніші лампи потужністю 20, 40 і 80 Вт.

Лампи ЛД, ЛДЦ, ЛХБ рекомендують використовувати в приміщеннях, де за виробничими умовами необхідно чітко розрізнити кольори та їхні відтінки. Лампи ЛТБ – у місцях, де сприйняттю людського обличчя надається великого значення (наприклад у театрах). Для промислового освітлення зазвичай використовують лампи ЛБ, спектр випромінювання яких наближається до денного світла.

Середній термін служби люмінесцентних ламп складає 2 000–10 000 годин.

За світловіддачею (75–80 лм/Вт) усі люмінесцентні лампи в 2,5–4 рази перевищують лампи розжарювання. Найбільшою світловіддачею вирізняються лампи білого світла (ЛБ), їх рекомендують для освітлення всіх виробничих приміщень, крім тих, де потрібно правильно розрізнити колірні відтінки.

Недоліками люмінесцентних ламп є великі габарити й довжина трубок (від 250 до 1 500 мм). Такі лампи важко вмонтувати в інтер'єр приміщень, тому, щоб зменшити габарити світильників, промисловість випускає також U – подібні, W – подібні та кільцеві лампи.

Люмінесцентні лампи працюють стабільно при зміні напруги в межах  $\pm 7\%$  від номінальної. Поза цими межами різко змінюються світловий потік, термін служби, світловіддача, не гарантується їхнє запалення.

Протягом терміну служби значно зменшується світловий потік (до 56 % від первісного значення), що вимагає прийняття значних коефіцієнтів запасу при розрахунках освітлення.

Лампи чутливі до температури зовнішнього середовища. Найбільша світловіддача має місце при температурі в лампі 40–50 °С, що співвідноситься з температурою зовнішнього середовища 18–25 °С. У разі зниження температури запалювання люмінесцентних ламп не гарантується, тому їх можна використовувати тільки для внутрішнього освітлення.

Люмінесцентні лампи вмикають у мережу за допомогою спеціальних ПРП. Залежно від способу запалювання розрізняють лампи стартерного, швидкого і миттєвого запалювання.

Для запалювання люмінесцентної лампи, тобто для створення в парах ртуті електричного розряду, потрібно нагріти катоди лампи й створити між ними високу напругу. Щоб запалити люмінесцентну лампу, її вмикають у мережу за допомогою стартера й дроселя.

Роботу схеми стартерного вмикання пояснено на рисунку 8.8. У разі вмикання на електроди лампи EL й стартера SF подається напруга мережі (220 В), що забезпечує утворення тліючого розряду між електродами стартера. Струм тліючого розряду (0,01–0,04 А) нагріває біметалічний електрод стартера, який прогинається у бік іншого електрода і замикає ланцюг. Тліючий розряд припиняється. Через обмотки дроселя LL і послідовно з'єднані катоди лампи проходить струм, який підігріває катоди лампи. Величина струму визначається індуктивним опором дроселя й електродів лампи. Замкнені електроди стартера охолоджуються, і коло розмикається. У момент розмикання електродів на дроселі виникає імпульс напруги, що призводить до запалювання лампи.

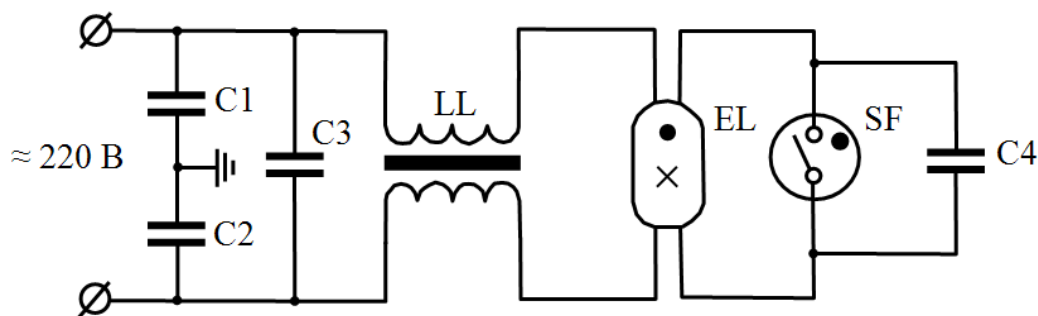


Рисунок 8.8 – Схема стартерного вмикання люмінесцентної лампи

Після запалювання лампи в ланцюзі встановлюється струм, що дорівнює номінальному струму лампи. Цей струм зумовлює таке зменшення на-

пруги на дроселі, що напруга на лампі приблизно дорівнює половині номінальної напруги мережі. Напруга на стартері буде дорівнювати напрузі на лампі, її недостатньо для запалювання тліючого розряду в стартері. Під час горіння лампи електроди стартера залишаються розімкнутими.

Можливість запалити лампу залежить від тривалості попереднього підігріву катодів і величини струму, що проходить через лампу в момент розмикання електродів стартера. Якщо розрив ланцюга відбудеться при малому значенні струму, то величина наведеної в дроселі ЕРС і, отже, прикладеної до лампи напруги може виявитися недостатньою для її запалювання, і лампа не запалиться. Отже, якщо при першій спробі стартер не запалить лампу, він відразу ж автоматично буде повторювати описаний процес доти, доки не відбудеться запалювання лампи.

Паралельно з електродами стартера ввімкнено конденсатор С4 ємністю 0,003–0,1 мкф, який виконує дві функції: знижує рівень радіозавад, що виникають під час контактування електродів стартера й створюваних лампою; зменшує величину імпульсу напруги, утвореного в момент розмикання електродів стартера, і збільшує його тривалість. У разі відсутності конденсатора напруга на лампі дуже швидко зростає, досягаючи декількох тисяч вольт, але тривалість його дії дуже невелика. За цих умов різко знижується надійність запалювання ламп. Крім того, включення конденсатора паралельно електродам стартера зменшує ймовірність зварювання (злипання) електродів, що може відбутися внаслідок утворення електричної дуги в момент розмикання електродів. Конденсатор сприяє швидкому гасінню дуги.

Застосування конденсатора С4 не забезпечує повного уникнення радіозавад. Щоб знизити рівень радіозавад обмотку дроселя LL (рис. 8.8) розділяють на дві однакові частини з однаковою кількістю витків, які намотані на загальне осердя. Кожна частина дроселя послідовно з'єднана з одним із катодів лампи, які працюють в однакових умовах.

Додатковим засобом зниження радіозавад є ввімкнення конденсаторів С1 і С2 ємністю не менше ніж 0,008 мкф кожний, з'єднаних послідовно, їхня загальна точка заземлена.

Істотним недоліком розглянутої схеми є низький коефіцієнт потужності (0,5–0,6). Для підвищення  $\cos\varphi$  до значень 0,85–0,9 паралельно до лампи включають конденсатор С3, ємність якого для ламп потужністю 40 Вт при напрузі 220 В становить 3–5 мкф.

Недоліком стартерних схем запалювання є їхня низька надійність, обумовлена малою надійністю роботи стартера. Надійність роботи стартера також залежить від рівня напруги джерела живлення. Зі зниженням напруги збільшується час, потрібний для розігрівання біметалічних електродів. У разі зниження напруги більше ніж на 20 % від номінальної стартер не забезпечує запалювання лампи.

Недоліком люмінесцентних ламп з електромагнітними ПРП також є значні втрати енергії (20–25 % для стартерних ламп і 30–35 % – для безстартерних).

Коливання світлового потоку створює стробоскопічний ефект, унаслідок чого погіршується сприйняття рухомих предметів, що призводить до швидкої втомлюваності очей, та може спричинити аварії та нещасні випадки.

Для вирівнювання світлового потоку використовують дволампові світильники, у яких за допомогою пускорегулюючого пристрою створюється зсув фаз між струмами окремих ламп, коливання зменшується приблизно до 15 %.

Беручи до уваги позитивні властивості та недоліки люмінесцентних ламп, їх використовують насамперед для освітлення виробничих і громадських приміщень, де тривалий час відбувається напружена зорова робота, повністю відсутнє або відчувається нестача природного світла, довго перебуває велика кількість людей, необхідно правильно відтворити кольори. Особливо доцільно використовувати їх у рудникових світильниках, де зазначені недоліки люмінесцентних ламп суттєвого значення не мають. Незначною є залежність від температури зовнішнього середовища; нема необхідності часто вмикати та вимикати лампи; трубчаста форма лампи значної довжини оптимально підходить для низьких і довгих шахтних вибірок; достатньо легко забезпечується вибухобезпечність люмінесцентних ламп; шляхом увімкнення ламп в різні фази трьохфазної мережі легко усувається стробоскопічний ефект.

Протягом останніх років схеми включення люмінесцентних ламп із електромагнітними ПРП поступово витісняються схемами з більш функціональними й економічними електронними ПРП.

Робота схеми електронного ПРП (рис. 8.9) включає три етапи:

- початкове нагрівання електродів із метою збільшення термоелектронної емісії;
- підпалювання дуги подачею імпульсу високовольтної напруги;
- забезпечення стабільного протікання дугового розряду.

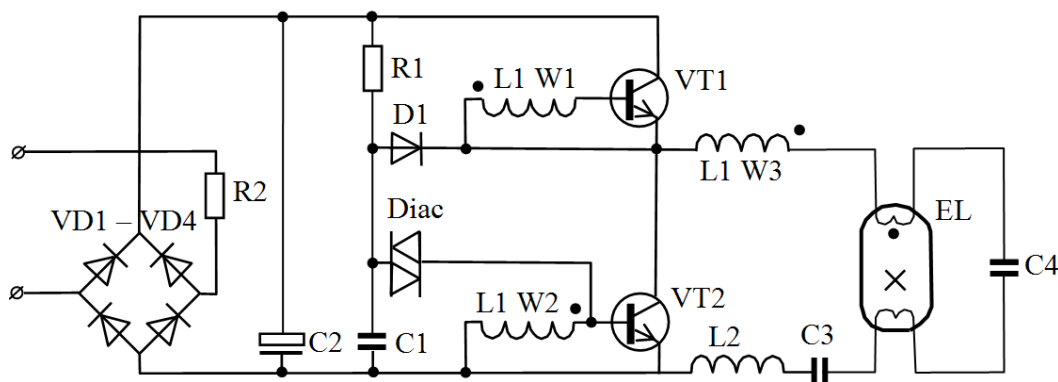


Рисунок 8.9 – Схема електронного ПРП люмінесцентної лампи

Змінна напруга мережі 220 В випрямляється двонапівперіодним діодним мостом і згладжується фільтруючим конденсатором C2 до постійної напруги 300–310 В, яка подається на двотактний інвертор, увімкнений за напівмостовою схемою. Інвертор утворюють транзистори T1 і T2, що

спричиняють коливання високої частоти, які подаються у протифазі на обмотки W1 і W2 триобмоточного тороїдального високочастотного трансформатора L1. З обмотки W3 трансформатора на люмінесцентну лампу EL видається резонансна висока напруга.

Таким чином, у разі ввімкнення живлення до початку запалювання лампи в резонансному контурі створюється максимальний струм, що забезпечує нагрівання обох ниток розжарювання.

Паралельно до лампи підключений конденсатор. На його обкладинках створюється велика резонансна напруга, яка запускає електричну дугу в середовищі інертних газів. Струм проходить через лампу, напруга на ній різко зменшується, і резонанс напруг у колі переривається.

Інвертор продовжує працювати в автоматичному режимі, не змінюючи частоти з моменту запуску лампи. Індуктивний опір перетворювача регулює струм, що проходить через лампу, і підтримує його в оптимальному діапазоні.

**8.3.2 Ртутні лампи високого тиску.** Ртутні лампи типу ДРЛ (позначення Д – дугові, Р – ртутні, Л – люмінесцентні) зовні подібні до великих лампи розжарювання. На відміну від люмінесцентної лампи в лампі ДРЛ електричний розряд відбувається не у всій колбі, а в маленькій трубці (пальнику) з кварцового скла, прозорого для ультрафіолетових променів. Під впливом ультрафіолетового випромінювання пальника спеціальний люмінофор, нанесений на внутрішню поверхню колби, дає яскраве, зеленувате світло (близьке до білого).

Перші лампи ДРЛ виготовлялися двоелектродними. В силу складності й малої надійності ПРП двоелектродні лампи ДРЛ були замінені чотириелектродними, ПРП яких простіші й надійніші.

На рисунку 8.10 подано будову чотириелектродної лампи ДРЛ. Скляна колба 1, на внутрішню поверхню якої нанесено шар люмінофора 2, з'єднана з різьбовим цоколем 3. На ніжці лампи 4 встановлена розрядна трубка (пальник) 5, яка заповнена аргонем з домішкою ртуті. Лампа має основні електроди 6 і запалюючі (додаткові) електроди 7. Кожний запалюючий електрод 7 з'єднаний з основним електродом 6, що знаходиться з протилежного боку, через струмообмежуючий опір 8. Додаткові електроди полегшують запалювання й забезпечують її більш стабільну роботу в момент пуску.

При вмиканні лампи під дією напруги мережі спочатку запалюється розряд у невеликому газовому проміжку між робочим і додатковим електродами. При достатній іонізації газу розряд переходить на робочі електроди, і лампа запалюється.

Ртутно-кварцова лампа дає інтенсивний ультрафіолетовий колір світла. Тому для виправлення спектру ртутної лампи кварцову трубку вмонтовують у зовнішню колбу із термостійкого скла (температура колби досягає 300–400 °С), вкриту люмінофором. Колба заповнена азотом, що попереджує віддачу тепла горілкою в зовнішнє середовище, а отже у ній підвищує тиск парів, збільшується світловий потік і економічність



самої лампи. Лампа ДРЛ має спектр випромінювання, що наближається до денного світла.

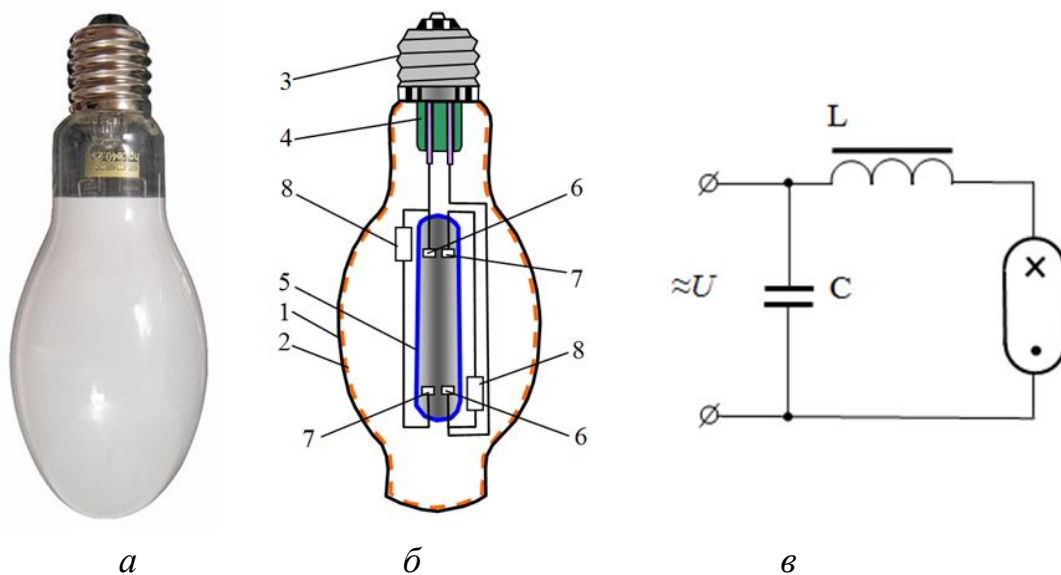


Рисунок 8.10 – Чотирьохелектродна лампа типу ДРЛ:

*a* – зовнішній вигляд; *б* – конструкція; *в* – схема запалювання;  
 1 – скляна колба; 2 – люмінофор; 3 – цоколь; 4 – опорна ніжка;  
 5 – розрядна трубка; 6 – основні електроди; 7 – додаткові електроди; 8 – струмообмежуючі резистори

Світлова віддача ламп ДРЛ досягає 50–70 лм/Вт. Строк служби становить до 10 000 годин для двохелектродних і 3 000 годин для чотирьохелектродних. Суттєвою перевагою ламп ДРЛ є їх форма, що нагадує лампу розжарювання, а також компактні габарити. Однак ці лампи характеризуються низькою якістю кольоропередачі, відносно високою ціною, чутливістю до зниження напруги.

Основні характеристики:

- тип цоколя – різьбовий E27 або E40;
- номінальні напруги 220 і 380 В;
- номінальні потужності 50, 80, 125, 250, 400, 500, 700, 1 000, 2 000 Вт;
- термін служби 6–15 тис. годин.

Порівняно з лампами розжарювання лампи ДРЛ споживають менше електричної енергії.

Лампи ДРЛ застосовують для освітлення високих виробничих приміщень, для зовнішнього освітлення за умови відсутності жорстких вимог до якості передачі кольору.

Лампи доцільно використовувати при тривалому режимі роботи, оскільки повторне запалювання можливе через 10–15 хвилин після відключення.

**8.3.3 Металогалогенні лампи** (позначення МГЛ) також відносяться до газорозрядних джерел світла високого тиску. У процесі роботи лампи дуговий розряд відбувається в парах ртуті в інертному аргоновому середовищі. Спектр випромінювання лампи визначається випромінюючими до-

мішками галоїдних з'єднань різних елементів (натрію, скандію, талію та ін.) з йодом, бромом чи хлором. Пари галогенідів у зоні розряду розкладаються, і метали, що входять до складу з'єднання, дають додаткове випромінювання. На стінці колби галогеніди відновлюються й, потрапивши знову розряду, знову випаровуються. Колір випромінюваного світла залежить від використаного металу (йодид талію дає зелене світло, натрію – жовте, індію – блакитне) що дозволяє відмовитися від люмінофора на внутрішній поверхні колби.

Конструктивно металогалогенна лампа (рис. 8.11) схожа на лампу ДРЛ. Пальник лампи виготовляється з кварцового скла або кераміки, колба – із боросилікатного скла, яке не пропускає ультрафіолетовий спектр випромінювання. У промислових МГЛ колба відсутня.

МГЛ випускають у широкому діапазоні потужностей. Для зовнішнього освітлення застосовують лампи потужністю 70, 150, 250, 400, 1 000, 2 000 Вт.

МГЛ виготовляють одноцокольними (позначаються SE – single-ended) та двоцокольними (позначаються DE – double-ended).

Особливістю МГЛ є правильне робоче положення лампи. Лампа з позначенням ВН (base horizontal) потребує горизонтального положення при експлуатації, лампа з позначенням ВUD (base up/down) – вертикального положення. Лампи з позначенням U (universal – універсальна) можуть використовуватися в довільному положенні.



Рисунок 8.11 – Металогалогенна лампа:

а – із трубчастою колбою; б – із бульбовидно-трубчастою колбою

**Характеристики металогалогенних ламп.** Колір світила МГЛ, як уже зазначалося, обумовлений видом застосовуваного галогену. Сполуки натрію дають жовтий відтінок, талію – зелений, індію – синій. Можливо одержати чисте денне світло з індексом передачі кольору понад 90. Принципово досяжна будь-яка колірна температура в діапазоні від 2 500 до 20 000 К.

Спеціальні типи МГЛ застосовують у парниках і теплицях для рослин, в акваріумах – для тварин, оскільки там потрібен особливий спектр. Обираючи лампу, важливо пам'ятати, що характеристики кольору в реальності будуть спочатку відрізнятися від зазначених у специфікації, оскільки зазначені характеристики стосуються ламп, що вже відпрацювали 100 годин, отже спочатку вони будуть трохи відрізнятися.

Крім того, якщо живлення в мережі коливається, колірна температура не буде постійною, а якщо напруга менше за номінальну, то світло буде холоднішим, оскільки домішки, що забезпечують колір, не іонізуються в достатній кількості.

Якщо ж напруга буде більшою за номіналу, колір виявиться теплішим, однак тривале перевищення напруги може спричинити вибух колби внаслідок підвищення в ній тиску. Тому важливо передбачити стабілізацію напруги живлення.

**Переваги металогалогенних ламп.** Спектральні й електричні характеристики металогалогенних ламп можуть дуже широко варіюватися оскільки асортимент ринку величезний. Якість світла й висока світловіддача обумовлюють широке використання МГЛ у різноманітних освітлювальних установках і світлосигнальних приладах.

МГЛ компактні, потужні, ефективні як джерело світла, і на сьогодні вони становлять перспективну заміну традиційних дугових ртутних люмінесцентних ламп (ДРЛ) і натрієвих ламп високого тиску (НЛВД), завдяки більш м'якому й безпечному для людини спектру.

Світловий потік ламп МГЛ до 4 разів потужніший, ніж у ламп розжарювання, а світловіддача в середньому становить 80–100 Лм/Вт. Колірні температури – 6 400 К (холодне світло), 4 200 К (природне освітлення) або 2 700 К (тепле світло), легко досягнути при передачі кольору до 90–95 %; це дуже хороша передача кольору для лампи, ККД якої у 8 разів вище, ніж у лампи розжарювання.

Потужність може варіюватися від 20 до 3 500 Вт в одному джерелі, до того ж безперебійна робота не залежить від температури навколишнього середовища й від її перепадів, якщо лампа вже запалилася. Термін служби лампи МГЛ у середньому розраховується на 10 000 годин безперервної роботи.

**Недоліками МГЛ** є висока вартість і складна схема запалювання, яка, окрім баластного дроселя, містить запалювальний пристрій. Запалювальний пристрій створює напругу до 9 000 В. Розряд забезпечує проходження стартового електричного струму через розрядний проміжок лампи й баластний дросель.

**Сфери застосування металогалогенних ламп.** На сьогодні лампи МГЛ отримали широке застосування: кінознімальне освітлення, зовнішнє освітлення в архітектурі, декоративне освітлення, сценічне й студійне освітлення тощо. Металогалогенні лампи популярні в промисловому освітленні цехів, у прожекторах на відкритих площадках залізничних станцій, у кар'єрах, на будівельних майданчиках, на спортивних об'єктах тощо; освітлення суспільних і промислових будинків, спеціальне освітлення для рослин і тварин як джерело ближнього ультрафіолету; освітлення вулиць, підсвічування ландшафтів і вітрин, створення світлових ефектів у дизайні й у рекламі, у торгових центрах.

**8.3.4 Натрієві лампи.** Лампи типу ДНаТ – це енергоекономічні й екологічно чисті джерела зовнішнього освітлення. У колбі цих ламп немає ртуті, містяться пари натрію й інертних газів. Їх обмежено застосовують для загального освітлення приміщень, проте переважно використовують для декоративно-художнього освітлення перехресть вулиць, площ, спортивних споруд, відкритих і закритих майданчиків.

Лампи ДНаТ випускаються потужністю 50–400 Вт.

Натрієві лампи високого тиску малочутливі до температури навколишнього середовища й працездатні при її змінюванні в діапазоні від -60 до +40 °С. Коливання напруги електричної мережі істотно позначаються на світлових і електричних параметрах натрієвих ламп. Крім того, ці лампи потребують дотримання встановленого положення горіння: цоколем угору або вниз, із нормованим відхиленням від вертикального положення.

Колірні характеристики натрієвих ламп високого тиску відносно невисокі: лампа випромінює світло жовто-жовтогарячого кольору ( $T = 2\ 000\ \text{K}$ ) і має низьку світлопередачу ( $R_a = 20\text{--}30$ ). Поліпшити якість передачі кольору під час використання натрієвих ламп можна шляхом їх одночасного застосування із ртутними люмінесцентними лампами високого тиску.

Лампи вмикають у мережу так само, як і лампи ДРЛ – через послідовно включений дросель, розрахований на робочий струм і напругу лампи. Маса дроселя приблизно на 30 % більша, ніж у дроселя для лампи ДРЛ такої самої потужності, оскільки в неї більший робочий струм. Стандартні лампи запалюються за допомогою імпульсного запалювального пристрою (створює імпульси високої напруги – 2–3 кВ), який підключається паралельно до лампи або через обмотки дроселя. Коефіцієнт потужності комплекту «лампа – ПРА» у середньому становить 0,5. Пульсації світлового потоку досягають 70 %.

Переваги натрієвих ламп високого тиску типу ДНаТ:

- дуже висока світловіддача (120–150 лм/Вт);
- значний термін служби (до 25 000 годин);
- широкий діапазон робочих температур (від -60 °С до +40 °С).

Недоліки ламп типу ДНаТ:

- дуже погана передача кольору ( $R_a \approx 23$ );
- значний час вмикання (6–10 хв);
- схема вмикання складніша, тому що, крім баластового дроселя містить і запалювальний пристрій.

**8.3.5 Ксенонові лампи.** У ксенонових лампах дуговий розряд відбувається в інертному газі ксеноні, унаслідок чого випускаються промені в близькій до ультрафіолетової, видимій і близькій до інфрачервоної областях спектра електромагнітного випромінювання. Випромінюване світло має рівний білий колір ( $T_k = 6\ 000\ \text{K}$ ) і хорошу передачу кольору ( $R_a = 98$ ).

Ксенонові лампи виготовляють з короткою дугою і з довгою дугою.

Більше поширені лампи з короткою дугою (рис. 8.12). Електроди (3) в цих лампах розташовані на невеликій відстані, а колба має кулеподібну (або близьку до кулеподібної) форму (2). Електроди й кулеподібна колба розміщені в трубчастій колбі (1), яка забезпечує рівномірне розсіювання світла.

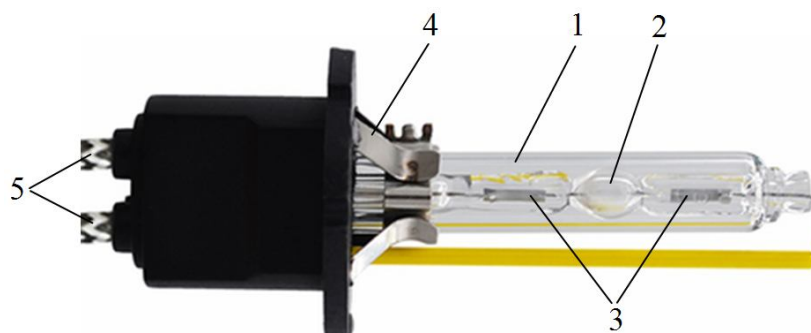


Рисунок 8.12 – Ксенонова лампа:

1 – трубчаста колба; 2 – кульова колба ; 3 – електроди;  
4 – металічні опори-фіксатори; 5 – контактні виводи

Лампи з довгою дугою відрізняються від ламп з короткою дугою тим, що електроди рознесені на більшу відстань і колба лампи має форму довгої трубки (рис. 8.13). Ці лампи потребують баласту менших розмірів, а іноді використовуються без баласту. Зазвичай їх установлюють у рефлектор параболічної форми і застосовують для освітлення великих відкритих просторів (залізничні станції, складські комплекси тощо).



Рисунок 8.13 – Ксенонова трубчаста лампа

Електричний дуговий розряд у ксеноновій лампі виникає при високій напрузі запалювання (до 50 кВ). Час розпалювання лампи становить менше секунди, оскільки на відміну від ламп, у яких розряд відбувається в газах із парами ртуті або натрію, щільність ксенону залишається практично постійною при змінюванні теплового режиму. Такі лампи мають зростаючу вольт-амперну характеристику при великій щільності струму. Це дозволяє стабілізувати розряд за допомогою невеликих баластних опорів або ж взагалі обійтися без них, що має місце при використанні трубчастих ламп значної довжини.

Виготовляють також ксенонові короткодугові лампи в керамічному корпусі з убудованим рефлектором. Ці лампи безпечніші (світло виходить через невелике віконце) під час встановлення й заміни і використовуються у відеопроєкторах.

У ксенонових лампах застосовуються два види охолодження – природне і водяне. У лампах з водяним охолодженням пальник (трубка) розміщуєть-

ся коаксиально в скляному циліндрі, оснащеному пристроєм для підведення дистильованої води. Такі лампи внаслідок кращого відведення теплоти при однаковій одиничній потужності мають менші габарити. Порівняно з лампами із природним охолодженням, вони мають велику світлову віддачу. Світлова віддача ламп з природним охолодженням зі збільшенням одиничної потужності зростає і становить 18–45 лм/Вт, а ламп з водяним охолодженням – 27–42 лм/Вт.

З досить великої серії ксенонових ламп в освітлювальних установках отримали застосування дугові ксенонові трубчасті лампи з повітряним охолодженням типу ДКсТ і лампи з водяним охолодженням типу ДКсТВ. На відміну від інших газорозрядних ламп, ці лампи працюють без баласту у вигляді ПРА, а запалюються за допомогою спеціального пускового пристрою.

Сортамент включає лампи потужністю 5, 10, 20 і 50 кВт (у невеликій кількості випускаються також лампи 100 кВт). Термін служби різних типів ламп обмежується 300–750 год, але в разі стабілізації напруги, яка забезпечує відхилення від номінального значення  $\pm 2\%$ , може досягати 3 000 г. Лампи потужністю до 10 кВт включаються на напругу 230 В, більш потужні – у мережу напругою 400 В. Для ламп типу ДКсТ потужністю 10, 20 і 50 кВт положення горіння повинно бути горизонтальне з відхиленням від нього  $\pm 30^\circ$ , а для решти ламп – будь-яке. Сфера застосування ламп обмежується надлишком у їхньому спектрі шкідливого для людей ультрафіолетового випромінювання. Випускаються також лампи в колбі з легованого кварцу (лампи ДКсТЛ), які не мають цього недоліку. Пульсації світлового потоку в лампах ДКсТ особливо великі (коефіцієнт пульсації 130 %). Крім великої одиничної потужності, перевагою ламп є те, що їх випромінювання за кольоровістю найближче до природного денного світла, хоча за сферою застосування ламп ця перевага зазвичай не реалізується. Температура зовнішнього середовища істотно не впливає на запалювання й горіння лампи.

У маркуванні ламп букви й числа означають: Д – дугова, Кс – ксенонова, Т – трубчаста, К – кульова, В – з водяним охолодженням, М – металева, РБ – розбірна, число – потужність у ватах. У таблиці 8.4 наведено технічні дані ксенонових трубчастих ламп типу ДКсТ.

Таблиця 8.4 – Параметри деяких ксенонових ламп

Тип лампи	Номінальні значення			Середня тривалість горіння, год
	Рн, кВт	Ф, лм	Н, лм/Вт	
ДКсТ2000	2 000	36 000	18	300
ДКсТ5000	5 000	98 000	19,6	300
ДКсТ10000	10 000	250 000	25	800
ДКсТ20000	20 000	694 000	34,7	800
ДКсТ50000	50 000	2 230 000	44,6	500
ДКсТВ3000	3 000	81 000	27	100
ДКсТВ6000	6 000	211 000	35,2	300
ДКсТВ8000	8 000	232 000	29	800
ДКсТВ15000	15 000	592 000	39,5	200
ДКсТВ50000	50 000	2 088 000	41,8	200

## 8.4 Світлодіодні джерела світла

Світлодіод (англійськомовна назва LED – Light Emitting Diode) як джерело світла – це прилад, який містить штучний напівпровідниковий кристал, в якому реалізовано р-п-перехід. Під час проходження через кристал електричного струму він випромінює фотони. Колір свічення залежить від матеріалу напівпровідника. Приміром, червоне й жовте випромінювання мають світлодіоди, виготовлені на основі арсеніду галію, зелене й синє – на галій-нітридній основі. Для посилення яскравості свічення застосовують різноманітні присадки або багат шарові структури (шар нітриду розміщують між шарами напівпровідника, що дає змогу реалізувати в одному кристалі відразу декілька р-п-переходів, збільшивши таким чином яскравість його свічення).

Кристал встановлюють у металевій відполірованій склянці, яка є відбивачем і одночасно катодом діода. Усю конструкцію заливають прозорим компаундом певної форми, який виконує функцію колби звичайної лампи. Від форми колби залежить кут випромінювання світла, що випускає кристал. Якщо верх колби плоский, світло виходить широким пучком (кут становить 120–130°). Якщо верх опуклий, він створює лінзу, що збирає світло в більш вузький пучок (кут 8–60°). Чим менше кут випромінювання, тим більше інтенсивність світлового потоку кристалу.

Випускають світлодіоди різних кольорів: червоного, жовтого, зеленого, синього, синьо-зеленого й білого, причому білий з недавніх пір буває декількох відтінків (холодного, теплого, «сонячного»).

Щоб отримати паспортні характеристики потрібно забезпечити певну силу струму (для різних моделей значення номінального струму коливається від 20 до 150 мА). Частота випромінювання (колір) залежить від падіння напруги на світлодіоді (див. табл. 8.5).

Розрізняють два типи світлодіодів: для індикації й для освітлення. Перші використовують для індикації стану (увімкнений, вимкнений) різних приладів, а також як джерела декоративного підсвічування. Це кольорові діоди, розміщені в корпусі, що просвічується, кожний має чотири виводи. Прилади, що випромінюють інфрачервоне світло, використовують у пультах дистанційного керування приладами.

В галузі освітлення використовують світлодіоди, що випромінюють біле світло. За кольоровістю розрізняють світлодіоди з холодним білим, нейтральним білим і теплим білим світінням. Існує класифікація застосовуваних для освітлення світлодіодів за способом монтажу. Маркування світлодіода SMD означає, що прилад складається з алюмінієвої або мідної підкладки, на якій розміщений кристалик діода. Сама підкладка розташовується в корпусі, контакти якого з'єднані з контактами світлодіода.

Інший тип світлодіодів позначається ОСВ. У такому приладі на одній платі розміщується безліч кристалів, покритих люмінофором. Така конструкція забезпечує більшу яскравість світіння. Таку технологію викорис-

товують при виробництві світлодіодних ламп зі значним світловим потоком на відносно малій площі.

**Характеристики світлодіодів.** Основними характеристиками світлодіодів (табл. 8.5) є: напруга живлення, робочий струм, потужність, світловіддача, температура світіння (колір, рис. 8.14), кут випромінювання, термін деградації.

Таблиця 8.5 – Характеристики світлодіодів

Колір яскравість світіння	Матеріал	Падіння напруги $\Delta U, V$	Світлова температура	Сфера застосування
Інфрачервоний	GaAs, GaAlAs	$1,2^{+0,2}_{-0,1}$	–	–
Червоний	GaAsP, GaP, AlInGaP	$2,0^{+0,6}_{-0,5}$	1 800	Декоративне світлове оформлення, фітоосвітлення
Жовтий	GaAsP, GaP, AlInGaP	$2,0^{+0,8}_{-0,3}$	3 300	Світлове оформлення інтер'єрів
Зелений	GaP, InGaN	$2,2^{+1,8}_{-0,5}$	–	Світлове оформлення інтер'єрів
Синій	ZnSe, InGaN	$3,6^{+0,9}_{-0,4}$	7 500	Декоративне світлове оформлення, фітоосвітлення
Білий	Теплий	$3,6^{+0,7}_{-0,9}$	2 700 – 3 500	Побутові й офісні приміщення
	Нейтральний	$3,6^{+0,7}_{-0,9}$	3 500 – 5 300	Робочі місця на виробництві
	Холодний	$3,6^{+0,7}_{-0,9}$	Більше 5300	Освітлення вулиць, ручні ліхтарики

Параметр *напруга живлення*, як номінальний, щодо світлодіодів не застосовується. Використовують параметр *падіння напруги* на світлодіоді, яке розглядають як величину напруги на світлодіоді при проходженні через нього номінального струму. Визначити величину напруги на світлодіоді можна за кольором світіння приладу. Наприклад, для синіх, зелених і білих кристалів напруга становить близько 3 В, для жовтих і червоних – від 1,8 до 2,4 В.



Рисунок 8.14 – Кольорова гама світлодіодів



В силу нелінійності вольт-амперної характеристики р-п переходу важливо слідкувати, щоб струм світлодіода відповідав номінальному значенню. Зі збільшенням напруги на 0,1 В спостерігається збільшення сили струму на 50 %, що призводить до скорочення терміну експлуатації.

**Номінальний струм.** Більшість поширених світлодіодів мають значення номінального струму 0,02 А. Більш потужні прилади, у структурі яких задіяні чотири кристали, розраховані на 0,08 А. Від значення робочого струму світлодіода залежить стабільність його роботи. Навіть незначне збільшення сили струму сприяє зниженню інтенсивності випромінювання (старінню) кристала й збільшенню колірної температури. Це в кінцевому результаті призводить до того, що світлодіоди починають відливати синім світлом і передчасно виходять із ладу.

Щоб обмежити робочий струм, у конструкціях LED-ламп і світильників передбачені стабілізатори струму для світлодіодів (драйвери). Вони забезпечують номінальні значення струмів світлодіодних приладів.

### **Світлова віддача, кут розсіювання й потужність світлодіодів.**

Світловий потік діодів порівнюють з іншими джерелами світла за силою їхнього випромінювання. Прилади розміром близько 5 мм у діаметрі дають від 1 до 5 лм світла. Тоді як світловий потік лампи розжарювання в 100 Вт становить 1 000 лм. Однак під час порівняння необхідно брати до уваги, що у звичайної лампи світло розсіяне, а у світлодіода – спрямоване, тому необхідно зважати на кут розсіювання світлодіодів.

Кут розсіювання різних світлодіодів може становити від 20 до 120°. Під час освітлення світлодіоди дають яскравіше світло в центрі й знижують освітленість до країв кута розсіювання. Таким чином, світлодіоди краще освітлюють конкретний простір, використовуючи при цьому менше потужності. Але якщо потрібно збільшити площу освітленості, у конструкції світильника використовують розсіювальні лінзи.

У таблиці 8.6 наведені дані щодо відповідності потужності ламп розжарювання й світлодіодних ламп.

Таблиця 8.6 – Відповідність потужностей ламп розжарювання й світлодіодних ламп

Потужність лампи розжарювання	25	40	60	75	100
Потужність світлодіодної лампи	3	5	7–8	10	12

**Ефективність** світлодіодів визначається відношенням світлового потоку (лм) до споживаної потужності (Вт). Зіставляючи ці параметри для різних джерел світла, отримуємо, що ефективність лампи накаливання становить 10–12 лм/Вт, люмінесцентної – 35–40 лм/Вт, світлодіодної – 130–140 лм/Вт.

**Світлова температура** – важливий параметр джерел світла, одиницею виміру якої є градус Кельвіна (К). Варто зазначити, що всі джерела світла за температурою світіння розділяють на три класи, серед яких теплий білий має колірну температуру менше ніж 3 300 К, денний білий – від 3 300 до 5 300 К і холодний білий понад 5 300 К.

**Переваги світлодіодних ламп:**

- економічність без втрати сили світлового потоку;
- висока механічна стійкість;
- великий термін працездатності;
- малі габарити;
- низька робоча напруга мережі живлення (3–24 В);
- екологічність, відсутність потреби спеціальної утилізації.

До **недоліків** можна віднести:

- роботу тільки на постійному струмі;
- високу вартість, обумовлену потребою щодо спеціального електронного стабілізатора (драйвера).

### 8.5 Індукційні лампи

Індукційна лампа (надалі – ІЛ) – це газонаповнена люмінесцентна лампа, особливістю якої є відсутність електродів розжарювання. Фізика роботи ІЛ базується на явищах електромагнітної індукції, електричного розряду в газовому середовищі й світінні люмінофора при його взаємодії з газовим розрядом.

Основними конструктивними елементами ІЛ (рис. 8.15) є газонаповнена колба 1 (зазвичай суміш аргону з парами ртуті), внутрішня поверхня якої вкрита люмінофором 2, і електронний баласт у складі високочастотного перетворювача 3 і високочастотного (ВЧ) трансформатора 4. Вторинною обмоткою ВЧ трансформатора є газ у колбі. ВЧ перетворювач створює в колбі лампи високочастотне електромагнітне поле, під дією якого виникає іонізація газового середовища 5. Результатом іонізації є генерація ультрафіолетового випромінювання 6, яке, проходячи через люмінофор 2, перетворюється на видиме світло 7.

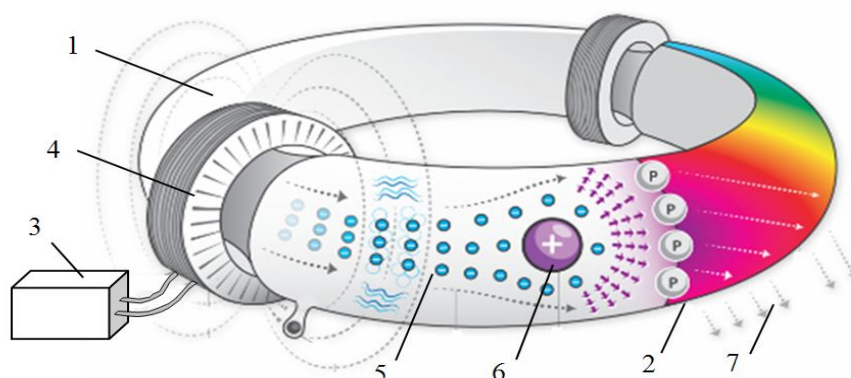


Рисунок 8.15 – Принцип роботи індукційної лампи [75]

Існують два типи ІЛ: низькочастотні з частотами збудження іонізації 140–250 кГц та високочастотні з частотою 2,65 МГц (див. табл. 8.6)

Таблиця 8.6 – Параметри індукційних ламп

Параметр	Низькочастотні	Високочастотні
Частота, МГц	0,14–230	2,65
Світловіддача, лм/Вт	80	60
Потужність, Вт	15–400	15–185
Тип колби	А, В, G, Т, кільцеподібна	А, В, ampoule Edison

У багатьох країнах налагоджено промислове виробництво ІЛ на номінальні напруги 12 і 24 В постійного струму та 120, 220, 277, 347 В змінного струму з номінальними потужностями від 12 до 500 Вт з колірною температурою в діапазоні від 2 700 К до 6 500 К.

Термін служби ІЛ значно перевищує 65 000 годин.

Існують індукційні лампи із зовнішньою і внутрішньою індукцією залежно від розташування індуктора. У лампах із зовнішньою індукцією індуктор розташовується навколо трубки колби, а в лампах із внутрішньою індукцією – усередині колби. Електронний баласт може розташуватися окремо від колби (рис. 8.15, а) або бути убудованим у корпус (рис. 8.15, б).

Фома колби лампи стандартна, з патронами E14, E27 і E40, або кільцева.



Рисунок 8.16 – Конструкції індукційних ламп:

а – лампи із зовнішнім індуктором; б – лампа з внутрішнім індуктором

### Переваги індукційних ламп.

1. Тривалий термін служби (за даними деяких виробників – до 150 000 год.).
2. Світловіддача 60–80 лм/Вт за термін експлуатації зменшується не більше ніж на 20 %.
3. Високий ККД – 0,9.
4. Зменшення світлового потоку до кінця терміну служби на 10–15 %.

5. Високий індекс передачі кольору  $R_a > 80$  (комфортне, м'яке світло, приємне для очей).
6. Низька температура нагрівання лампи (40–60 °С) градусів.
7. Широкий діапазон робочих температур (від -40 до +60 °С).
8. Високий коефіцієнт потужності – до 0,95.
9. Відсутність стробоскопічного ефекту.
10. Низький вміст ртуті (у кілька разів менший порівняно зі звичайними люмінесцентними лампами).
11. Вартість у 3–5 разів нижча порівняно зі світлодіодними лампами.

**Недоліками** є значний рівень високочастотного електромагнітного поля, яке є джерелом завад для систем зв'язку та керування.

**Сфера використання.** ІЛ застосовуються для зовнішнього освітлення, особливо тоді коли необхідно застосувати хорошу освітленість з високою світловіддачею, довгим терміном роботи. Це стосується вулиць, тунелів, магістралей, стадіонів, промислових і складських приміщень, виробничих цехів, рекламних щитів тощо.

## **Висновки**

Електроприймачі освітлювального устаткування забезпечують необхідні норми освітленості елементів міської інфраструктури, робочих місць промислових підприємств, побутових приміщень. Вони є важливим елементом обладнання будівельних майданчиків і підприємств будівельної індустрії.

Як джерела світла застосовують лампи розжарювання, газорозрядні лампи.

Газорозрядні лампи порівняно з лампами розжарювання різняться меншим споживанням електричної енергії.

Протягом останніх років усе більше використовуються енергоефективні джерела світла. Найбільш популярними стали світлодіодні лампи різноманітного функціонального призначення.

## **Запитання для самоперевірки**

1. Назвіть основні світлотехнічні величини.
2. Які основні переваги та недоліки ламп розжарювання?
3. Назвіть основні види газорозрядних ламп.
4. У чому полягають особливості люмінесцентних ламп?
5. Де застосовуються ртутні лампи високого тиску?
6. У чому полягають переваги й недоліки світлових діодів?
7. Поясніть фізику роботи індукційних ламп.

## **Список рекомендованих джерел**

Основна література: [28, С. 356–365], [37, С. 8–18, 52–69], [43, С. 58–95].

Додаткова література: [3, С. 290–292], [10], [15], [16], [22].

# Частина III

## ОСОБЛИВОСТІ ЕЛЕКТРОПРИЙМАЧІВ МІСТ І ПРОМИСЛОВИХ ПІДПРИЄМСТВ

---

---

### Розділ 9 ЕЛЕКТРОЗВАРЮВАЛЬНЕ УСТАТКУВАННЯ

**Ключові поняття:** зварювання, електродугове зварювання, автоматичне зварювання, зварювальний генератор, зварювальний апарат, контактне зварювання.

У сучасних умовах електрозварювальне устаткування (далі – ЕЗУ) стало однією з характерних груп споживачів ЕЕ, яка представлена широким асортиментом різних типів обладнання й специфічних технологій їхнього функціонування. У цій темі ми розглянемо основні групи ЕЗУ, робота яких базується на перетворенні отриманої від системи електропостачання ЕЕ в теплову енергію. ЕЗУ, до складу якого входять джерела живлення (електрогенератори), ми не розглядаємо.

Одним із провідних технологічних процесів є електричне зварювання. Сьогодні це ефективний і економічний спосіб нероз’ємного з’єднання металів, при якому деталі стають єдиним цілим. Зварювання вважається одним із найважливіших процесів виробництва. Воно, як і інші виробничі процеси, використовує знання і досвід різних галузей науки й техніки, що зумовило створення широкого спектру технологій нероз’ємного з’єднання.

Зварені металеві конструкції використовують майже в усіх галузях народного господарства країни. Особливо широко їх застосовують при виробництві металургійного, гірничорудного, енергетичного устаткування, будівельно-дорожніх машин, рухливого складу залізниць, автомобілів і сільськогосподарської техніки, суден, будівельних конструкцій, трубопроводів тощо.

Зварювання забезпечує існування й ефективну роботу великим індустріям. Неможливо уявити сучасне будівництво без кранів, агропромисловий комплекс без тракторів і комбайнів, газодобувну промисловість без трубопроводів, транспорт без вантажівок, кораблів і літаків і т. ін. Сьогодні існує широкий спектр технологій і способів зварювання, кожна з яких сприяє ефективному вирішенню завдань виробництва.

Електричне зварювання поділяється на ручне й автоматичне. Зварювання електричною дугою проводиться на відкритому повітрі, під флюсом у парах металу і флюсу й у захисних газах (аргон, гелій). Під час зварювання й різання металів застосовують вугільні й металеві електроди. Електроди поділяють на такі, що плавляться, і такі, що не плавляться. Електроди, що плавляться, становлять металеві стрижні з покриттям, прутки, дріт, пластини. Електроди, що не плавляться, виготовляють у вигляді вольфрамових і вуглецевих стрижнів для контактного зварювання.

Наявне ЕЗУ характеризується специфічними параметрами та особливостями технологічного процесу, які висувають особливі вимоги щодо джерел їхнього живлення. Вимоги до ЕЗУ викладені в [42, с. 272–275; 24]

## 9.1 Основні відомості про електричне зварювання

**9.1.1 Фізика процесу електричного зварювання.** *Електричне зварювання* – це процес створення неподільних з'єднань деталей машин, конструкцій і споруд за умови їх місцевого або загального нагрівання, пластичного деформування або за умови одночасного впливу цих двох факторів, наслідком чого є встановлення міжатомних зв'язків у місці з'єднання.

У процесі зварювання деталі в місці з'єднання нагріваються до температур розплавлення металу, встановлення міжатомних зв'язків з'єднаних деталей, що забезпечує міцність з'єднання після завершення процесу й охолодження деталей.

Усі технічно важливі метали при звичайній температурі – це тверді кристалічні тіла, під час зварювання яких виникають деякі труднощі: утворюються тріщини, відбувається окислення, метал деформується й коробиться, погіршуються механічні властивості металу в зоні зварювання. Негативно впливають плівки окислів, різноманітні забруднення на поверхні металів. У процесі зварювання необхідно зблизити велику кількість атомів поверхонь металів, що з'єднуються, на дуже малі відстані, тобто здійснити їхнє зіткнення. Такому зближенню перешкоджає висока міцність і твердість металу: його атоми міцно утримуються у вузлах кристалічних ґрат і малорухомі.

Твердість металу й твердість кристалічних решіток можна послабити шляхом нагрівання. Що вища температура нагрівання, то м'якший метал і більш рухомі його атоми. Під час нагрівання до температури плавлення метал стає рідким, атоми в ньому легко переміщаються, тому для зварювання достатньо розплавити небагато металу біля крайок, що з'єднуються. Рідкий метал крайок обох деталей зливається у загальну зварювальну ванну. Зварювальна ванна утворюється внаслідок рухливості атомів у рідкому металі спонтанно і не потребує додаткових зусиль. В міру охолодження розплавлений метал твердіє і міцно з'єднує зварювані деталі.

Зварювані деталі нагріваються під дією *електричної зварювальної дуги*, яка є електричним розрядом у газовому середовищі між твердими або рідкими електродами, що протікає при високій щільності струму й супроводжується виділенням великої кількості тепла. Для збудження електричної дуги використовують такі способи:

- створення короткого замикання між електродами з їхнім подальшим розведенням (ручне дугове зварювання);
- додатковий імпульс струму високої напруги й високої частоти;
- розплавлення кінця електродного дроту в момент короткого замикання (механізоване зварювання з постійною швидкістю подавання електродного дроту).

В усіх цих випадках у просторі між електродами з'являються заряджені частинки (електрони й іони), які за наявності відповідної напруги між електродами починають упорядковано рухатися до електродів, тобто відбувається порушення дуги. Час формування дугового розряду становить близько  $10^{-6}$  секунди.

Для живлення зварювальної дуги використовують змінний, постійний і пульсуючий електричні струми. Під час зварювання на змінному струмі, внаслідок зміни напрямку його протікання кожний електрод по чергово є то анодом, то катодом. При зварюванні на постійному й пульсуючому струмі розрізняють пряму й зворотну полярності. При прямій полярності деталі, що зварюються, з'єднують з позитивним полюсом джерела живлення (анодом), а електрод – з негативним (катодом); при зворотній полярності – навпаки: до позитивного полюса підключається електрод, а деталі – до негативного. Використання того або іншого виду струму визначає особливості процесу зварювання. Так, дуга на змінному струмі гасне щораз, коли струм переходить через нуль. Застосування тієї чи іншої полярності змінює тепловий баланс дуги: при прямій полярності більше тепла виділяється на виробі, при зворотній – на електроді. У разі використання пульсуючого струму шляхом зміни його параметрів (частоти й тривалості імпульсів) з'являється можливість достатньо точно регулювати перенесення розплавленого металу від електрода до виробу.

Процес, під час якого в газовому середовищі з нейтральних атомів і молекул утворюються позитивні й негативні іони, називається **іонізацією, а сам газ – іонізованим**. При звичайних температурах іонізацію можна викликати наявними в газі електронами й іонами, якщо створити потужне електричне поле, в якому вони набудуть великої швидкості. Унаслідок вивільнення значної енергії ці частинки зможуть розбивати нейтральні атоми й молекули на іони.

У звичайних умовах повітря, як і всі гази, має досить слабку електропровідність. Для того щоб викликати в газі електричний струм (запалити електричну дугу) необхідно іонізувати повітряний проміжок між електродами. У зварюванні іонізацію повітряного проміжку між електродами отримують шляхом термоелектронної або автоелектронної емісії.

При **термоелектронній емісії** відрив електронів від поверхні металу відбувається під дією високої температури. Чим більша температура металу, тим більша кількість вільних електронів набуває енергії, достатньої для подолання «потенційного бар'єру» в поверхневому шарі і виходу з металу.

При **автоелектронній емісії** на електрони діє зовнішнє електричне поле, яке зменшує «потенційний бар'єр» у поверхні металу й полегшує вихід тих електронів, які усередині металу мають досить велику енергію і можуть перебороти цей бар'єр.

По довжині дугового проміжку дуга розподіляється на три області: катодну, анодну й стовп дуги. **Катодна область** містить у собі нагріту поверхню катода (катодна пляма). Температура катодної плями на сталевих електродах – 2 400–2 700 °С. **Анодна область** складається з анодної плями. Вона має приблизно таку саму температуру, що й катодна пляма, але в результаті бомбардування електронами на ній виділяється більше тепла, ніж на катоді. Стовп дуги займає найбільшу частину дугового проміжку між катодом і анодом. Основним процесом утворення заряджених часток тут є іонізація газу. Цей процес відбувається в результаті зіткнення заряджених і нейтральних часток. Сам стовп дуги не має заряду. Він нейтральний, тому що в будь-якій частині його перерізу одночасно знаходяться однакова кількість протилежно заряджених частинок. Температура стовпа дуги досягає 6 000–8 000 °С і більше.

Речовини, які входять до складу флюсу (крохмаль, декстрин, целюлоза, крейда, мармур, багаті киснем сполуки, наприклад  $\text{Fe}_2\text{O}_3$ ,  $\text{Mn}$ ), при попаданні в дугу утворюють газ, що захищає зварювальну ванну від повітря.

При дуговому зварюванні в газовому середовищі захист забезпечується наявністю аргону, аргон-гелію, азоту, вуглекислого газу, пари води.

**9.1.2 Вольт-амперна характеристика електричної дуги.** Залежність напруги дуги від струму в зварювальному ланцюзі називають **статичною вольт-амперною характеристикою** дуги.

Вольт-амперна характеристика дуги (рис. 9.1) має три області: спадаючу, жорстку й зростаючу.

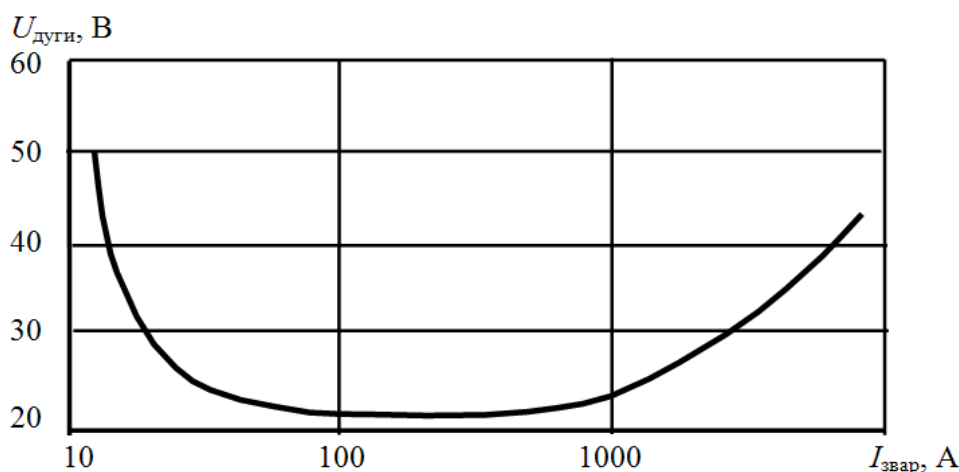


Рисунок 9.1 – Вольт-амперна характеристика дуги

Збудження дуги відбувається в такий спосіб. При короткому замиканні електрода й деталі в місцях стику їхні поверхні розігріваються. При розмиканні електродів із нагрітої поверхні катода відбувається випуск електронів – електронна емісія. Існує також безконтактне запалювання дуги за допомогою осцилятора зварювальної дуги (див. п. 9.4). **Напруга збу-**



**дження дуги** (напруга за якої між електродами виникає електрична дуга) залежить від роду струму (постійний чи змінний), дугового проміжку, матеріалу електрода й зварюваних деталей, покриття електродів і ряду інших факторів. Значення напруг, що забезпечують виникнення дуги в дугових проміжках, рівних 2–4 мм, знаходяться в межах 40–70 В.

У наслідок малої довжини стовпа дуги (4–7 мм) і низького значення лінійного градієнта потенціалу між приелектродними (біля електрода) плямами дуги робоча напруга дорівнює 8–12 В. З урахуванням того що напруга дуги складається з анодного й катодного падінь напруги, а їхні значення залежать від струму дуги, матеріалу електродів і змінюються в незначних межах, напруга на зварювальній дузі становить від 18 до 45 В. При незначному збільшенні струму напруга, необхідна для горіння дуги, знижується і ВАХ дуги набуває падаючого характеру.

В області 1 (до 100 А) зі збільшенням струму напруга значно зменшується. Це відбувається у зв'язку з тим, що при підвищенні струму збільшується поперечний переріз, а отже, і провідність стовпа дуги. В області 2 (100–1 000 А) зі збільшенням струму напруга зберігається майже постійною, тому що переріз стовпа дуги й площі анодної і катодної плям збільшуються пропорційно струму. Область характеризується сталістю щільності струму. В області 3 (понад 1 000 А) збільшення струму спричиняє зростання напруги внаслідок того, що збільшення щільності струму понад визначене значення не супроводжується збільшенням катодної плями внаслідок обмеженості перерізу електрода. Дуга області 1 горить нестійко і тому застосовується обмежено. Дуга області 2 горить стійко й забезпечує нормальний процес зварювання.

При великих зварювальних струмах ВАХ стає жорсткою. Швидкість плавлення електрода й металу, що зварюється, визначається головним чином потужністю, що виділяється на електродах, а стовп дуги виконує технологічні, а не енергетичні функції.

**9.1.3 Види електричного зварювання.** Багато видів зварювання здійснюється плавленням, тобто місцевим розплавленням з'єднаних частин за допомогою теплової енергії.

Основними джерелами тепла під час зварювання плавленням є зварювальна дуга, променеві джерела енергії і тепла, що виділяються під час електрошлакового процесу.

Джерела тепла характеризуються температурою й концентрацією, зумовленою найменшою площею нагрівання (пляма нагрівання) і найбільшою щільністю теплової енергії в плямі нагрівання.

Ці показники визначають технологічні властивості джерел нагрівання під час зварювання, наплавлення й різання.

Основні види електричного зварювання термічного класу – дугове, електрошлакове, електронно-променеве, плазмове.

**Дугове зварювання.** Необхідне для місцевого розплавлювання деталей і присадного матеріалу тепло утворює під час горіння електричної дуги між металом, що зварюється, і електродом. За способом механізації зварювання може бути ручним, механізованим і автоматичним. Механізоване й автоматичне зварювання може здійснюватися під флюсом і в захисних газах.

*Зварювання трифазною дугою* застосовується при ручному і механізованому зварюванні. Суть цього способу полягає в тому, що до двох електродів, закріплених у спеціальному тримачі, і до виробу, що зварюється, підводиться змінний струм від трифазного джерела живлення. Після збудження горить не одна дуга, як зазвичай, а одночасно три дуги: між обома електродами, між кожним електродом і виробом. Ця потрібна дуга стосовно виробу, що зварюється, є незалежною і робить розплавлювання електродів безперервним процесом, забезпечуючи високу якість звареного шва.

**Електрошлакове зварювання.** Плавлення основного металу й присадного матеріалу відбувається за рахунок тепла, що виділяється під час проходження електричного струму через розплавлений шлак. Шлаки, що оточують краплі металу, складаються з оксидів:  $Si_2$ ,  $Ti_2$ ,  $P_2O_5$ , Ca, Mn, Fe, Ba, Mg, Ni тощо, і солей різних речовин: Ca, Mn,  $Ca_2$  і ін. Шлак поліпшує фізичні властивості зварного шва. Наявні в шлаку елементи, які іонізуються, підвищують стійкість горіння дуги, що особливо важливо під час зварювання на змінному струмі.

**Електронно-променеве зварювання.** Зварювання виконується в камерах з розрядженням до  $10^{-4}$ – $10^{-6}$  мм рт. ст. Тепло виділяється внаслідок бомбардування зони зварювання електронним потоком, що набуває значної швидкості у високовольтній установці, що має потужність до 50 кВт. Анодом є деталь, що зварюється, а катодом – вольфрамова нитка або спіраль, нагріта до температури 2 300 °С.

**Плазмове зварювання.** Плавлення металів здійснюється плазмодуговим струменем температура якого вище 10 000 °С.

**Лазерне зварювання.** Зварювання базується на використанні фотоелектронної енергії. При значному посиленні світловий промінь здатний плавити метал. Для одержання такого променя застосовують спеціальні пристрої – лазери.

## 9.2 Вимоги до джерел живлення зварювальної дуги

**9.2.1 Загальні вимоги.** Електродугове зварювання починається з короткого замикання зварювального кола – контакту між електродом і деталлю. При цьому виділяється тепло й швидко розігрівається місце контакту. Ця початкова стадія вимагає підвищеної напруги зварювального струму.

Важливою умовою отримання зварного шва високої якості є стійкість процесу зварювання. Для цього джерело зварювання має забезпечити надійне збудження дуги і стабільне її горіння. Тобто вимогою до джерела живлення є забезпечення трьох режимів роботи: робочого, холостого ходу й короткого замикання.

Напруга холостого ходу ( $U_{xx}$ ) повинна в 2–3 рази перевищувати напругу горіння дуги й бути достатньою для збудження дуги та одночасно не перевищувати норм безпеки. Залежно від умов зварювання, захисту дуги, складу покриття зварювального електроду  $U_{xx}$  знаходиться в межах від 40 до 90 В. У ЕЗУ для ручного зварювання вона має значення від 60 до 80 В. Устаткування для плазмового зварювання має більш високу напругу холостого ходу.

Максимальне значення напруги холостого ходу для джерел змінного струму становить 80 В.

Потужність джерела живлення має бути достатньою для виконання зварних робіт. Також потрібно, щоб джерело живлення мало пристрій плавного регулювання сили струму.

Сила струму при короткому замиканні не повинна перевищувати зварний струм більше, ніж на 40–50 %. Джерело в цьому випадку має витримувати без перегрівання й пошкодження довгострокові короткі замикання кола зварювання. У разі наявності великих кратностей струму короткого замикання має місце перегрівання електроду й джерела живлення.

Час відновлення робочої напруги від 0 до 30 В після короткого замикання (при крапельному перенесенні металу від електроду до зварюваної деталі) має становити не більше ніж 0,05 с, що необхідно для стійкого горіння дуги.

При зміні напруги сила зварного струму не повинна істотно змінюватися. Значні відхилення від параметрів режиму зварювання призводять до зниження якості зварного з'єднання.

Збудження (запалювання) зварювальної дуги починається з короткого замикання зварювального ланцюга – контакту між електродом і деталлю. При цьому відбувається виділення тепла й швидке розігрівання місця контакту. Ця початкова стадія вимагає підвищеної напруги зварювального струму.

Надалі відбувається деяке зменшення опору дугового проміжку (внаслідок емісії електронів з катода й появи об'ємної іонізації газів у дузі), що спричиняє зниження напруги до межі, необхідної для підтримання стійкого горіння дуги. У процесі зварювання при переході крапель електродного металу в зварювальну ванну відбуваються дуже часті короткі замикання зварювального ланцюга. Разом з цим змінюється довжина зварювальної дуги. При кожному короткому замиканні напруга падає до нульового значення. Для наступного відновлення дуги необхідна напруга порядку 25–30 В. Така напруга повинна бути забезпечена за час не більш ніж 0,05 с, щоб підтримати горіння дуги в період між короткими замиканнями.

Необхідно зважати та те, що при коротких замиканнях зварювального кола розвиваються великі струми (струми короткого замикання), які можуть спричинити перегрівання у проводці й обмотках джерела струму. Ці умови процесу зварювання здебільшого й визначають вимоги до джерел живлення зварювальної дуги. Для забезпечення стійкого процесу зварювання джерела живлення дуги повинні задовольняти наступним вимогам:

- *напруга холостого ходу* має бути достатньою для легкого збудження дуги, водночас вона повинна відповідати нормам техніки безпеки. Для однопостових зварювальних генераторів напруга холостого ходу не повинна перевищувати 80 В, а для багатопостових – 60 В. Для зварювальних трансформаторів встановлена найбільша припустима напруга 70 В при зварювальній силі струму понад 200 А і напруга 100 В при зварювальній силі струму менше ніж 100 А;

- *напруга горіння дуги* (робоча напруга) має швидко встановлюватися й змінюватися залежно від довжини дуги, забезпечуючи стійке горіння зварювальної дуги. Зі збільшенням довжини дуги напруга має швидко зростати, а зі зменшенням – швидко падати. Час відновлення робочої напруги від 0 до 30 В після кожного короткого замикання (при краплинному переносі металу від електрода до зварюваної деталі) не повинен перевищувати 0,05 с;

- значення сили струму короткого замикання не має перевищувати зварювальне значення сили струму більш ніж на 40–50 %. При цьому джерело струму повинно витримувати тривалі короткі замикання зварювального кола. Ця умова необхідна для запобігання перегрівання й ушкодження обмоток джерела струму;

- потужність джерела струму повинна бути достатньою для виконання зварювальних робіт;

- зовнішня характеристика джерела живлення має відповідати заданим умовам режиму зварювання.

Окрім того, необхідно мати пристрої, що дають змогу регулювати значення зварювальної сили струму в потрібних межах. Зварювальне устаткування повинно відповідати вимогам державних стандартів.

До параметрів і характеристик ЕЗУ відносять наступні: напруга системи живлення, номінальний зварювальний струм; номінальна робоча напруга; межі регулювання струму; напруга холостого ходу;  $\cos\phi$ ; ККД; зовнішня характеристика, режим роботи.

Основними технічними показниками джерел живлення зварювальної дуги є зовнішня характеристика, напруга холостого ходу, відносна тривалість роботи, відносна тривалість вмикання.

**9.2.2 Вимоги до зовнішньої характеристики.** Залежність між напругою на вихідних клеммах ЕЗУ і струмом у зварювальному ланцюзі називається *зовнішньою характеристикою*. По суті, це вихідна ВАХ зварювального апарату.

На рисунку 9.2 подані основні види зовнішніх характеристик джерел живлення зварювального устаткування: 1 – крутоспадаюча; 2 – пологоспадаюча; 3 – жорстка; 4 – зростаюча. Різновид ВАХ джерела залежить від режиму зварювання і ВАХ дуги, яка використовується в конкретному зварювальному устаткуванні.

Залежно від способу формування зовнішня характеристика може бути природною або штучною, одержаною за допомогою електронних засобів регулювання.

Крутоспадаючу характеристику 1 (рис. 9.2) використовують для ручного дугового зварювання покритим електродом, що плавиться, а також автоматичного зварювання під флюсом. Підвищена напруга холостого ходу забезпечує надійне початкове й повторне запалювання дуги. Характеристики 2 і 3 відповідають механізованому зварюванню під флюсом у разі використання тонких електродних дротів і підвищеної щільності струму. Для зварювання у захисних газах електродами що плавляться, застосовують жорстку ВАХ. Живлення дуги з спадаючою або жорсткою ВАХ забезпечують джерела з спадаючою або пологоспадаючою зовнішньою характеристикою. Живлення дуги зі зростаючою ВАХ забезпечують джерела з жорсткою або зростаючою ВАХ.

Щоб дуга була стійкою, її статична характеристика повинна відповідати зовнішній статичній характеристиці джерела струму. Для цього необхідно, щоб вольт-амперні характеристики дуги й відповідні характеристики джерела живлення перетиналися в одній точці (рис. 9.3), тобто в точці, де  $U_d = U_{дж}$ . Із графіків (рис. 9.3) зрозуміло, що у джерела з крутоспадаючою характеристикою при зміні довжини дуги відбувається незначна зміна зварювального струму ( $\Delta I_{к.п.}$ ), а у джерела з пологоспадаючою характеристикою навіть незначна зміна довжини дуги спричиняє значне змінювання зварювального струму ( $\Delta I_{п.п}$ ).

Вимоги до виду зовнішніх характеристик визначаються такими показниками зварювального процесу, як тип електрода (плавиться, не плавиться), особливості середовища, у якому відбувається зварювання (відкрита дуга, дуга під флюсом, у захисних газах); ступінь механізації (ручне, механізоване, автоматичне зварювання); спосіб регулювання режиму горіння дуги (саморегулювання, автоматичне регулювання напруги дуги).

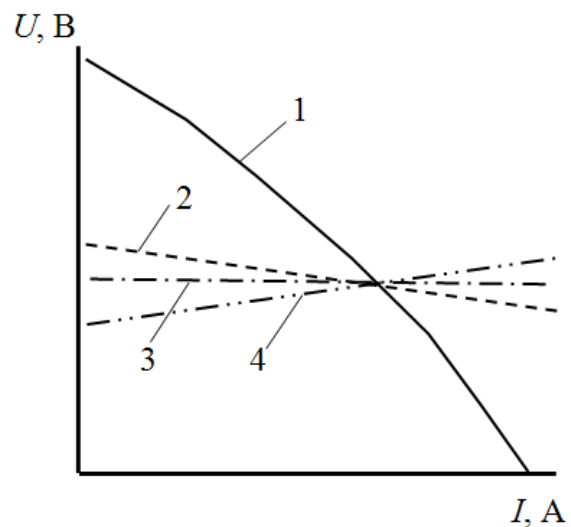


Рисунок 9.2 – Зовнішня характеристика джерела живлення

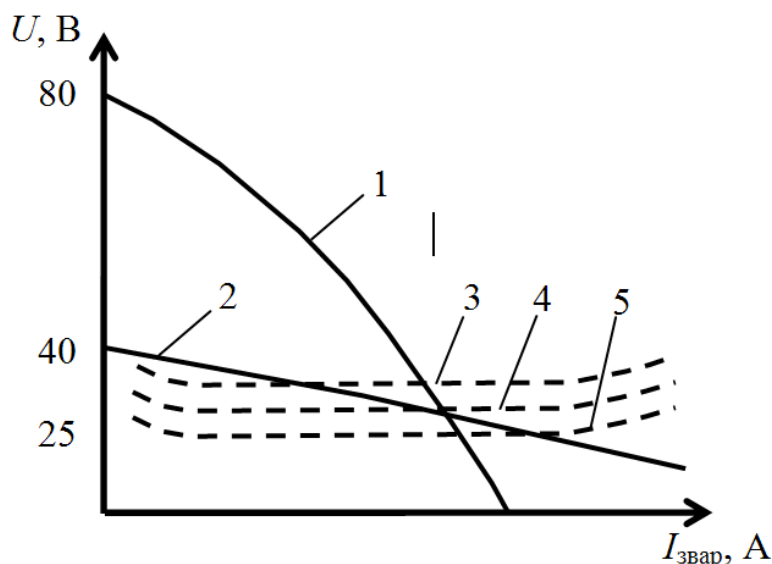


Рисунок 9.3 – Зовнішні характеристики джерел (1 – крутоспадаюча, 2 – пологоспадаюча) і вольт-амперні характеристики дуги (3 – довга дуга, 4 – нормальна дуга, 5 – коротка дуга)

При зварюванні в автоматичному режимі під флюсом із саморегулюванням дуги, що має жорстку характеристику, ВАХ джерела живлення має бути пологоспадаючою для підвищення саморегулювання дуги. При зварюванні ж у середовищі захисних газів і при великій щільності постійного струму в електроді ВАХ дуги зростаюча. Таким чином, зовнішня характеристика джерела живлення, щоб якомога більше активувати саморегулювання, має бути жорсткою або зростаючою. Джерела живлення повинні забезпечувати можливість налаштування різних режимів зварювання – встановлення заданих значень струму й напруги, що забезпечують зварювальний струм.

Оцінюють динамічні характеристики джерела живлення за швидкістю наростання напруги на його затискачах при переході від режиму короткого замикання до режиму холостого ходу. При цьому важливим є час наростання напруги від нуля до напруги збудження дуги й час відновлення напруги: кожен із цих параметрів не повинен перевищувати 0,03 секунди.

Як джерела живлення зварювальної дуги застосовують джерела змінного струму (зварювальні трансформатори), джерела постійного струму (зварювальні генератори) і напівпровідникові зварювальні випрямлячі. Зазначимо, що зварювальні генератори не відносяться до електроспоживачів через відсутність взаємодії з системою електропостачання (див. рис. 2.3).

Зварювальні трансформатори за техніко-економічними показниками мають переваги порівняно з джерелами постійного струму. Вони простіші в експлуатації, мають більший термін експлуатації, більший ККД.

Джерела постійного струму мають технологічні переваги: більша стійкість горіння дуги, поліпшені умови зварювання в різних просторових положеннях.

**9.2.3 Режим роботи джерела живлення.** Режим роботи ЕЗУ характеризується чергуванням часу процесу зварювання  $t_{зв}$  і часу холостого ходу  $t_{хх}$  або вимкненого стану (паузи)  $t_{п}$ . Протягом холостого ходу або паузи виконують зміну електродів, зборку заготовок, очищення шва від шлаку і при цьому охолоджується джерело живлення. Час роботи джерела живлення не має бути тривалим щоб уникнути неприпустимого перегорання обмоток силової частини.

**Відносна тривалість роботи** (ТР) характеризує роботу ЕЗУ, яке під час перерви не вимикають з електричної мережі і воно продовжує працювати в режимі холостого ходу (випадок ручного зварювання). Вона визначається як відношення середнього часу роботи при навантаженні (процес зварювання) до тривалості повного циклу роботи ( $t_{ц} = t_{зв} + t_{хх}$ ) і виражається у відсотках:

$$ТР = t_{зв} / ( t_{зв} + t_{хх} ) 100 \% . \quad (9.1)$$

Повторно-короткочасний режим (див. розділ 3.3) характеризується **відносною тривалістю вмикання** ТВ. Для ЕЗУ вона визначається

$$ТВ = t_{зв} / ( t_{зв} + t_{п} ) 100 \% . \quad (9.2)$$

Оптимальним значенням ТР прийнято 60 %. Розходження між ТР і ТВ полягає в тому, що в першому випадку джерело живлення під час паузи не відключаються від мережі й при розімкнутому зварювальному ланцюзі працює на холостому ході, а в другому випадку джерело повністю відключаються від мережі, що має місце при механізованому зварюванні.

### 9.3 Електрозварювальне устаткування змінного струму

Джерела живлення зварювальної дуги змінного струму – це зварювальні трансформатори, які бувають одно- й трифазними, а за кількістю зварювальних постів – одно й багатопостовими.

За можливістю одержання падаючих зовнішніх характеристик й регулювання струму джерела живлення бувають двох типів: трансформатори із нормальним магнітним розсіюванням, що складаються з двох окремих апаратів (трансформатор і дросель), і трансформатори зі збільшеним магнітним розсіюванням (із рухливими котушками, з магнітними шунтами, зі східчастим регулятором).

Конструктивно зварювальні апарати змінного струму поділяють на чотири основні групи:

- з окремим дроселем;
- із вбудованим дроселем;
- з рухомим магнітним шунтом;
- зі збільшеним магнітним розсіюванням і рухомою обмоткою.

Ці групи різняться за конструкцією і електричною схемою. Зварювальні апарати складаються зі знижувального трансформатора й спеціального пристрою. Трансформатор забезпечує живлення дуги змінним струмом напру-

гою 60–70 В, а спеціальний пристрій слугує для створення спадної зовнішньої характеристики й регулювання величини зварювального струму.

У будівельному виробництві для ручного зварювання на змінному струмі широко застосовують однофазні трансформатори. Вони допускають можливість регулювання зварювального струму змінюванням реактивного опору зварювального ланцюга. Цей опір можна змінювати, регулюючи повітряний проміжок у магнітопроводі дроселя, а також змінюванням потоку розсіювання. Зварювальні трансформатори працюють у повторно-короткочасному режимі. Трансформатори використовуються як у закритих приміщеннях, так і на відкритому повітрі.

**Зварювальні апарати з окремим дроселем** (рис. 9.4) складаються зі знизувального трансформатора й дроселя. Трансформатор Т має осердя (магнітопровід) 2 зі штампованих пластин, виготовлених із тонкої трансформаторної сталі товщиною 0,5 мм. На осерді розташовані первинна 1 і вторинна 3 обмотки. Первинна обмотка з ізолюваного проводу вмикається в мережу змінного струму напругою 220 або 380 В. У вторинній обмотці, виготовленій з мідної шини, створюється напруга 60–70 В. Невелике магнітне розсіювання й малий омичний опір обмоток забезпечують незначне внутрішнє падіння напруги та високий ККД трансформатора.

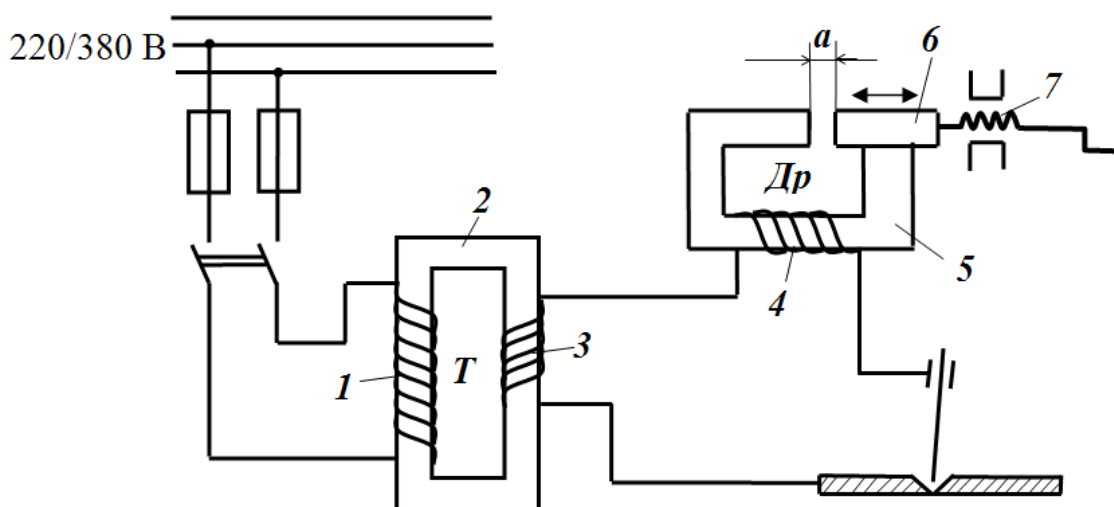


Рисунок 9.4 – Схема зварювального трансформатора з окремим дроселем: 1, 3 – первинна й вторинна обмотки відповідно; 2 – осердя; 4 – обмотка дроселя; 5, 6 – нерухома й рухома частини осердя відповідно; 7 – гвинтовий механізм;  $a$  – проміжок

Послідовно вторинній обмотці у зварювальне коло увімкнено обмотку 4 дроселя Др (регулятора струму). Осердя (магнітопровід) дроселя набране з пластин тонкої трансформаторної сталі й має дві частини: нерухому 5, на якій розташована обмотка дроселя, і рухому 6, яка переміщується за допомогою гвинтового механізму 7.



Дросель призначений для регулювання сили зварювального струму й створення спадної зовнішньої характеристики трансформатора на дузі. Під час збудженні дуги (при короткому замиканні) великий струм, проходячи через обмотку дроселя, створює потужний магнітний потік, який наводить ЕРС дроселя, спрямовану проти напруги трансформатора. Вторинна напруга, що розвивається трансформатором, повністю поглинається падінням напруги в дроселі. Напруга у зварювальному колі досягає майже нульового значення.

Під час виникнення дуги сила зварювального струму зменшується. Після цього зменшується ЕРС самоіндукції дроселя, спрямована проти напруги трансформатора, і у зварювальному колі встановлюється робоча напруга, необхідна для стійкого горіння дуги, менша за напругу холостого ходу. Змінюючи величину проміжку  $a$  між нерухомим і рухомим магнітопроводом дроселя, змінюють індуктивний опір дроселя, а отже, силу струму у зварювальному колі. У разі збільшення проміжку магнітний опір магнітопроводу дроселя збільшується, магнітний потік слабшає, зменшується ЕРС самоіндукції котушки та її індуктивний опір. Це призводить до зростання зварювальної сили струму. При зменшенні проміжку сила зварювального струму зменшується.

За цією схемою виготовлені й експлуатуються зварювальні трансформатори типу СТЕ-24У, СТЕ-34У [54]. Такі трансформатори широко застосовуються на будівельно-монтажних майданчиках, на заводах, під час зварювання магістральних трубопроводів.

**Зварювальні апарати з убудованим дроселем** (рис. 9.5). Магнітопровід трансформатора складається з основного осердя  $1$  (на якому розташовані первинна  $2$  й вторинна  $6$  обмотки трансформатора) і додаткового осердя  $4$  з обмоткою дроселя  $5$  (регулятор сили струму). Додатковий магнітопровід розташований над основним і складається з нерухомої й рухомої частин, між якими за допомогою гвинтового механізму  $3$  встановлюється необхідний повітряний проміжок  $a$ .

Силу зварювального струму регулюють шляхом змінювання повітряного проміжку  $a$ : що більше проміжок  $a$ , то більша сила зварювального струму.

Головною перевагою трансформаторів цієї серії є компактність, менші витрати міді й трансформаторної сталі; при зміні струму від великого значення до мінімального напруга холостого ходу трохи збільшується, що забезпечує високу стійкість горіння зварювальної дуги.

Такою є схема зварювальних і трансформаторів типу СТН-500, ТСД-500 та ін. [54].

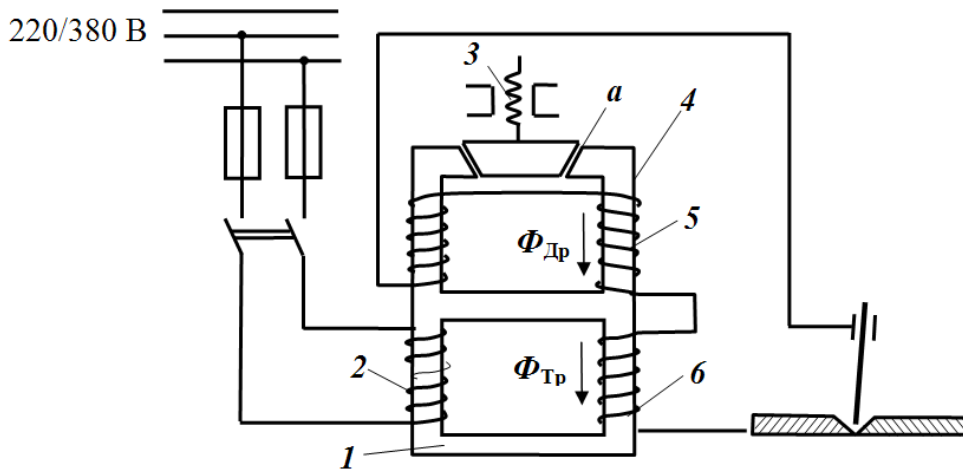


Рисунок 9.5 – Схема зварювального трансформатора з убудованим дроселем: 1 – осердя; 2, 6 – обмотки трансформатора первинна й вторинна відповідно; 3 – гвинтовий механізм; 4 – додаткове осердя; 5 – обмотка дроселя; а – проміжок

**Зварювальні апарати з рухомим магнітним шунтом** (рис. 9.6) мають суцільний замкнений магнітопровід, у якому на одному стрижні розташовані первинна 4 і вторинна 3 обмотки, а на іншому – реактивна обмотка 1. Між ними розміщується пересувний магнітний шунт – стрижень 2. Шунт замикає магнітні потоки первинної і реактивної обмоток, утворюючи магнітні потоки розсіювання, які мають значний індуктивний опір. У такий спосіб забезпечується падаюча зовнішня характеристика трансформатора.

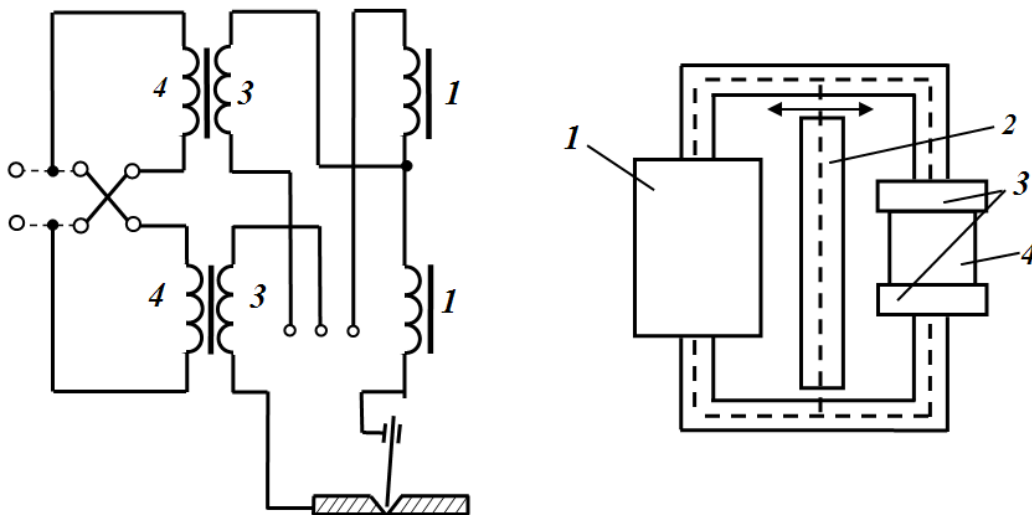


Рисунок 9.6 – Схема зварювального апарата з рухомим магнітним шунтом: 1 – реактивна обмотка; 2 – магнітний шунт; 3, 4 – обмотки, вторинна й первинна відповідно

Силу зварювального струму регулюють шляхом переміщенням магнітного шунта уздовж напрямку магнітного потоку. При висуванні шунта розсіювання магнітних потоків первинної й реактивної обмоток зменшується, унаслідок чого зменшується індуктивний опір трансформатора. При цьому

значення сили зварювального струму зростає. За таким принципом працюють зварювальні апарати типу СТАН-0, ОСТА-350 та ін. [54].

**Зварювальні апарати зі збільшеним магнітним розсіюванням і рухомою обмоткою** без дроселя. Трансформатор має магнітопровід у вигляді стрижнів, на яких розташовані по дві котушки: одна – з первинною обмоткою, друга – із вторинною. Котушки обмоток з'єднані паралельно. Первинна котушка закріплена нерухомо. Котушка вторинної обмотки переміщується гвинтовим механізмом вручну. Сила зварювального струму регулюється шляхом змінювання відстані між котушками первинної і вторинної обмоток трансформатора. Цим способом змінюють опір потоку розсіювання й, відповідно, індуктивність трансформатора: зі збільшенням опору шунтуючого ланцюга індуктивність розсіювання трансформатора знижується, а зварювальний струм, відповідно, збільшується.

За цим принципом працюють трансформатори типу ТС і ТСК з алюмінієвими обмотками.

Трансформатори з підвищеним магнітним розсіюванням застосовують здебільшого під час ручного дугового зварювання.

**Трифазні зварювальні трансформатори** застосовують для зварювання за допомогою трифазної дуги зі спареними електродами. Використання трифазних зварювальних апаратів має велике економічне значення, оскільки вони забезпечують високу продуктивність, економію електроенергії (ККД досягає 0,9) і рівномірне завантаження фаз мережі при високому коефіцієнті потужності ( $\cos\varphi \leq 0,8$ ). Однак зварювання трифазним струмом використовується обмежено внаслідок складності зварювального обладнання.

Зварювання трифазною дугою підвищує якість зварювання, продуктивність зварювання, заощаджується електроенергія, знижується споживання реактивної потужності з мережі, рівномірно розподіляється навантаження між фазами. На рисунку 9.7 подана схема трифазного зварювального трансформатора. Трансформатор Т обладнаний дроселем-регулятором зварювального струму. Дросель має три обмотки, розташовані на різних стрижнях магнітопроводу 1 і 2. Дві обмотки регулятора 3 і 4 розташовані на одному стрижні й включаються послідовно з електродами 7, обмотка 5 на другому стрижні підключається до зварюваної конструкції 6. Струм регулюють двома способами: за допомогою змінювання повітряного проміжку шляхом переміщення рухливої частини осереддя 1; регулюванням струму за фазою шляхом переміщення обмотки 5 щодо обмоток 3 і 4.

При трифазному зварюванні одночасно горять три дуги: дві – між кожним з електродів 7 і зварюваним виробом 6; одна дуга – між двома електродами 7. У разі припинення горіння дуги автоматично вимикається магнітний контактор КМ, що своїми контактами відключає зварювальний трансформатор Т від мережі, знижуючи споживання реактивної потужності на холостому ході. Для трифазного зварювання потрібні спарені електроди із загальним покриттям.

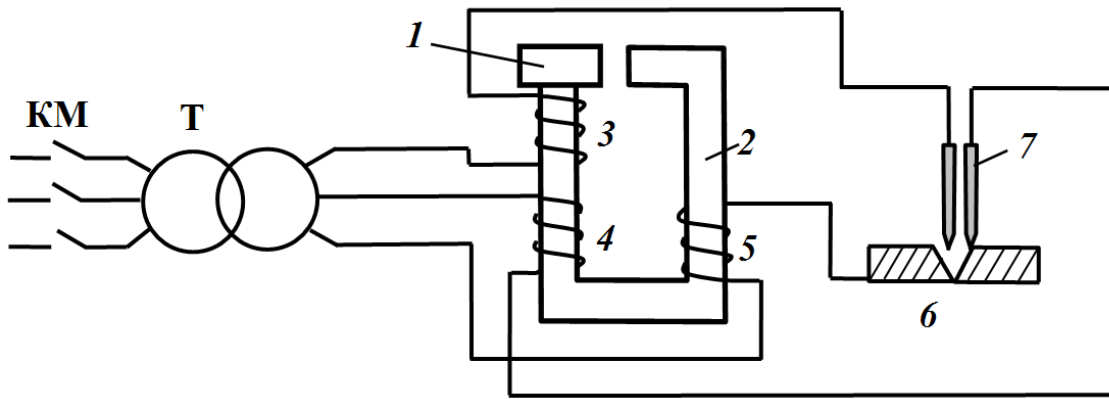


Рисунок 9.7 – Трифазний зварювальний трансформатор:  
 1 – рухома частина магнітопроводу; 2 – магнітопровід; 3, 4, 5 – обмотки дроселя; 6 – зварювані деталі; 7 – електроди; Т – трансформатор; КМ – контактор

Технічні характеристики деяких зварювальних трансформаторів наведені в додатку Б.

#### 9.4 Зварювальні осцилятори

У деяких випадках для підвищення стійкості горіння дуги, що живиться змінним струмом, застосовують спосіб накладення на зварювальний струм частотою 50 Гц струмів високої частоти (150–500 кГц) і високої напруги (1 500–6 000 В). Такі заходи застосовують під час зварювання тонкостінних виробів дугою малої потужності і при зварювальному струмі 20–40 А, а також під час зварювання в захисних газах, зварювання спеціальних сталей і деяких кольорових металів.

На рисунку 9.8 показано схему зварювального осцилятора, який забезпечує одержання струмів високої частоти й високої напруги. Основні складові осцилятора (рис. 9.8): FU1 – мережний запобіжник; LC-контури (C1–C4, L1–L2) – заводозахисний фільтр; T1 – трансформатор, що підвищує напругу до 3–10 кВ; F, C5, T2 – коливальний контур, що підвищує частоту струму зварювання до 200–400 кГц; C6 – фільтр низьких частот; FU2 – запобіжник кола зварювання.

При застосуванні осцилятора дуга загоряється легко, навіть без дотикування електрода до виробу (при проміжку 1–2 мм), що пояснюється попередньою іонізацією повітряного проміжку між електродом і зварюваними деталями.

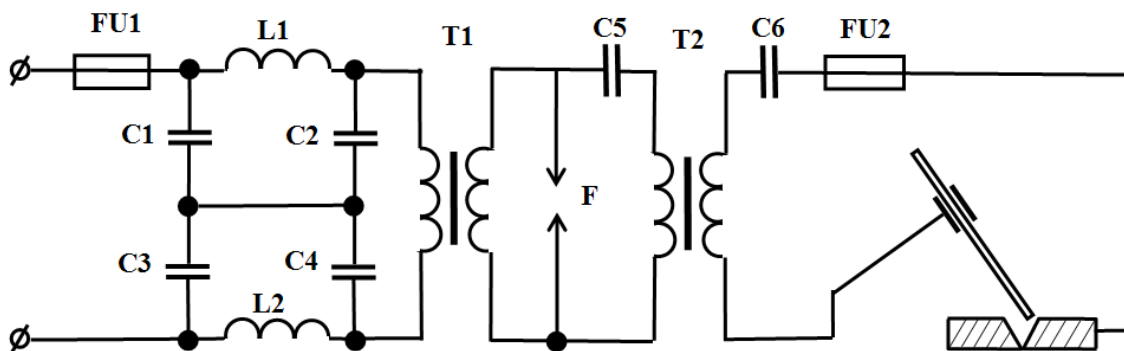


Рисунок 9.8 – Схема зварювального осцилятора

## 9.5 Зварювальні випрямлячі

На сьогодні розроблені й випускаються зварювальні випрямлячі для ручного або механізованого дугового зварювання під флюсом, зварювання в захисних газах та ін. Вони широко застосовуються, оскільки вирізняються важливими конструктивними й технологічними перевагами:

- високий ККД і відносно невеликі втрати холостого ходу;
- високі динамічні властивості при меншій електромагнітній індукції;
- відсутність обертових частин і безшумність під час роботи;
- рівномірність навантаження фаз;
- невелика маса.

Зварювальні випрямлячі складаються з двох основних блоків: понижувального трифазного трансформатора з пристроями для регулювання напруги або струму й випрямного блоку. Крім того, випрямляч має пуско-регулюючий і захисний пристрій, що забезпечують нормальну його експлуатацію.

Існують дві типові схеми: однофазна мостова (рис. 9.9, *a*) і трифазна мостова (рис. 9.9, *б*). Частіше застосовують трифазну мостову схему, яка має низку переваг, зокрема забезпечує менші коливання напруги й рівномірне навантаження трифазної мережі.

Для випрямлення струму у зварювальних випрямлячах здебільшого застосовують селенові або кремнієві діоди. Щоб усунути пульсації й підтримати стабільність процесу зварювання у ланцюг умикається індуктивність, значення якої залежить від режимів зварювання. Широко застосовуються різноманітні схеми, що забезпечують мінімальну пульсацію випрямленого струму як під час ручного, так і під час автоматичного зварювання.

Падаюча характеристика випрямляча створюється ввімкненням у зварювальний ланцюг реактивної котушки або застосуванням трансформатора з посиленням магнітним розсіюванням. У багатопостових зварювальних випрямлячах для створення падаючої зовнішньої характеристики й регулювання зварювального струму у зварювальний ланцюг кожного поста включають баластний реостат.

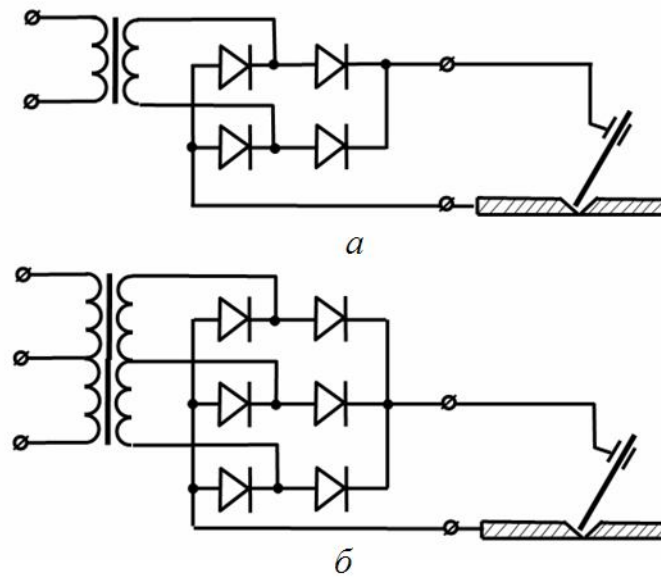


Рисунок 9.9 – Схеми зварювальних випрямлячів:  
 а – однофазна мостова; б – трифазна мостова

Технічні дані деяких зварювальних випрямлячів наведені в додатку Б.

### 9.6 Устаткування контактного зварювання

**Контактне зварювання, або зварювання під тиском – це спосіб зварювання деталей, при якому концентроване виділення тепла в зоні стику зумовлюється значним перевищенням в цьому місці активного опору щодо опору самих деталей.** Кількість тепла, що виділяється в місці стику, визначається за відомою формулою:

$$Q = 0,24 \cdot I^2 \cdot R_{\text{п}} \cdot t, \quad (9.3)$$

де  $R_{\text{п}}$  – перехідний опір у місці стику.

На рисунку 9.10 подано схеми роботи устаткування контактного зварювання: стикового (рис. 9.11, а), точкового (рис. 9.11, б) й роликового (рис. 9.11, в). Вони широко застосовуються під час зварювання арматур і металевих конструкцій.

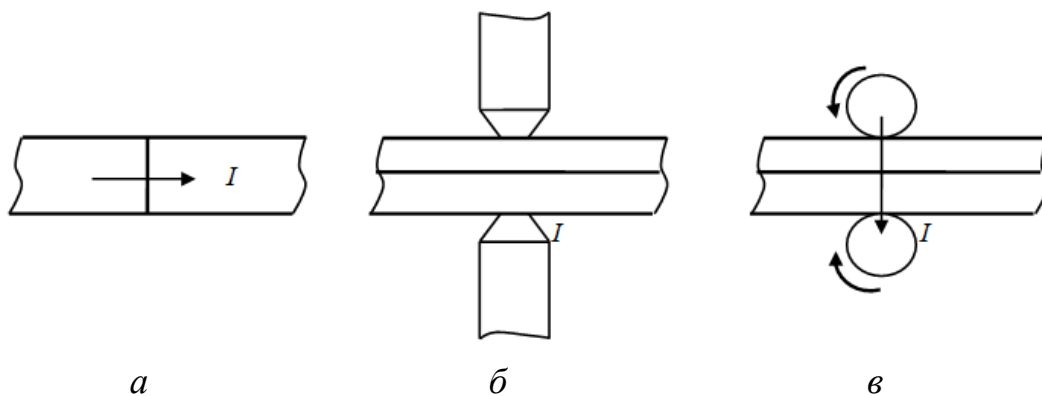


Рисунок 9.10 – Основні способи контактного зварювання

Найбільша потужність машин промислового виготовлення, призначених для контактного зварювання, досягає 750 кВА. Ці машини забезпечують зварювання заготовки з перерізом до 3 500 мм<sup>2</sup> і деталі товщиною до 32 мм.

Для контактного зварювання можна використовувати як постійний, так і змінний струм. Однак на практиці переважно застосовують змінний струм, оскільки струм у тисячі ампер і напруга в кілька вольт, необхідні при зварюванні, досить легко, без значних капітальних витрат, можна отримати на змінному струмі за допомогою трансформаторів.

Подача зварювального струму може бути або безперервною (у деяких випадках при роликовому зварюванні), або переривчастою.

Необхідну тривалість струму підтримують реле часу, а включення й вимикання зварювального струму виконується тиристорами.

## **Висновки**

При електродуговій зварці, розплавлення металу зварюваних кромek деталей і електроду або присадного металу здійснюється за рахунок тепла, що виділяється електричною дугою.

Електродугове зварювання починається з короткого замикання зварювального кола, що спричиняє виділення тепла й швидке розігрівання місця контакту. Ця стадія зварювання потребує підвищення напруги, що призводить до великих струмів у зварювальному ланцюзі (струмів короткого замикання), які можуть спричинити перегрівання в проводці й обмотках джерела струму.

На практиці застосовують зварювальне устаткування постійного і змінного струму.

Перевагами зварювальних випрямлячів на постійному струмі є вищий ККД, відсутність частин, що обертаються, мала маса й габарити, дешевизна.

Трифазні зварювальні апарати забезпечують економію електроенергії, рівномірне завантаження фаз мережі, високий коефіцієнт потужності cosφ.

Головною особливістю зварювальних джерел струму є те, що вони здатні витримувати під час роботи багаторазове коротке замикання в колі зварювального струму.

При напівавтоматичному зварюванні подача електроду вздовж його осі в зону дуги механізована, а переміщення електроду вздовж зварюваного шва зварювач здійснює вручну. При автоматичному зварюванні механізовані всі операції, необхідні для процесу зварювання.

## **Запитання для самоперевірки**

1. Поясніть, у чому полягають особливості фізичних процесів електричного зварювання?

2. Охарактеризуйте вольт-амперну характеристику електричної дуги? Поясніть її особливості.

3. Сформулюйте основні вимоги щодо джерел живлення зварювальної дуги. Чим вони зумовлюються?
4. Які види електричного зварювання застосовуються у промисловості?
5. Які вимоги висувають щодо джерел живлення зварювальної дуги?
6. Поясніть особливості режимів роботи джерел живлення зварювальної дуги.
7. Поясніть принцип роботи зварювального трансформатора з окремим дроселем.
8. Як працює зварювальний трансформатор з убудованим дроселем?
9. Охарактеризуйте особливості зварювальних осциляторів
10. Поясніть схеми зварювальних випрямлячів.
11. Поясніть роботу устаткування контактного зварювання?
12. Поясніть переваги і недоліки випрямних зварювальних установок.
13. Як і за якими ознаками класифікують зварювальні апарати змінного струму?
14. Поясніть призначення і особливості установок контактного зварювання. Для яких видів зварювання їх застосовують?

### **Список рекомендованих джерел**

Основна література: [28, С. 305–315], [54, С. 265–286], [3, С. 286–287].  
Додаткова література: [24], [42, 772–775].



## Розділ 10 ЕЛЕКТРОСПОЖИВАЧІ БУДІВЕЛЬНИХ МАЙДАНЧИКІВ

**Ключові поняття:** вантажопідіймальна машина, кранові електродвигуни, апаратура керування, контролер, командо-контролер, контактор, магнітний пускач, реле часу, проміжне реле, реле мінімального струму, реле максимального струму, теплове реле, електрична ручна машина, клас ізоляції, комбінований електромеханізм, вібратор.

Споживачами електричної енергії у будівництві є будівельні майданчики та підприємства будівельного виробництва (допоміжні підприємства з виробництва бетону, розчину, ремонтні цехи, освітлювальне й побутове електроустаткування).

Електропостачання об'єктів будівництва забезпечується в основному від районних електричних мереж, а у разі їхньої відсутності – від тимчасових пересувних електростанцій потужністю до 1 500 кВт, що працюють від дизельних двигунів, при більшій потужності – від енергопоїздів, обладнаних паровими турбінами потужністю 1 500–5 000 кВт. Тимчасові електричні мережі на будівництві зазвичай виконуються повітряними лініями напругою 10 і 6 кВ, а також напругою 400/230 В для безпосереднього приєднання до них електроприймачів. Мережі розраховуються на сполучене живлення всіх видів електроспоживачів (силових, освітлювальних і технологічних) шляхом приєднання їх до комплектних трансформаторних підстанцій із силовими трансформаторами потужністю від 30 до 560 кВт.

У будівництві електроенергія використовується для виконання основних і допоміжних технологічних процесів. На об'єктах будівництва споживачами ЕЕ є силові обладнання (електропривод будівельно-монтажних кранів і землерийних машин, насосних і компресорних установок, транспортних машин, верстати в ремонтних майстернях), освітлювальне устаткування (на будівельних майданчиках, в адміністративних, складських, житлових і культурно-побутових будинках), технологічне устаткування (електрозварювання, електропрогрівання ґрунту, бетону, залізобетону, сушіння штукатурки), допоміжне технологічне устаткування (тимчасове обігрівання побутових приміщень, нагрівання води, просушування одягу тощо).

Обсяги споживання ЕЕ залежать від масштабів будівельних майданчиків, які поділяються на великі (будівництво великих підприємств або їхніх комплексів), середні (будівництво середніх підприємств) і дрібні (будівництво житлових будинків, об'єктів соціально-культурного призначення).

Електроприймачі будівельних майданчиків зазвичай входять до складу технологічного устаткування, яке можна поділити на такі характерні групи:

– виробничі машини й механізми (будівельно-монтажні крани, землерийні машини, насоси, верстати різного призначення), електроприймачами в яких є електродвигуни, що перетворюють електричну енергію на механічну;

- термічні установки, приймачами в які є нагрівачі, які перетворюють електричну енергію в теплову;
- устаткування електростатичного й електромагнітного поля, електричні фільтри;
- високочастотне устаткування;
- ручний електрифікований інструмент (електричні дрилі, ножівки, гайковерти, вібратори для укладання бетону, фарбопульти тощо);
- устаткування електричного освітлення.

**Електричні двигуни** застосовуються у приводах різних виробничих механізмів. Детально ці електроприймачі було розглянуто в розділі 6. Далі будуть розглянуті особливості електричних двигунів приводу вантажопідіймальних машин.

**Електротермічне устаткування** детально розглянуте в розділах 7 і 11.

**Устаткування електростатичного й електромагнітного поля** застосовується як технологічне для електричного фарбування, уловлювання твердих часток у газі за допомогою електричних фільтрів, для відділення феромагнітних часток у сумішах.

**Устаткування електричного освітлення** застосовують для внутрішнього й зовнішнього освітлення будівельних робіт у нічний період або в темних приміщеннях з використанням ламп розжарювання, люмінесцентних, ртутних, натрієвих, ксенонових ламп.

**Ручний електрифікований інструмент** розглянуто в розділі 10.4.

## 10.1 Вантажопідіймальні машини

До вантажопідіймальних машин (далі – ВПМ), які використовують у будівництві й на підприємствах будівельної індустрії, належать стрілові, баштові, козлові, мостові й інші крани, а також підйомники різного призначення. Електрообладнання цих машин відрізняється однаковими конструктивними особливостями й призначенням. Вимоги до влаштування електрообладнання кранів викладено в розділі 6 ПУЕ [42, С. 756–766].

Робота електрообладнання ВПМ характеризується такими особливостями:

- режим роботи – повторно-короткочасний;
- часте змінювання напрямку обертання (реверс);
- необхідність регулювання частоти обертання привода;
- значне перевантаження, вібрації;
- ускладнений доступ для обслуговування й ремонту;
- необхідність працювати в умовах забруднення, вологості, значного перепаду температур.

Для забезпечення наведених умов роботи електрообладнання ВПМ має відповідати вимогам щодо підвищеної міцності, мати високоякісну ізоляцію та надійний захист від впливу навколишнього середовища. Цим вимогам задовольняють машини й апарати спеціального кранового виконання.

*Електрообладнання ВПМ за призначенням поділяють на основне (обладнання електропривода) й допоміжне (обладнання робочого і ремонтного освітлення й опалення).*

*До основного електрообладнання належать:*

- електродвигуни;
- апарати керування електродвигунами – контролери, командо-контролери, контактори, магнітні пускачі, реле керування;
- апарати регулювання частоти обертання електродвигунів – пускорегулюючі реостати, гальмові машини;
- апарати керування гальмами – гальмові електромагніти й електрогідравлічні штовхачі;
- апарати електричного захисту – захисні панелі, автоматичні вимикачі, максимальні й теплові реле, запобіжники, розподільні ящики й апарати, що забезпечують максимальний і нульовий захист електродвигунів;
- апарати механічного захисту – кінцеві вимикачі й обмежувачі вантажопідйомності, що забезпечують захист крана і його механізмів від переходу крайніх положень і перевантаження;
- напівпровідникові випрямлячі, що забезпечують живлення обмоток збудження гальмових машин, обмоток магнітних підсилювачів, силових кіл і кіл керування деяких типів кранів;
- генератори змінного й постійного струмів, які застосовують на деяких типах баштових кранів як джерела живлення для всього електрообладнання або електрообладнання приводів окремих механізмів;
- апарати й прилади, які використовують для різних перемикачів і контролю в силових колах і колах керування: кнопки, вимикачі, перемикачі, вимірювальні прилади.

*До допоміжного обладнання належать:*

- освітлювальні прилади (світильники, прожектори);
- прилади електрообігрівання (електропечі, нагрівачі);
- прилади звукової сигналізації (дзвінки, сирени);
- апарати керування й захисту (трансформатори, вимикачі, запобіжники та ін.), встановлені в колах освітлення й опалення.

## **10.2 Електродвигуни вантажопідіймальних машин**

На ВПМ застосовують електричні машини як постійного, так і змінного струму. У цьому розділі розглянуто особливості електродвигунів ВПМ.

**10.2.1 Кранові електродвигуни.** Електродвигуни спеціального кранового типу призначені для роботи як у приміщенні, так і на відкритому повітрі. Тому їх виготовляють закрити, із самовентиляцією (асинхронні двигуни) або з незалежною вентиляцією (двигуни постійного струму) і з вологостійкою ізоляцією. Оскільки двигуни розраховані на складні умови

роботи, їх виготовляють із підвищеною міцністю. Усі кранові електродвигуни характеризуються підвищеною перевантажувальною здатністю, великими пусковими моментами при порівняно невеликих пускових струмах і малій тривалості розгону. Відношення пускового моменту до номінального коливається в межах 2,3–3,2.

Кранові електродвигуни з контактними кільцями єдиної серії МТФ, МТН, 4МТН і з короткозамкненими кільцями, 4МТКФ призначені для приводу механізмів, робота яких характеризується короткочасним і повторно-короткочасним режимами. Серії електродвигунів 4-ї розробки порівняно з МТФ і МТКФ розраховані на високу температуру нагрівання й відрізняються від них меншими габаритами й масою.

Кранові асинхронні електродвигуни мають маркування, що складається з букв і цифр: МТ – із фазним ротором, МТК – з короткозамкненим ротором. Клас нагрівостійкості двигуна позначається буквою. Двигуни з індексом В (МТВ і МТКВ) мають нагрівостійку ізоляцію класу В з припустимою температурою нагрівостійкості 130 °С. Двигуни з індексом Р (МТР і МТКР) мають нагрівостійку ізоляцію класу Р с температурою нагрівостійкості 155 °С. Двигуни МТ і МТК виготовляють з ізоляцією класу Е, з допустимою температурою нагрівостійкості 120 °С.

Перша цифра тризначного числа (0–7) після літерної позначки характеризує умовний зовнішній діаметр статорного пакета, друга цифра – порядковий номер серії, третя цифра – умовну довжину осердя статора. Цифра після дефіса позначає кількість полюсів машини. Наприклад, маркування МТКФ 412-8 означає, що це крановий короткозамкнений електродвигун четвертого габариту, першої серії, другої довжини, восьмиполісний; МТР-411-8 – крановий електродвигун з фазним ротором, четвертої величини, першої довжини, восьмиполісний, з ізоляцією класу Р.

До корпусу електродвигуна кріпиться табличка з основними параметрами, що характеризують двигун, і назвою заводу-виробника. На табличці вказують потужність електродвигуна у кіловатах при номінальному навантаженні, коефіцієнт потужності  $\cos\phi$ , частоту обертання, напругу, на яку розрахований двигун у разі з'єднання його обмоток «зіркою» або «трикутником», силу струму ротора при номінальній напрузі.

На стрілових кранах головним чином використовують двигуни з фазним ротором, оскільки в них за допомогою резистора, що вмикають у коло ротора, можна регулювати величину пускового струму й пускового моменту.

Пусковий момент при певному пусковому опорі може бути максимальним. Максимальний момент відповідає критичному ковзанню й визначається за номінальним моментом і коефіцієнтом кратності максимального моменту. Від пускового й максимального моментів залежить здатність електродвигуна під час пуску переборювати інерційні зусилля вантажу й передач виконавчих механізмів.

У випадку сталого режиму роботи момент, що розвивається на валу двигуна, повинен бути завжди більшим за момент вантажу, що піднімається. Якщо момент, переданий від вантажу на вал електродвигуна, переви-

щує його максимальний момент, то двигун зупиняється, оскільки не може перебороти статичний момент. Момент, що розвивається при цьому двигуном, буде критичним. Якщо вчасно не вимкнути двигун, що перебуває під великим навантаженням, то він перегріється і може згоріти. У зв'язку з цим не варто допускати перевантаження двигуна.

Перевантажувальна здатність кранових електродвигунів з фазним ротором при ПВ = 25 % становить 2,5–3,4.

Кранові електродвигуни працюють в повторно-короткочасному режимі: періоди короткочасної роботи чергуються з тривалими періодами вимкненого стану, коли двигун охолоджується. При такому режимі двигун нагрівається менше, ніж при тривалій безперервній роботі, тому йому можна задавати більше навантаження.

Припустиме навантаження двигуна залежить від ПВ і визначається стандартом: 15, 25, 40, 60 і 100 % навантаження, визначеного для тривалого режиму роботи.

Електродвигуни ВПМ встановлюють під негерметичними капотами, тому вони не захищені впливу пилу, вологості, високої й низької температур. У зв'язку з цим на ВПМ використовують електродвигуни в захищеному виконанні.

**10.2.2 Пуск асинхронних двигунів вантажопідіймальних машин.** Пуск електродвигунів з короткозамкненим ротором здійснюють за допомогою магнітних пускачів. Такий спосіб можливий за умови, що потужність двигуна не вище 20 % потужності джерела живлення зовнішньої електромережі. Пуск потужних короткозамкнених двигунів здійснюють, перемикаючи статорну обмотку із «зірки» на «трикутник» при напрузі мережі 220 В.

Електродвигуни з фазним ротором вмикають за допомогою контролерів і пускових реостатів, увімкнених у коло ротора двигуна. Під час пуску опір реостата поступово зменшують, збільшуючи при цьому пусковий момент і частоту обертання двигуна.

Частоту обертання асинхронних двигунів з фазним ротором регулюють, змінюючи опір ротора, для чого вмикають і вимикають пускові реостати. Увімкнення реостата у коло ротора зменшує частоту обертання ротора, а вимикання – збільшує її. Шунтування (виведення з кола) частини реостата здійснюють за допомогою контролера. Регулювати частоту обертання цим способом можна тільки у разі подолання двигуном великого моменту опору навантаження (підймання важкого вантажу, поворот з вантажем на великому вильоті). На холостому ході з незначним навантаженням частота обертання двигуна практично не залежить від опору в колі ротора й наближається до синхронної. Спосіб регулювання частоти обертання зміною опору в колі ротора найпростіший, але разом з цим і самий неекономічний, унаслідок великих втрат у пусковому реостаті.

Реверс асинхронних двигунів забезпечується зміною напрямку обертання магнітного поля. Для одноразового реверсування на щитку виводів

статора перемикають дві будь-які фази. Якщо потрібно періодично змінювати напрям обертання ротора, застосовують реверсивні магнітні пускачі, контролери або перемикачі-рубильники.

**10.2.3 Електродвигуни постійного струму.** Кранові електродвигуни постійного струму типів ДК, П і 2П випускають на номінальну напругу 220 і 440 В. У позначенні двигуна, наприклад, ДК-309Б, букви позначають серію, а цифри – умовні розміри. Перша цифра після назви серії (1–8) – це величина двигуна, що характеризує зовнішній діаметр сталевого якірного пакета; друга цифра – довжина пакета для певної величини; третя – довжина статорного осердя; буква після цифр – клас ізоляції.

Інші параметри й конструктивні особливості (напруга, потужність, частота обертання, спосіб охолодження) характеризуються каталожним номером.

### 10.3 Електропривод будівельних кранів

На будівельних кранах зазвичай використовують багатодвигунний електричний привод змінного та постійного струмів. Причому електричний струм часто виробляється власною силовою установкою і надходить від синхронного генератора до електродвигунів виконавчих механізмів. Електричні схеми привода будівельних кранів передбачають можливість живлення електродвигунів не тільки від генератора, але й від зовнішньої мережі трифазного струму з напругою 380 В. Живлення від зовнішньої мережі здійснюється по кабелю, що уможливорює передачу електроенергії через кільцевий струмоприймач на панель керування в кранах з приводом змінного струму. У кранах з приводом постійного струму від зовнішньої мережі струм підводиться до електродвигуна змінного струму, який обертає синхронний генератор постійного струму.

Як приклад, розглянемо електричну схему крана КБ-401А [50]. На рисунку 10.1. подано електричну схему силових кіл крана, на рисунку 10.2 – схему кіл керування, а на рисунку 10.3 – схему кіл освітлення, опалення й сигналізації.

Електропривод баштового крана КБ-401А (рис. 10.1) розрахований на живлення від зовнішньої трифазної електричної мережі змінного струму з лінійною напругою 380 В і нейтральним проводом. Електрична схема кіл керування (рис. 10.2) працює на змінному струмі напругою 220 В і постійному струмі від випрямляча  $V2$ . Допоміжні пристрої (освітлення, опалення, сигналізації) живляться змінним струмом напругою 220 В (рис. 10.3). Електричне коло ремонтного освітлення працює на змінному струмі напругою 12 В від знижувального трансформатора  $T2$  (рис. 10.3).

Живлення електродвигунів (рис. 10.1) здійснюється через вхідний вмикач  $Q$ , автоматичний вмикач  $F1$ , контакти лінійного контактора  $KЛ$  і контакти контакторів реверсу.

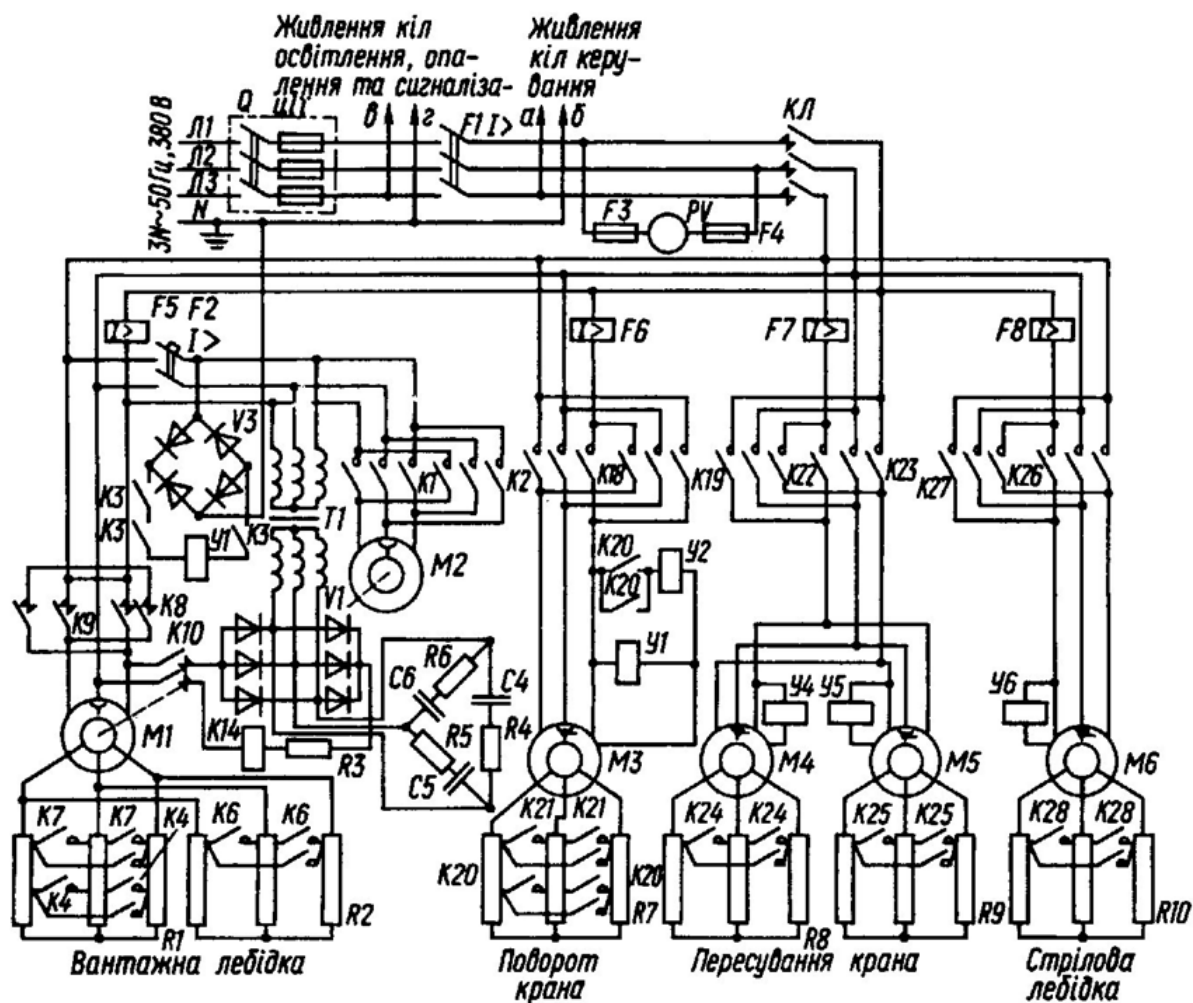


Рисунок 10.1 – Схема силових кіл крана КБ-401А [50]

Частоту обертання всіх двигунів під час пуску регулюють зміною опору пускорегулюючих реостатів. Частоту обертання електропривода поворотного механізму додатково регулюють за допомогою допоміжного гальма з електромагнітом  $V2$ , що підгальмовує механізм у першому положенні ручки командо-контролера. Щоб одержати малі частоти обертання механізму піднімання вантажу, використовують електропривод із гальмовою машиною змінного струму й динамічним гальмуванням приводного електродвигуна.

В електроприводі механізму піднімання вантажу крана КБ-401А передбачений захист кремнієвих випрямлячів з електромагнітом  $V1$  постійного струму.

Захист випрямлячів від перенапруги забезпечується трьома ланцюжками, кожен із яких містить послідовно ввімкнені резистори ( $R4$ ,  $R5$ ,  $R6$ ) і конденсатори ( $C4$ ,  $C5$ ,  $C6$ ), з'єднані «трикутником» і підключені до трьох фаз випрямного містка  $VI$ .

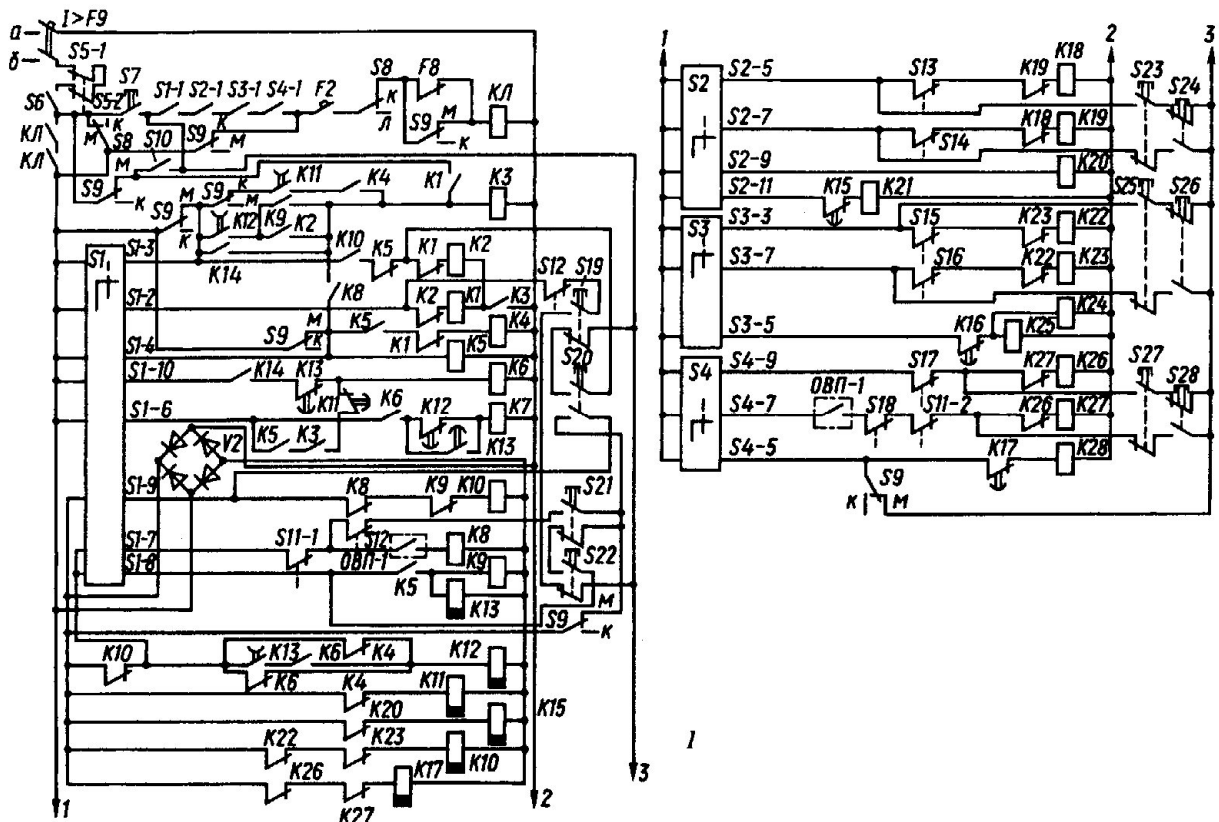


Рисунок 10.2 – Схема кіл керування краном КБ-401А [50]

Головний електромагніт постійного струму живиться від силових кіл за спеціальною схемою через випрямляч  $V3$  і контакти контактора  $K3$ .

В електроприводах усіх механізмів застосовані магнітні контролери, керувати якими можна або з кабіни крана, або з виносного пульта. Головний електромагніт постійного струму живиться від силових кіл за спеціальною схемою через випрямляч  $V3$  і контакти контактора  $K3$ .

Під час виконання робіт керування здійснюється з кабіни за допомогою командо-контролерів  $S1, S2, S3, S4$ . Послідовність замикання їхніх контактів наведена в таблицях 10.1–10.3, де замкнений контакт позначений знаком «X».

Під час монтажу самого крана і його випробування, коли машиніст не може перебувати в кабіні, механізмами керують з виносного пульта кнопками  $S19$ – $S28$ . Передача керування на кабіну або виносний пульт виконується універсальним перемикачем  $S9$ , ручку якого встановлюють у положення  $K$  (керування краном з кабіни) або в положення  $M$  (керування з виносного пульта).

У схемах електроприводів кранових механізмів забезпечується східчастий розгін двигуна під контролем реле часу. При цьому ступені пуско-регулювальних реостатів закорочуються відповідно до витримки реле часу. Наприклад, якщо встановити ручку стрілового командо-контролера  $S4$  відразу в друге положення піднімання (опускання), спочатку ввімкнеться контактор реверса  $K26$  ( $K27$ ), і двигун почне працювати з повним опором реостата. Одночасно ввімкнеться реле часу  $K17$ . Коли закінчиться витрим-



ка часу, реле *K17* спрацює і своїми контактами замкне коло котушки *K28*. Контактор *K28* увімкнеться й закоротить реостат, залишивши в колі ротора двигуна *M6* невеликий опір, що не вимикається.

Електродвигуни, електроапарати й кранові механізми захищаються автоматами, реле максимального струму, плавкими запобіжниками й кінцевими вимикачами (рис. 10.1).

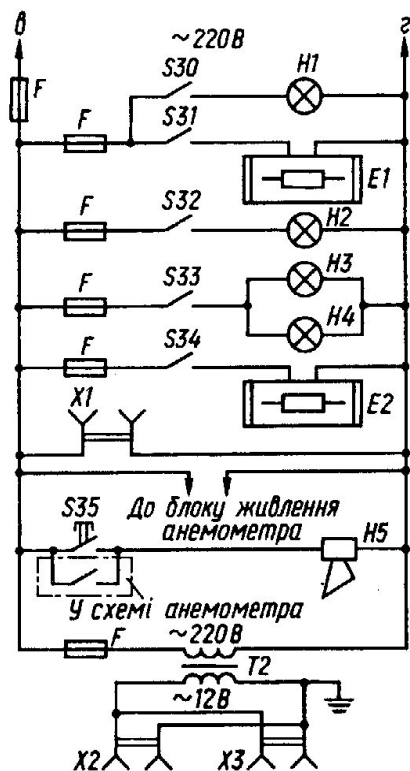


Рисунок 10.3 – Схема кіл освітлення, опалення й сигналізації крана КБ-401А [50]

Нульовий захист здійснюють контакти командоконтролерів *S1-1*, *S2-1*, *S3-1*, *S4-1*, замкнуті тільки в нульовому положенні ручок. Ці контакти ввімкнені послідовно з кнопкою *S7* у коло котушки лінійного контактора *КЛ*.

Таблиця 10.1 – Замикання контактів командоконтролера вантажної лебідки крана КБ-401А

Контакт	Положення ручки						
	Піднімання				Опускання		
	3	2	1	0	1	2	3
<i>S1-1</i>				X			
<i>S1-2</i>			X				
<i>S1-3</i>					X	X	X
<i>S1-4</i>	X	X	X				X
<i>S1-6</i>	X						X
<i>S1-7</i>	X	X	X				
<i>S1-8</i>							X
<i>S1-9</i>					X	X	
<i>S1-10</i>	X				X		

Таблиця 10.2 – Замикання контактів командо-контролера поворотного механізму крана КБ-401А

Контакт	Положення ручки						
	Піднімання			0	Опускання		
	3	2	1		1	2	3
<i>S2-2</i>				X			
<i>S2-5</i>	X	X	X				
<i>S2-7</i>					X	X	X
<i>S2-9</i>	X	X				X	X
<i>S2-11</i>	X						X

Таблиця 10.3 – Замикання контактів командо-контролера пересування крана й піднімання стріли крана КБ-401А

Контакти командо-контролера		Положення ручки				
		Уперед Підйом		0	Назад Опускання	
<i>S3</i>	<i>S4</i>	2	1		1	2
<i>S3-1</i>	<i>S4-1</i>			X		
<i>S3-5</i>	<i>S4-5</i>	X			X	
<i>S3-7</i>	<i>S4-7</i>				X X	
<i>S3-9</i>	<i>S4-9</i>	X	X			

Електродвигуни кранових механізмів захищають від перенапруги за допомогою реле максимального струму. Котушки реле *F5*, *F6*, *F7* і *F8* підключені до однієї фази живлення електропривода кожного механізму. Реле об'єднані в один блок і діють на загальний контакт *F8*, підключений до кола котушки лінійного контактора *КЛ*. Спрацьовування будь-якого реле зумовлює розмикання кола котушки й відімкнення силового кола крана від мережі живлення.

Одна фаза гальмової машини *M2* і кола живлення випрямляча *VI* також захищені реле *F5*, а дві інші фази – триполюсним автоматом *F2*. Третій полюс автомата ввімкнений у коло котушки лінійного контактора *КЛ*, тому у разі спрацювання автомата лінійний контактор вимикається.

Захист загального живлення кола від короткого замикання здійснюють автоматичний вимикач і плавкі запобіжники силового вхідного ящика *Q*. Кінцевий захист від переходу крановими механізмами крайніх положень виконують кінцеві вимикачі, що розмикаються, контакти яких підключені до кіл котушок відповідних контакторів.

Кінцевий вимикач *S11* розмикається, коли гакова підвіска підходить до стріли. Кінцевий вимикач *S13* розмикається в крайньому правому положенні поворотної платформи, а *S14* – у її крайньому лівому положенні. Контакт *S15* кінцевого вимикача обмежувача пересування крана розмикається в крайньому положенні під час руху крана вперед, а контакт *S16* того самого вимикача – у крайньому положенні під час руху назад. Кінцеві вимикачі *S17* і *S18* вимикають електродвигун стрілової лебідки відповідно в крайньому верхньому й крайньому нижньому положеннях стріли.

Роботу вантажної лебідки контролює обмежувач вантажопідйомності ОВП-1, вихідний контакт якого ввімкнений у коло котушки *K8*. У разі розмикання контакту (унаслідок перевищення вантажопідйомності) вимикається контактор підняття вантажу й електросхема забезпечує виконання операцій опускання вантажу.

Якщо потрібно терміново зупинити всі кранові механізми, лінійний контактор можна вимкнути аварійним вимикачем *S6* у кабіні керування або *S10* – на виносному пульті.

У колах освітлення, опалення й сигналізації (рис. 10.3) лампа *H1* освітлення кабіни й лампи *H2*, *H3*, *H4* прожекторів освітлення робочої зони керуються пакетними вимикачами *S30–S34*. Кабіна керування опалюється нагрівальними приладами *E2*. Трубчасті нагрівачі *E1* слугують для обігріву ліхтаря кабіни.

Звукова сирена *H5* вмикається кнопкою *S35* або контактом вихідного реле анемометра. При нормальному вітровому навантаженні й справній схемі анемометра його вихідне реле ввімкнене, а контакт у колі сирени розімкнутий. У разі вимикання вихідного реле анемометра (унаслідок посилення вітру або несправності в схемі анемометра) контакт замикається і вмикає сирену.

До кіл освітлення приєднаний блок живлення анемометра й трансформатор *T2* з розетками *X1* і *X2* для ввімкнення ламп ремонтного освітлення. Кола освітлення, опалення й сигналізації захищені плавкими запобіжниками.

#### 10.4 Електричні ручні машини

У будівельному виробництві застосовують різноманітні механізми й ручні машини, оснащені електроприводом. Однією й тією самою машиною (у разі застосування різних стандартних або спеціальних робочих інструментів або спеціалізованих насадок) можна виконувати різні технологічні операції й обробляти різні матеріали, тому електричні ручні машини можна розділити за основним, що відповідає назві машини, призначенням, на такі групи: свердлильні машини, шліфувальні машини, машини для розпилювання деревини, гайковерти й шуруповерти, машини ударної дії, вібратори.

Електричні ручні машини (далі – ЕРМ) приводять у рух за допомогою електродвигуна або електромагніту, що становить із машиною одне ціле. Як двигуни, застосовують:

- асинхронні трифазні електричні машини з короткозамкненим ротором, нормальною й підвищеною частотою струму;
- асинхронні однофазні електричні машини з короткозамкненим ротором, нормальною й підвищеною частотою струму;
- обернені (обертається статор, а ротор закріплений нерухомо) асинхронні трифазні електричні машини з короткозамкненим ротором, нормальною й підвищеною частотою струму;
- універсальні колекторні електричні машини;
- електричні машини зворотно-поступального руху (електромагнітні).

В ЕРМ переважно застосовують спеціально виготовлені для них електродвигуни, що працюють на напрузі 36 або 220 В. У пересувних машинах використовують також двигуни загального призначення на напругу 380/220 В.

Спеціалізовані заводи з виготовлення ручних машин застосовують такі умовні позначення електродвигунів:

КН – колекторний нормальної частоти струму;

КНД – колекторний нормальної частоти струму з подвійною ізоляцією;

АН – асинхронний нормальної частоти струму;

АП – асинхронний підвищеної частоти струму.

Букви після цифри позначають габарит двигунів (діаметр і довжину активної сталі статора або індуктора).

Оскільки цю групу електричних механізмів використовують вручну, особливу увагу під час їхнього розроблення приділяють електричній ізоляції.

**ЕРМ другого класу** (з подвійною ізоляцією) – найпрогресивніші, оскільки вони можуть житися від освітлювальної мережі, їх не потрібно заземлювати, до того ж забезпечується повна електробезпечність роботи в разі дотримання правил експлуатації. Подвійна ізоляція машин здійснюється двома основними способами:

- статор (індуктор з котушками) двигуна, щітковий механізм, вимикач і всі струмопровідні (сполучні) проводи розміщені в корпусі й рукоятці з ізоляційного матеріалу (високоміцна пластмаса), а вал ротора (якоря) має електроізоляційну втулку, що ізолює його від ротора (якоря) й колектора (рис. 10.4);

- статор (індуктор з котушками) двигуна, щітковий механізм і всі струмопровідні (сполучні) проводи змонтовані в пластмасовому або алюмінієвому корпусі, який монтується в захисному пластмасовому корпусі. До корпуса кріпиться рукоятка з встановленим електровимикачем і струмопровідний кабель (як варіант, пластмасова втулка може бути розміщена між статором і зовнішнім металевим корпусом).

Машини II класу (з подвійною ізоляцією) на корпусі або на заводському щитку мають спеціальний знак (рис. 10.4).

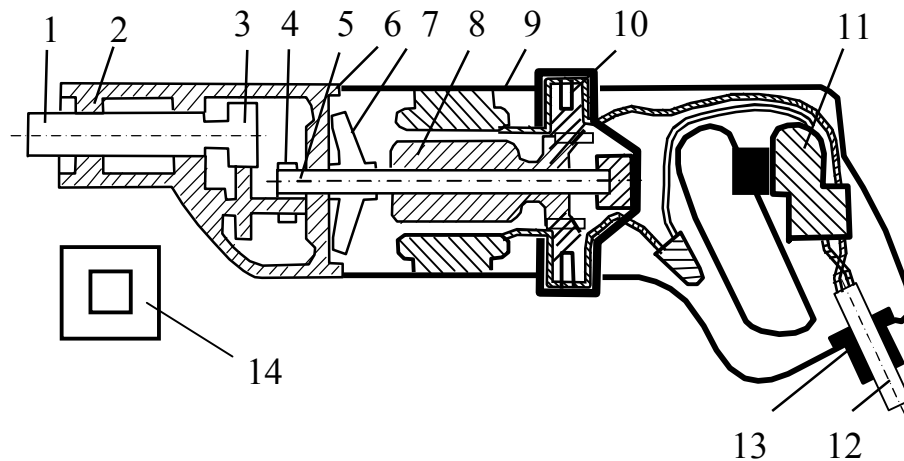


Рисунок 10.4 – Ручна електрична свердлильна машина:

1 – шпиндель; 2 – металевий корпус редуктора; 3 – редуктор;  
4 – ізоляційна шестерня; 5 – вал; 6 – проміжний пластмасовий щит;  
7 – пластмасовий вентилятор; 8 – якор; 9 – пластмасовий зовнішній корпус; 10 – ковпачок щікотримача; 11 – вимикач; 12 – струмопровідний кабель; 13 – захисна гнучка трубка; 14 – умовне позначення на корпусі машин з подвійною ізоляцією

Існують різні конструкції дрилів, електропилوک, електрорубанків, електрошліфувальних машин, електромагнітних перфораторів та інших електрифікованих ручних інструментів, але їхнє силове електрообладнання завжди будується на основі електродвигунів обертового руху або на базі тільки зворотно-поступальних рухових пристроїв, або становить комбінований електромеханізм з обертовим ударним елементом зворотно-поступальної дії.

**Комбінований електромеханізм.** Прикладом ручного електроінструмента, який застосовують як електробур і електромолоток, слугує електромагнітний перфоратор, наприклад типу ІЕ-4709 Б (рис. 10.5). Цей перфоратор підключається за допомогою гнучкого переносного проводу до мережі напругою 220 В і частотою 50 Гц, споживана сила струму в номінальному режимі – 3,2 А, споживана потужність – 650 Вт.

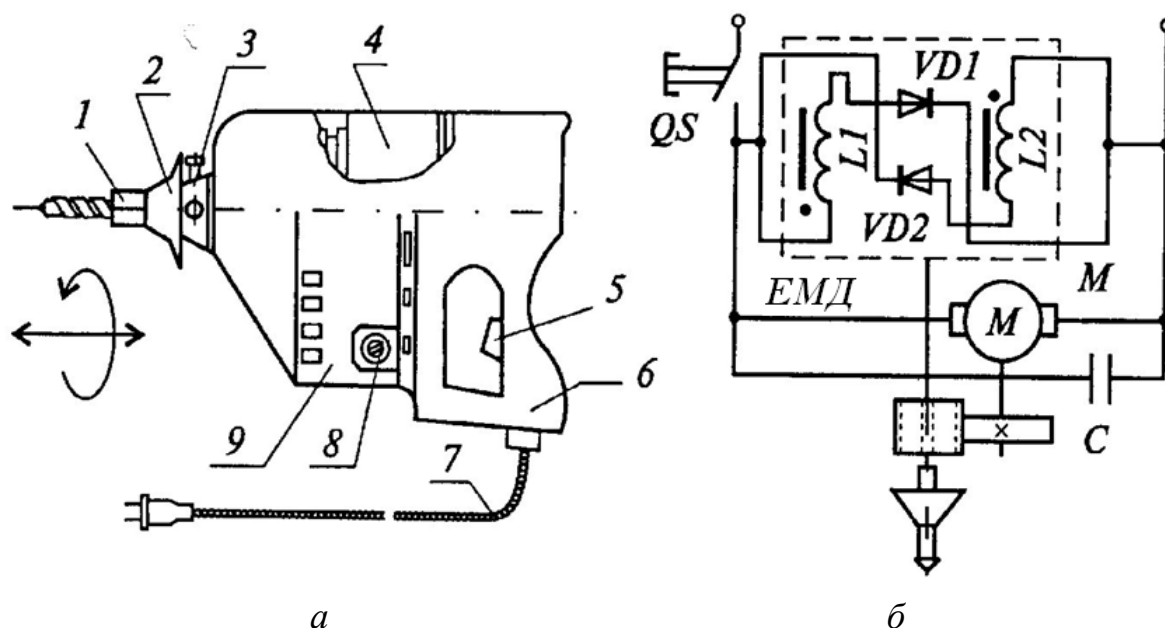


Рисунок 10.5 – Електромагнітний перфоратор:

*а* – будова; *б* – принципова схема; 1 – робочий орган; 2 – гумовий фартух; 3 – букси; 4 – двигун; 5 – вимикач із самоповерненням; 6 – ручка; 7 – провід; 8 – отвір; 9 – корпус

**Вібратори.** Вібраторами називають вібраційні машини, призначені для збудження механічних коливань. Вони становлять машини, які перетворюють механічну, електричну або хімічну енергію на механічні коливання й передають їх матеріалам або пристроям. Коливання характеризують амплітудою  $A$ , тобто найбільшим відхиленням від середнього положення, вимірюваним у міліметрах, і частотою  $n$ , тобто кількістю періодів коливань на одиницю часу (в 1 с).

Ефективне ущільнення бетонної суміші вібруванням досягається лише при певних значеннях амплітуди й частоти, за яких виникають прискорення, що знижують сили внутрішнього тертя між частинками суміші настільки, що вони починають переміщуватися одна відносно одної

під дією сили ваги. На практиці застосовують вібратори з частотою коливань  $n = 25\text{--}250\text{ с}^{-1}$  і амплітудою коливань 0,1–3 мм (більші значення амплітуди для менших значень частоти).

За видом привода вібратори поділяють на електромеханічні, електромагнітні, пневматичні, гідравлічні й моторні, що приводяться в дію двигунами внутрішнього згорання. Найпоширеніші електромеханічні інерційні вібратори з обертовими неврівноваженими вантажами, закріпленими на валу ротора електродвигуна або на окремому валу, що отримує обертання від електродвигуна через муфту або клиноремінну передачу.

**Поверхневі й зовнішні вібратори.** Здебільшого застосовують електромеханічні вібратори відцентрового типу, в яких інерційний елемент у вигляді дебалансу або бігунка робить обертовий рух і передає виникаючу при цьому відцентрову силу на підшипники вала дебалансу або опору бігунка. Поверхневі електричні вібратори мають однакові за конструкцією одновальні вібраційні дебалансні механізми з вбудованим електричним двигуном (мотор-вібратором) для збудження коливань. Конструкція мотор-вібратора наведена на рисунку 10.6. В алюмінієвому корпусі 1 розміщений статор 2 трифазного асинхронного двигуна з короткозамкнутою обмоткою ротора 3. По краях вала ротора встановлено два дисбаланси 4 (симетрично стосовно двигуна). Кронштейни 5 за допомогою бовтів забезпечують кріплення мотор-вібратора на піддоні, який передає вібраційні коливання бетонній суміші.

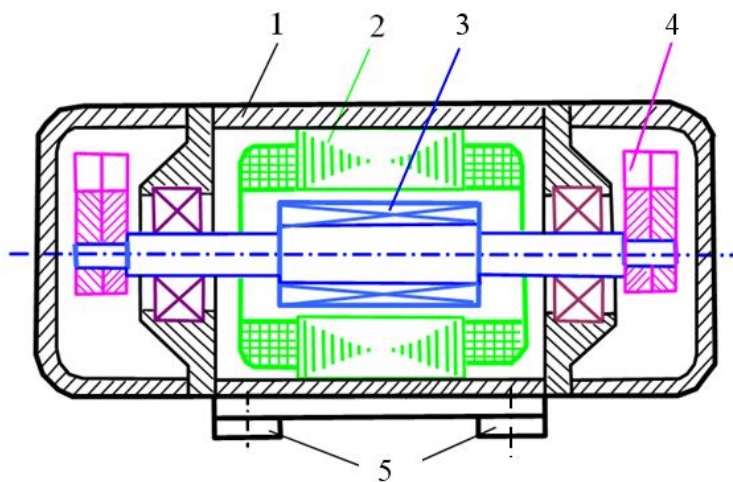


Рисунок 10.6 – Мотор-вібратор

**Електромеханічний дебалансний вібратор** ІВ-70 (рис. 10.7) складається з корпусу, електродвигуна й дебалансного віброзбуджувача. В алюмінієвому корпусі 1 з підшипниковими щитами 4 розташовано трифазний асинхронний електродвигун, до обмоток статора 3 якого струм надходить через клемну коробку 2, а ротор 5 закріплений на валу 6. Вал опирається на підшипники 7, а на консольних частинах вала закріплені дебаланси 8, закриті кришками 9. Кришки стягнуті шпильками 10 і щільно прилягають до корпусу, у нижній частині якого розміщено настановні лабети з отвора-

ми під болти кріплення вібратора до коритоподібної основи, опалубки або інших елементів конструкції, через яку коливання передаються часткам бетонної суміші.

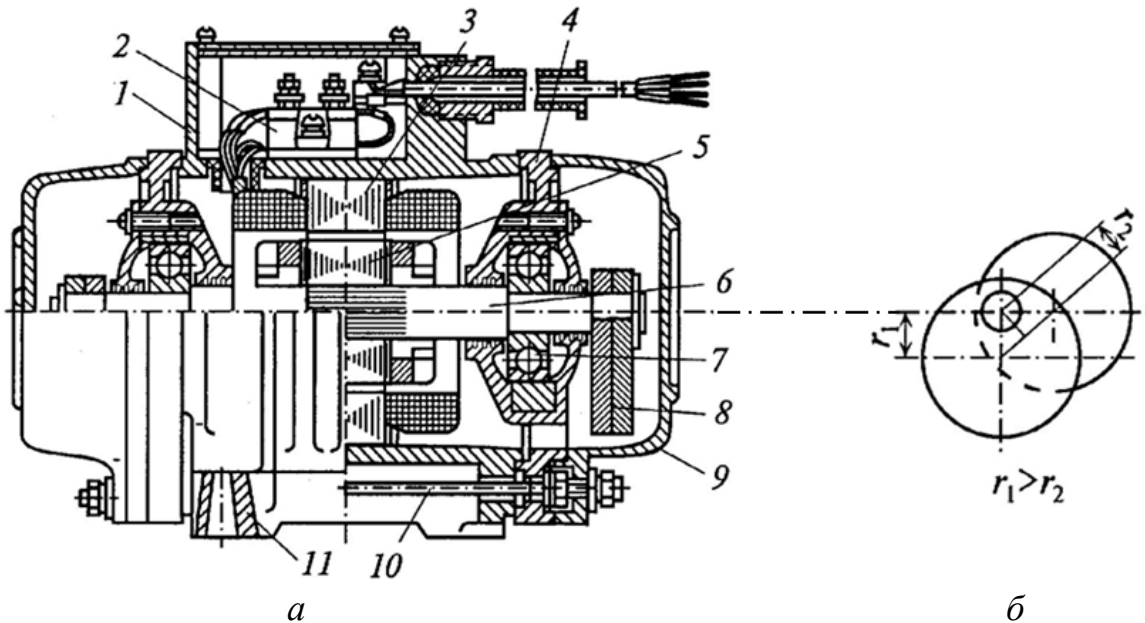


Рисунок 10.7 – Електромеханічний дебалансний одновальний вібратор ІВ-70: *а* – загальний вид; *б* – схема регулювання дебалансу; 1 – корпус; 2 – клемна коробка; 3 – обмотка статора; 4 – щити; 5 – ротор; 6 – вал; 7 – підшипник; 8 – дебаланси; 9 – кришки; 10 – шпильки; 11 – настановні лабети

Під час поверхневого ущільнення бетонної суміші основа вібратора передає ефективні коливання на глибину до 20 см. Поверхневий вібратор, установлений на рейці, може використовуватися для розрівнювання й поверхневого ущільнювання бетонної суміші на великій площі. Вібратор, якщо його від'єднати від рейки й основи, можна використовувати як зовнішній вібратор для надання коливань опалубці, ринві, стінці бункера. Він має два здвоені дебаланси, які становлять сталеві циліндричні деталі, ексцентрично закріплені на валу. Оскільки центр маси дебалансу зміщений відносно осі вала, то під час обертання вала й дебалансів виникає відцентрова сила інерції, що надає вібратору примусових коливань. Частота коливань дорівнює частоті обертання дебалансів, а амплітуда коливань залежить від маси коливних частин і статичного моменту маси дебалансів, під якою мають на увазі добуток маси дебалансів на ексцентриситет маси, тобто на відстань від осі обертання до центра маси дебалансів.

Оскільки зовнішній дебаланс в кожній парі має чотири шпонкові пази, його можна встановити під різними кутами відносно внутрішнього, змінюючи загальний ексцентриситет маси здвоєного дебалансу. Коли осі дебалансів збігаються, ексцентриситет маси найбільший, а зі збільшенням кута ексцентриситет маси зменшується, оскільки загальний центр маси для розсунутих дебалансів, розташовується посередині лінії, що з'єднує

центри маси кожного дебалансу, й відстоїть від осі обертання на меншій відстані. Відповідно зменшуються статичний момент маси дебалансів і змушуюча сила, яку вони спричиняють.

Вібратор ІВ-70 при частоті  $2\ 800\ \text{хв}^{-1}$  і відповідному встановленні зовнішніх дебалансів генерує змушуючу силу, що дорівнює 2; 2,5; 3,15 і 4 кН. Живлення електродвигуна здійснюється від мережі змінного трифазного струму напругою 220/380 В і частотою 50 Гц. Потужність електродвигуна – 0,4 кВт, маса вібратора 20 кг. Під час безпосереднього обслуговування вібратора, наприклад при поверхневому ущільненні бетонної суміші, напруга 220/380 В дуже небезпечна для обслуговуючого персоналу. У цьому разі використовують аналогічний за будовою вібратор ІВ-68, який розвиває при частоті  $1\ 400\ \text{хв}^{-1}$  примусову силу в 5 кН і обладнаний електродвигуном, що живиться струмом напругою 36 В від знижувального трансформатора. Зовнішні вібратори прикріплюють до опалубки, бункерів. Їхні електродвигуни живляться струмом безпосередньо від мережі напругою 220/380 В і не вимагають знижувальних трансформаторів, що дуже зручно під час використання великої кількості вібраторів.



Рисунок 10.8 – Глибинний вібратор

**Внутрішні (глибинні) вібратори** (рис. 10.8) застосовують для ущільнення бетонної суміші під час виготовлення великих збірних будівельних елементів, насичених арматурою, а також під час спорудження монолітних залізобетонних конструкцій. Вони працюють досить ефективно, тому що корпус вібратора безпосередньо діє на бетонну суміш.

Частоту коливань обирають залежно від типу бетону: для дрібнозернистих бетонних сумішей – вібратори з частотою від 10 000 до 20 000 кол/хв.; для середньозернистих – від 3 500 до 9 000 кол/хв.; для великозернистого бетону – до 3 500 кол/хв.

## Висновки

Електрообладнання ВПМ за своїм призначенням поділяється на основне (обладнання електропривода) й допоміжне (обладнання робочого й ремонтного освітлення, опалення).

У приводах ВПМ використовуються електродвигуни спеціального кранового типу.

Умикання й вимикання електродвигунів ВПМ здійснюється спеціальними апаратами: пускачами й контакторами.

Для захисту електрообладнання від аварійних режимів застосовують запобіжники з плавкими вставками, теплові реле та реле максимального струму.



Електрична ручна машина приводиться в рух спеціально виготовленим для цього електродвигуном або електромагнітом, що становить із машиною одне ціле.

В електричних ручних машинах застосовуються спеціально виготовлені електродвигуни, що працюють на напрузі 36 В або 220 В. У пересувних машинах використовують також електродвигуни загального призначення на напругу 380/220 В.

Промисловість випускає електричні ручні машини трьох класів виконання за напругою й ізоляцією.

Силове електроустаткування електричних ручних машин базується тільки на електродвигунах обертового руху, або тільки зворотно-поступальних рухових пристроях, або становить комбінований електромеханізм із обертовим ударним елементом зворотно-поступальної дії.

### **Запитання для самоперевірки**

1. Яке обладнання забезпечує роботу вантажопідіймальні машин і якими особливостями характеризується його робота?
2. Охарактеризуйте основне електрообладнання ВПМ.
3. Наведіть приклади допоміжного електрообладнання ВПМ.
4. Охарактеризуйте кранові асинхронні електродвигуни.
5. Як здійснюється пуск асинхронних електродвигунів ВПМ?
6. Назвіть основні елементи апаратури керування.
7. На які класи за напругою та ізоляцією поділяють електричні ручні машини?
8. Поясніть будову ручної електричної свердлильної машини.
9. Поясніть схему електромагнітного перфоратора.
10. Які електричні ручні машини належать до вібраторів? Охарактеризуйте їхні типи й призначення.
11. Якими особливостями характеризуються електромеханічні вібратори відцентрового типу?
12. Поясніть будову й принцип роботи електромеханічного дебалансного вібратора ВЕРБ-70.
13. Якими особливостями характеризуються внутрішні вібратори?

### **Список рекомендованих джерел**

Основна література: [28, С. 316–344].

Додаткова література: [4, С. 583–590], [42, С. 756–766].

## Розділ 11 ЕЛЕКТРОСПОЖИВАЧІ ПРОМИСЛОВИХ ПІДПРИЄМСТВ

**Ключові поняття:** устаткування (загальнопромислове, електротехнологічне, перетворювальне, електрозварювальне, електроосвітлювальне), внутрішньозаводський електричний транспорт, піч (нагрівання, індукційна, дугова), електротермія.

### 11.1 Загальна характеристика електроспоживачів промислових підприємств

Сучасні промислові підприємства (далі – ПП) характеризуються значним різноманіттям споживачів і приймачів електричної енергії (ЕЕ), чисельність яких ускладнює встановлення єдиного підходу до їхньої класифікації. Зазвичай класифікаційні групи споживачів ЕЕ на ПП розглядають з точки зору завдання дослідження: технологія перетворення електричної енергії на інший вид енергії, потужність, режим роботи, приналежність до певної галузі економіки тощо. Виокремлюють такі характерні групи електроспоживачів ПП:

- загальнопромислове силове устаткування;
- електротехнологічне устаткування;
- електропривод виробничих механізмів;
- перетворювальне устаткування;
- внутрішньозаводський електричний транспорт.

До характерних груп також відносять розглянуте нами в попередніх розділах електронагрівальне, електрозварювальне й електроосвітлювальне устаткування.

**Силове загальнопромислове устаткування.** До цієї групи електроспоживачів відносять компресори, вентилятори, насоси, підіймально-транспортні механізми, основними електроприймачами яких є електричні двигуни.

Двигуни компресорів, насосів, вентиляторів працюють у сталому довгостроковому режимі й залежно від потужності одержують живлення на напрузі від 220 В до 10 кВ струмом промислової частоти 50 Гц. Потужність цього устаткування знаходиться в широкому діапазоні – від часток одиниці до тисяч кВт. Залежно від призначення й місця встановлення споживачі цієї групи за надійністю електропостачання можуть належати до першої (частіше) або другої категорії. Наприклад, належність насосних станцій на металургійних заводах до першої категорії безперебійності електропостачання зумовлена тим, що припинення їхнього електропостачання може призвести до виходу з ладу доменних печей і заподіяти великих збитків, а відімкнення насосних станцій під час гасіння пожеж взагалі неприпустимо.

Двигуни компресорів, насосів, вентиляторів створюють рівномірне й симетричне навантаження за трьома фазами. Коефіцієнт потужності дорівнює 0,8–0,85. Для електроприводів потужних електроприймачів цієї групи зазвичай застосовують синхронні двигуни, що працюють з випереджувальним коефіцієнтом потужності.

Підіймально-транспортне устаткування (далі – ПТУ) працює у повторно-короткочасному режимі. Його коефіцієнт потужності змінюється в ширших межах – від 0,3 до 0,8. Для живлення ПТУ застосовується як змінний (50 Гц), так і постійний струм. За безперебійністю живлення ПТУ відносять до споживачів першої або другої категорії залежно від місця роботи й виду обладнання.

**Електротехнологічне устаткування.** Електротехнологічні процеси базуються на перетворенні енергії електричного струму, електричного й магнітного полів безпосередньо в робочій зоні технологічних установок у теплову, хімічну або механічну енергію, унаслідок чого реалізується заданий технологічний процес.

До групи електротехнологічного устаткування належать електричні печі опору, печі й устаткування індукційного й діелектричного нагрівання, дугові електричні печі й печі зі змішаним нагріванням. Детальніше цю групу промислових електроспоживачів буде розглянуто в наступному розділі.

**Електропривод виробничих механізмів.** Це двигуни верстатів різноманітного призначення. Цей вид електричного приводу зустрічається на всіх підприємствах. Для електроприводу сучасних верстатів застосовують усі види двигунів. Одинична потужність двигунів змінюється від часток до сотень кВт, на окремих верстатах – може бути і вище. У верстатах, де потрібно досягти високих швидкостей обертання й регулювання швидкості, застосовують двигуни постійного струму, які отримують живлення від випрямлячів постійного струму.

Живлення двигунів виробничих механізмів здійснюють напругою 660–380/220 В, частотою – 50 Гц. Коефіцієнт потужності змінюється в широких межах залежно від технологічного процесу. За надійністю електропостачання цю групу споживачів зазвичай відносять, як правило, до II та III категорій.

**Перетворювальне устаткування** (далі – ПУ) забезпечує роботу таких груп промислових електроспоживачів, як внутрішньозаводський електротранспорт, машини й механізми різноманітного призначення, зварювальне устаткування постійного струму, електролізні ванни, електричні фільтри тощо. Ці електроспоживачі потребують перетворення змінного трифазного струму промислової частоти на постійний чи трифазний струм або однофазний струм зниженої, підвищеної та високої частоти. Здебільшого для цих цілей використовують напівпровідникові перетворювальні установки. Режим роботи й характеристики ПУ залежать від їхнього призначення.

Режим роботи електролізного устаткування (для отримання алюмінію, міді, свинцю та ін.) досить рівномірний і симетричний за фазами навантаження. Коефіцієнт потужності електролізних установок дорівнює 0,85–0,9. Зазвичай вони належать до електроспоживачів I категорії (допускаються короткочасні перерви). У ПУ змінний струм промислової частоти напругою 6–35 кВ перетворюється на постійний напругою 825 В.

Діапазон потужностей ПУ для внутрішньопромислового електричного транспорту становить від десятків до тисяч кіловат. Коефіцієнт потужності такого устаткування змінюється в межах 0,7–0,8. Навантаження на стороні змінного струму симетричне за фазами, але різко змінюється внаслідок піків струму під час роботи тягових двигунів. ПУ живляться струмом промислової частоти напругою 0,4–35 кВ.

**Внутрішньозаводський електричний транспорт** є складовою частиною технологічного процесу виробництва. У межах цехів він забезпечує переміщення заготовок і вузлів між робочими місцями й ділянками. Міжцеховий електричний транспорт, переважно не пов'язаний з технологічним процесом, здійснює переміщення матеріалів, напівфабрикатів і готових виробів між цехами й складами, розташованими на території підприємства або в одному промисловому вузлі.

*Канатно-підвісний транспорт* широко використовується в промисловості (вугільній, будівельних матеріалів, металургійній, хімічній тощо) для внутрішнього й зовнішнього перевезення вантажів (корисних копалини від місць видобутку до пунктів перероблення або передачі на інші види транспорту).

*Монорельсовий транспорт* застосовується, головним чином, в оброблювальній промисловості як внутрішньоцеховий і міжцеховий. Технічними засобами цього виду промислового транспорту є електричні талі, підвісні електротягачі й електровізки.

**Електричні освітлювальні установки** становлять однофазне навантаження з одиничною потужністю не більш 2 кВт, тому при правильному угрупованні освітлювальних приладів можна досягти порівняно рівномірного навантаження за фазами (з несиметрією навантажень не більше ніж 5–10 %). Характер навантаження – рівномірний, що змінюється залежно від часу доби. Коефіцієнт потужності для ламп розжарювання дорівнює 1, для газорозрядних ламп – 0,6–0,8. Для освітлювальних установок підприємств застосовується напруга промислової частоти від 6 до 220 В.

**Електрозварювальні установки** як приймачі електроенергії поділяються на установки, що працюють на змінному й на постійному струмі.

Електрозварювальні агрегати постійного струму складаються з двигуна змінного струму і зварювального генератора постійного струму. Зварювальне навантаження такої установки розподіляється рівномірно по трьох фазах живильної мережі змінного струму, але графік навантаження залишається нерівномірним. Коефіцієнт потужності становить 0,7–0,8 при но-

мінальному режимі роботи й знижується до 0,4 при холостому ході установки. Серед зварювальних агрегатів на постійному струмі використовуються і випрямні установки.

Електрозварювальні установки змінного струму становлять однофазне навантаження у вигляді зварювальних трансформаторів для дугового зварювання. Режим роботи цих установок повторно-короткочасний з нерівномірним навантаженням за фазами, характеризується низьким коефіцієнтом потужності: 0,3–0,5 – для дугового зварювання і 0,4–0,7 – для контактного зварювання. Зварювальні установки живляться від мереж із напругою 380–220 В. За надійністю живлення зварювальне устаткування належить до приймачів II та III категорій.

Основне електрозварювальне устаткування розглянуто в розділі 9.

## 11.2 Електротехнологічне устаткування

Як було зазначено вище, електротехнологічне устаткування характеризується прямим перетворенням електричної енергії в інший вид безпосередньо у робочій зоні технологічного процесу. Завдяки високій ефективності та функціональним можливостям електротехнологія набула широкого застосування в багатьох галузях виробництва. У таблиці 11.1 наведено дані про найпоширеніші процеси із застосуванням методів електротехнології.

Таблиця 11.1 – Сфери застосування методів електротехнології [55]

Діючий фактор	Частота, Гц	Вид технологічного процесу
Електростатичне поле	–	Електростатичне поліпшення, електрофільтрування й очищення, розподіл за фракціями, електричне копчення рибних та м'ясних продуктів.
Постійне магнітне поле	–	Очищення від феромагнітних домішок, магнітне оброблення води, попередження появи накипу, зміна кристалічної структури речовини, магнітно-імпульсне оброблення виробів
Постійний і змінний струм промислової частоти	0–50	Електротермічне оброблення, електричне зварювання, електрохімічне й електрофізичне оброблення, випічка, пастеризація, тощо.
Струм середньої і високої частоти	$10^2$ – $10^{10}$	Індукційне й діелектричне нагрівання, сушіння, консервування, стерилізація й пастеризація, дефектоскопія тощо.
Інфрачервоне випромінювання	$10^{12}$ – $10^{14}$	Нагрівання, сушіння, обжарювання, варіння, випічка, дезінсекція.
Світлові промені	$10^{15}$	Світло-променево, зокрема лазерне оброблення.
Ультрафіолетове випромінювання	$10^{15}$ – $10^{17}$	Стерилізація, стимулювання й пригнічення біологічних процесів і хімічних реакцій, руйнування мікрофлори.
Рентгенівське випромінювання	$10^{17}$ – $10^{19}$	Те саме
Електронні промені й плазма	–	Нагрівання, плавлення, відновлення металів тощо

На сучасних ПП широкого застосовують такі технологічні процеси й методи оброблення матеріалів.

**Електротермія.** Перетворення електричної енергії в теплову для нагрівання матеріалів і виробів з метою змінювання їхніх властивостей або форми, для плавлення й випаровування.

**Електрохімічні методи** оброблення й отримання матеріалів, у яких під впливом електричної енергії відбувається розкладання хімічних сполук і їх поділ шляхом переміщення заряджених частинок в рідкому середовищі під дією електричного поля (електроліз, гальванотехніка).

**Електрофізичні методи** оброблення, коли для впливу на матеріали використовується перетворення електричної енергії як на механічну, так і на теплову (електроерозійна, ультразвукова, магнітно-імпульсна).

**Аерозольна технологія** – енергія електричного поля використовується для надання електричного заряду зваженим у газовому потоці дрібним частинкам речовини, щоб перемістити їх під дією поля в потрібному напрямку.

**11.2.1 Електротермічне устаткування** – це комплекс обладнання, основною складовою якого є **електрична піч** або електротермічний пристрій, де електрична енергія перетворюється на теплову. Допоміжне (електричне, механічне та інше) обладнання забезпечує перебіг робочого процесу в електротермічному устаткуванні (нагрівання матеріалу виробів з подальшим змінюванням їхнього агрегатного стану, форми, властивостей).

Існує ряд класифікацій електротермічного устаткування.

За особливостями перетворення електроенергії на тепло: устаткування з виділенням тепла в активному опорі; індукційне устаткування; з виділенням тепла в електричній дузі; з діелектричним нагріванням.

За місцем виділення теплової енергії: устаткування прямого нагрівання (тепло виділяється безпосередньо у виробі), устаткування непрямого нагрівання (тепло виділяється в нагрівачі або в міжелектродному просторі електричної дуги).

**Переваги** устаткування електричного нагрівання:

- простота й точність керування температурним режимом;
- легкість механізації й автоматизації технологічного процесу;
- можливість отримати високу рівномірність теплового поля;
- відсутність впливу газів на вироби, що підлягають нагріванню;
- можливість проведення оброблення в сприятливому середовищі (інертний газ, вакуум);
- висока якість отримуваних металів.

**Недоліками електричного нагрівання** є досить складна конструкція устаткування, його значна вартість, висока вартість отримуваної теплової енергії.

**Печі опору.** Значну частку електротехнологічного устаткування становлять електричні **печі опору**, які за способом нагрівання поділяються на печі прямого й непрямого нагрівання.

*Печі прямої дії* виготовляють однофазними (частіше) і трифазними потужністю до 3 000 кВт. Ці печі живляться струмом промислової частоти 50 Гц від мереж 380/220 В або через понижувальні трансформатори від мереж більш високого класу напруги. Коефіцієнт потужності знаходиться в інтервалі 0,7–0,9. Більшість печей опору належить до приймачів II категорії, але окремі установки можуть належати до споживачів I категорії, залежно від призначення печі.

*Печі непрямого нагрівання* одержують живлення, здебільшого, від мережі 380 В промислової частоти 50 Гц. Існують однофазні і трифазні печі потужністю від одиниць до декількох тисяч кіловат. Коефіцієнт потужності наближається до 1.

Електропечі з виділенням тепла в активному опорі було розглянуто в розділі 7.1.2.

За рівнем температур печі поділяються: на низькотемпературні (до 650 °С); середньотемпературні (до 1 250 °С); високотемпературні (вище 1 250 °С).

Для низькотемпературного нагрівання широко застосовуються трубчасті електронагрівники – ТЕНи, що становлять собою металеву трубку, заповнену теплопровідним електроізоляційним матеріалом з електронагрівальною спіраллю. ТЕНи електробезпечні, можуть працювати в будь-якому середовищі, стійки до вібрацій. Потужність ТЕНів – до 15 кВт, напруга – до 380 В, ресурс – до 40 тис. год, робоча температура – до 730 °С.

У низько- й середньотемпературних печах із температурою до 800 °С нагрівальні елементи виготовляють із фехралу й константану, із температурою до 100 °С – із ніхрому. Ніхроми становлять сплав нікелю (75–78 %) і хрому (близько 25 %); фехрالی – сплав заліза (73 %), хрому (13 %), алюмінію (4 %); хромонікелеві жароміцні сталі – сплав заліза (до 61 %), хрому (22–27 %), нікелю (17–20 %).

У високотемпературних печах використовуються неметалічні нагрівальні елементи: карборундові; вугільні; графітові або металеві. Карборундові утворюються під час спікання кремнезему й вугілля. Металеві виготовляють із тугоплавких металів (молібдену, танталу, вольфраму тощо). Щоб уникнути розтріскування, неметалічні нагрівальні елементи розігрівають поступово при малій потужності, що передбачає застосування засобів регулювання напруги.

**11.2.2 Устаткування прямого нагрівання** призначене для нагрівання заготовок під ковку, відпалу труб, дроту, пружинного дроту під навивку. Установки не обмежуються щодо досяжних температур, мають високу швидкість, пропорційну введених потужності, високий ККД. Принципова схема прямого нагрівання подана на рисунку 11.1. Існують печі прямого нагрівання періодичної дії для спікання прутків і штапиків з порошку рідкісних і тугоплавких металів при температурі до 3 000 К в захисній атмосфері.

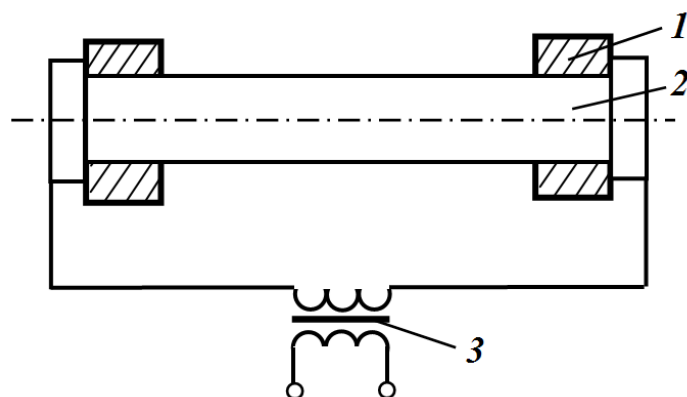


Рисунок 11.1 – Схема прямого нагрівання:

- 1 – водоохолоджувані затискачі; 2 – виріб, що нагрівається;  
3 – пічний трансформатор

Установки прямого нагрівання містять такі основні вузли:

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

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

Печі прямого нагрівання використовують і для графітизації вугільних виробів, отримання карборунда тощо. Графітуровочні печі виконують однофазними прямокутної форми з роз'ємними стінками. У вакуумі або нейтральній атмосфері отримують температуру 2 600–3 100 К.

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

**11.2.3 Плавильні електропечі опору.** Плавильні ЕПО призначені для виплавлення олова, свинцю, цинку й різних сплавів на їх основі, а також інших металів із температурою плавлення 600–800 К. Печі для плавлення алюмінію і його сплавів забезпечують високий ступінь очищення металу. Печі мають просту конструкцію. За конструктивним виконанням розрізняють тигельні й камерні (або ванні) печі.

Тигельні печі (рис. 11.2) становлять металеву ємність-тигель (із чавуну з внутрішньої обмазкою оксидами), розміщену в циліндричному корпусі з вогнетривкого матеріалу 5 і вкриту зовні металевим кожухом 6. Між тигелем і футеруванням розміщені електричні нагрівачі 4.



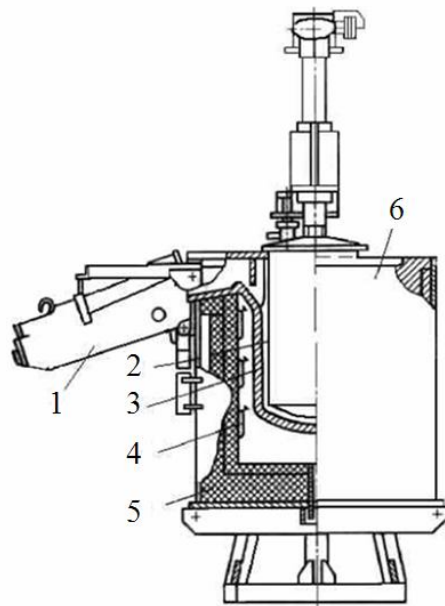


Рисунок 11.2 – Тигельна електрична піч опору:

1 - жолоб; 2 - механічний витіснювач; 3 - тигель; 4 - нагрівач;  
5 – футерування; 6 – корпус

Електрична піч опору обладнана механічним дозатором. Дозування металу у проміжний ківш робота-маніпулятора або ливарну форму проводиться за допомогою механічних, пневматичних або електромагнітних пристроїв. Механічний витіснювач 2 розміщений на каретці, що рухається вгору і вниз по направляючій колонці. Після розплавлення металу і доведення його температури до необхідного рівня витіснювач опускається в тигель і витісняє порцію металу, яка по обігрівальному жолобу надходить у ливарну машину. Тигельні ЕПО інших конструкцій мають механізм нахилу, що дає змогу нахилити піч і зливати розплавлений метал. Питома витрата електроенергії при плавленні алюмінію становить 700–750 кВт·год/кг, ККД печі – 50–55 %.

### 11.3 Устаткування індукційного нагрівання

Індукційне нагрівання (далі – ІН) широко використовується для реалізації технологічних процесів ПП, а саме:

- плавлення металів і неметалів;
- поверхневого загартування деталей;
- нагрівання виробів для пластичної деформації;
- зварювання й запаювання;
- зонного очищення металів і напівпровідників;
- отримання монокристалів із тугоплавких оксидів;
- отримання плазми.

При індукційному нагріванні в тілах, що потребують нагрівання, під дією електромагнітного поля виникають вихрові струми, які нагрівають тіло.

Принципова схема ІН показана на рисунку 11.3. Індуктор створює змінний магнітний потік і працює як первинна обмотка силового трансформатора. Деталь, що підлягає нагріванню, розміщується всередині індуктора таким чином, щоб між індуктором і деталлю залишався проміжок. Деталь виконує роль вторинної обмотки трансформатора з одним короткозамкненим витком. У деталі, згідно із законом Джоуля–Ленца, виникає електрошушійна сила (ЕРС)  $E$ :

$$E = 4,44 \cdot \Phi \cdot w \cdot f, \quad (11.1)$$

де  $\Phi$  – магнітний потік індуктора, Вб;

$w$  – кількість витків індуктора;

$f$  – частота мережі, Гц.

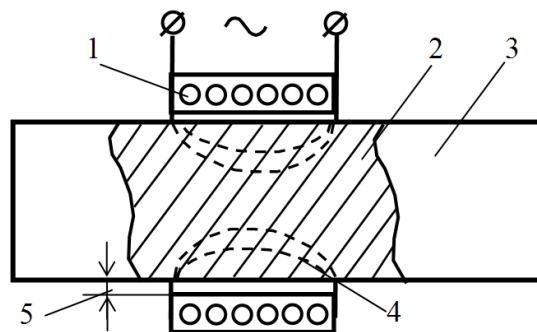


Рисунок 11.3 – Схема індукційного нагрівання:  
1 – індуктор; 2 – магнітний потік у деталі; 3 – деталь;  
4 – наведений струм; 5 – повітряний проміжок

Під дією ЕРС в тілі деталі протікає струм, який спричиняє її нагрівання. Потужність, що виділяється в деталі, пропорційна квадрату струму й опору тіла, що нагрівається

$$P = I^2 \cdot R, \quad (11.2)$$

де  $I$  – вихровий струм, що виникає в тілі, А;

$R$  – активний опір тіла, що нагрівається, Ом.

Переваги електроустановок індукційного нагрівання:

- висока швидкість нагрівання, пропорційна підведеній потужності;
- хороші санітарно-гігієнічні умови праці;
- можливість регулювати зони дії вихрових струмів у просторі (ширина й глибина прогрівання);
- простота автоматизації технологічного процесу;
- досить високий рівень отримуваних температур, достатніх для нагрівання металів, плавлення металів і неметалів, перегрівання, розплавлення, випаровування матеріалів і отримання плазми.

Недоліки:

- потрібні складніші джерела живлення;
- підвищена питома витрата електричної енергії на технологічні операції.

Ефективність передачі енергії від індуктора до заготовки залежить від величини проміжку між ними й підвищується при його зменшенні. Глибина нагрівання тіла збільшується зі зростанням його питомого опору і знижується зі збільшенням частоти струму. Струм індукторів становить від сотень до декількох тисяч ампер при середній щільності струму  $20 \text{ А/мм}^2$ . Втрати потужності в індукторі можуть сягати 20–30 % від корисної потужності.

Індукційні електротехнологічні установки поділяються на плавильні, нагрівальні та гартівні. Печі можуть працювати на промисловій частоті 50 Гц, середній частоті 0,5–10 кГц і високій частоті – сотні тисяч кГц. Більш детально розглянемо індукційні плавильні печі.

**11.3.1 Індукційні плавильні печі.** Індукційні плавильні печі застосовують для плавлення чорних і кольорових металів: алюмінію, чавуну, міді, сталі. У наш час в чавунно-ливарному виробництві застосовуються 76 % вагранок, 23 % індукційних плавильних печей і 1 % електродугових печей. Спостерігається стійка тенденція до збільшення обсягів використання індукційних плавильних печей.

За конструкцією плавильні печі поділяються на індукційні каналні печі (далі – ІКП) і індукційні тигельні печі. Канальні печі мають осердя, тигельні виготовляють із осердям або без нього.

Робочий процес печей передбачає електродинамічний і тепловий рух рідкого металу у ванні або тигелі, що сприяє отриманню однорідного за складом металу і рівномірному прогріванню по всьому об'єму; незначне угорання металу (в декілька разів менше, ніж в дугових печах).

Робочі температури печей:  $750 \text{ }^\circ\text{C}$  – для виплавлення алюмінію;  $1\ 200 \text{ }^\circ\text{C}$  – для виплавлення міді;  $200\text{--}1\ 400 \text{ }^\circ\text{C}$  – для виплавлення чавуну;  $1\ 600 \text{ }^\circ\text{C}$  – для виплавлення сталі.

**Індукційні каналні печі** застосовують для плавлення кольорових металів, високоякісних сплавів і чавуну. Печі працюють тільки на промисловій частоті.

До основних вузлів ІКП відносять плавильну футеровану ванну й індукційну одиницю, у яку входять подовий камінь із закритим каналом, магнітне осердя та індуктор (рис. 11.4).

Ванна печі становить кожух із заліза, всередині із футеруванням. На бічній поверхні кожуха розташований зливний отвір.

Індукційна одиниця складається з індуктора, шихтованого магнітопроводу і подового каменя з плавильними каналами, що опоясують індуктор. Індуктор, по суті, є первинною обмоткою трансформатора, виготовляється з міді із круглим, прямокутним перетином або з мідної трубки, усередині якої циркулює вода (водяне охолодження). Магнітопровід збирають із листової трансформаторної сталі, осердя броньового або стрижневого типу. Подовий камінь виготовляють із бронзи або немагнітної сталі, він має один або кілька каналів тепловиділення. Канал з розплавленим металом 1 становить короткозамкнений виток вторинної обмотки трансформатора. Для

з'єднання ванни з подовим каменем у піддоні є отвір. У момент плавлення розплавлений метал циркулює з каналу у ванну, і навпаки. Більш нагрітий метал постійно заміщується на більш холодний, доки існує різниця температур в каналі й шахті печі. Через недостатню циркуляцію температура металу в каналі може на 100–200 К перевищувати температуру у ванні. Ця обставина здебільшого і визначає питому потужність ІКП, їхню продуктивність, а також термін використання футерування каналу.

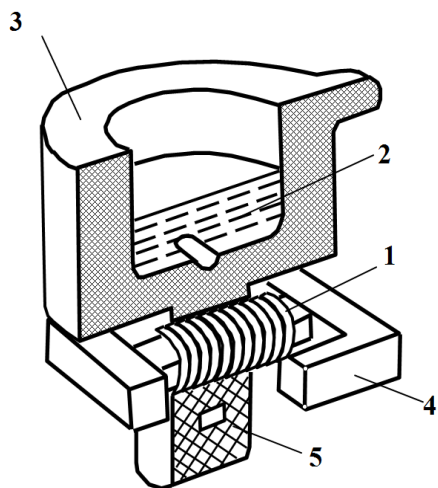


Рисунок 11.4 – Індукційна канална плавильна піч: 1 – індуктор; 2 – розплавлений метал; 3 – ванна; 4 – магнітне осердя; 5 – подовий камінь з каналом тепловиділення.

Кришку піднімають гідро- або електроприводом. Подовий камінь охолоджується повітрям за допомогою вентилятора 9 через проміжок між індуктором і подовим каменем. Електроенергія до індуктора підводиться гнучкими кабелями.

Канал тепловиділення має бути постійно заповненим електропровідним тілом. Для первинного пуску каналних печей у канал заливають розплавлений метал або вставляють шаблон із матеріалу, який буде плавитися в печі. У разі завершення плавлення метал із печі заливають в повному обсязі, залишаючи так зване «болото», яке забезпечує заповнення каналу тепловиділення для подальшого пуску.

Для зливання металу (рис. 11.5) через зливний носок 4 піч нахилляють за допомогою гідро- або електроприводу. Піч завантажують зверху, через отвір, закритий під час плавлення футерованою кришкою 5

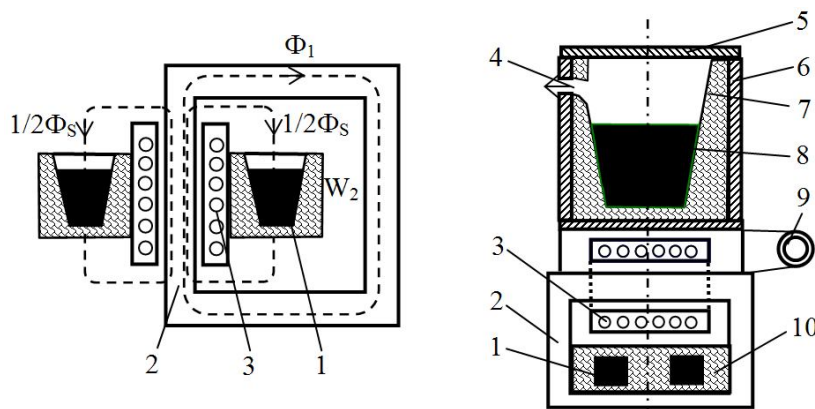


Рисунок 11.5 – Схема і конструкція ІКП:

- 1 – канал з розплавленим металом; 2 – шихтований магнітопровід;
- 3 – індуктор; 4 – зливний носок; 5 – кришка; 6 – корпус печі;
- 7 – футерована ванна; 8 – метал; 9 – вентилятор; 10 – подовий камінь

**Принцип роботи печі.** Індукційна піч це своєрідний трансформатор, у якому первинною обмоткою є індуктор, а вторинна обмотка і навантаження – це замкнутий канал із розплавленим металом. Працює такий трансформатор у режимі к.з., при якому вся енергія, що підводиться, витрачається на нагрівання металу. У разі ввімкнення індуктора в мережу змінний струм, що виникає в індукторі, створює навколо нього змінне магнітне поле, яке замикається через сталь осердя. Зі свого боку змінний магнітний потік індукує в металі каналу ЕРС, унаслідок чого в ньому виникає струм. Струм, наведений у замкнутому ланцюзі каналу, виділяє тепло.

Коефіцієнт потужності індукційних печей –  $\cos\varphi = 0,2-0,8$ . Менші значення коефіцієнта потужності відповідають ІКП для плавлення металів із низьким питомим опором (мідь, алюміній), а великі значення – із високим питомим опором (сталь, чавун).

Живлення печей здійснюють від мереж напругою 380 В і вище залежно від потужності. Печі з осердям випускають одно-, дво- й трифазними потужністю до 2 000 кВт. На рисунку 11.6 подано схему живлення ІКП промислової частоти від пічного трансформатора напругою 10/0,4 кВ. Паралельно до індуктора підключено батарею конденсаторів, що складається з постійно ввімкнених секцій С і N, й керованих секцій С<sub>к</sub>.

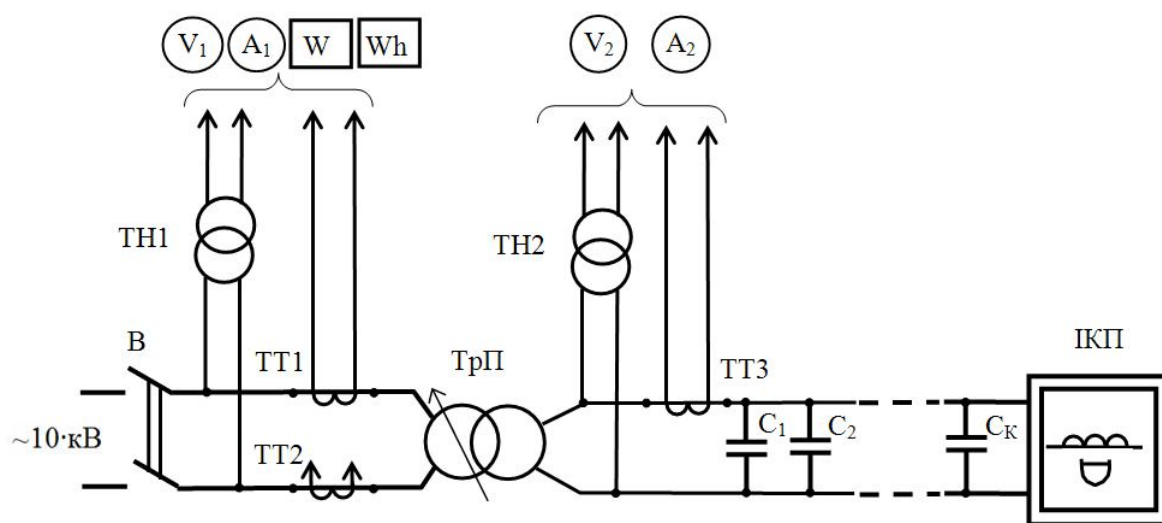


Рисунок 11.6 – Принципова електрична схема живлення ІКП промислової частоти

#### 11.4 Дугові електричні печі

Дугові електропечі призначені для плавлення металів і сплавів. За принципом створення дуги існують дугові печі прямого нагрівання (дуга горить між електродами й розплавленим металом) і дугові печі непрямого нагрівання (дуга горить між електродами). Більш поширені дугові печі прямого нагрівання. Вони застосовуються для плавлення чорних і тугоплавких металів. Дугові печі непрямого нагрівання застосовують для плавлення чавуну і кольорових металів.

Дугова електропіч (рис. 11.7) – це складний потужний механізований і автоматизований комплекс електротехнічного устаткування, до складу якого входять електро- й гідроприводи подачі електродів, пічний трансформатор, струмопровід подачі напруги на електроди (з низької сторони пічного трансформатора), розподільний пристрій на стороні високої напруги з вимикачами, автоматичний регулятор потужності, щити контролю та сигналізації тощо.

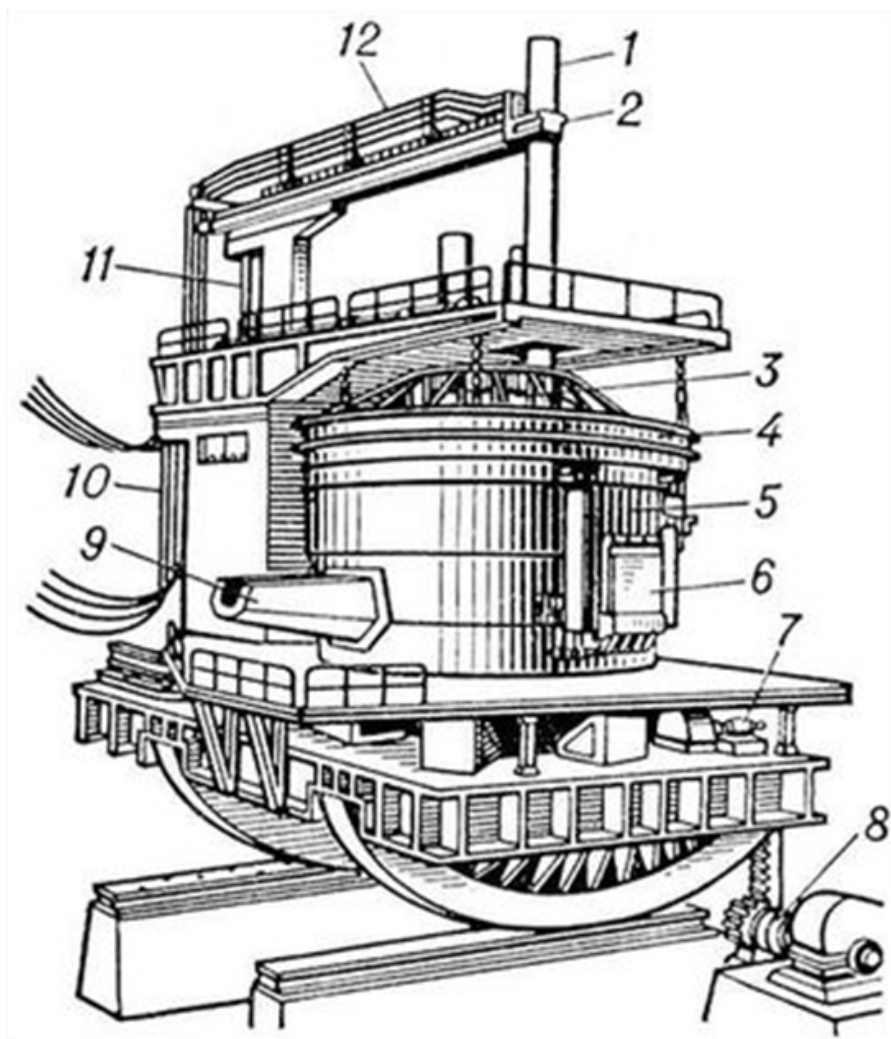


Рисунок 11.7 – Дугова сталеплавильна піч ДСП-200 [66]:

1 – графітований електрод діаметром 710 мм; 2 – електродотримач; 3 – зведення; 4 – водоохолоджуване склепінне кільце; 5 – циліндровий кожух; 6 – водоохолоджувані допоміжні дверцята; 7 – механізм повороту печі навколо вертикальної осі. 8 – механізм нахилу печі; 9 – зливний жолоб; 10 – рухлива частина пристрою підведення струму з водоохолоджуваних гнучких кабелів; 11 – шток для вертикального переміщення системи: стійка – рукав – електродотримач – електрод; 12 – пристрій підведення струму з охолоджуваних мідних труб

Основним елементом конструкції дугової печі (рис. 11.7) є металевий корпус 5 у вигляді кожуха, зазвичай круглого перерізу. Зсередини кожух футерований вогнетривкими матеріалами. Вогнетривке мурування зміню-

го зведення печі 3 виконане в кільці. Для завантаження шихти в піч зведення 3 зазвичай піднімають і відводять убік. У стінах печі є одне або два робочі вікна і один випускний отвір із жолобом 9 для зливання металу й шлаку в ківш. У зведенні розташовані отвори для введення електродів 1. Піч встановлюється на люльці, щоб її можна було нахилити у бік робочого вікна або випускного отвору за допомогою механізму нахилу 8 з електричним або гідравлічним приводом. Сучасні дугові печі обладнані індукторами для електромагнітного перемішування рідкої ванни.

**11.4.1 Електроустаткування дугових печей.** Базове електрообладнання дугових пічних установок (рис. 11.8) включає: піч 10 з електродами і ванною, у якій горять дуги; знижувальний трансформатор 7, разом з яким часто розміщені дроселі 5; коротку мережу, що з'єднує вторинні виводи трансформатора з електродами печі; комутаційну, вимірювальну й захисну апаратуру.

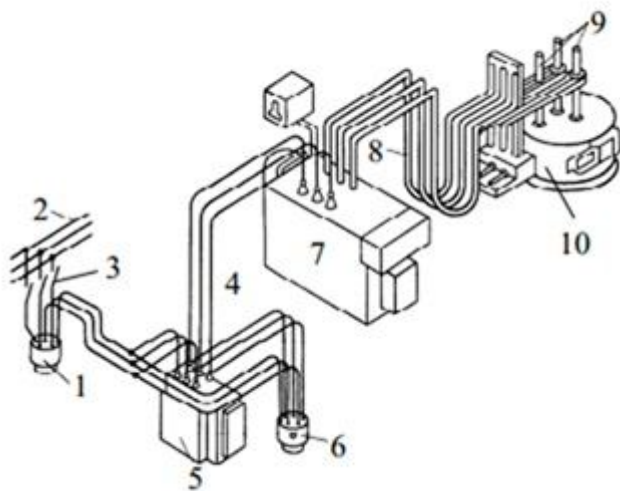


Рисунок 11.8 – Схема електричного обладнання дугової печі:  
1, 6 – вимикачі; 2 – високовольтні шини; 3 – роз'єднувач;  
4 – високовольтна мережа; 5 – реактор; 7 – пічний трансформатор;  
8 – коротка мережа; 9 – електроди; 10 – дугова піч

У пічних установках застосовують трансформатори й дроселі, виготовлені у вигляді окремих апаратів, а також трансформатори з убудованими дроселями.

У дугових пічних установках розрізняють головний і допоміжні ланцюги струму (рис. 11.9). До головного ланцюга електричного струму належать основне силове електрообладнання та електричні дуги печі. Допоміжними вважаються ланцюги управління, вимірювання, захисту, автоматики тощо.

Головний ланцюг включає первинну і вторинну обмотки силового трансформатора. Первинний ланцюг складається з послідовно з'єднаних апаратів високої напруги, дроселя й первинної обмотки індивідуального пічного трансформатора. Вторинний ланцюг складається з послідовно

з'єднаних вторинної обмотки трансформатора, струмопроводів короткої мережі, електродів і електричних дуг. Усі частини ланцюга розташовуються поза піччю і називаються підвідною електричною мережею.

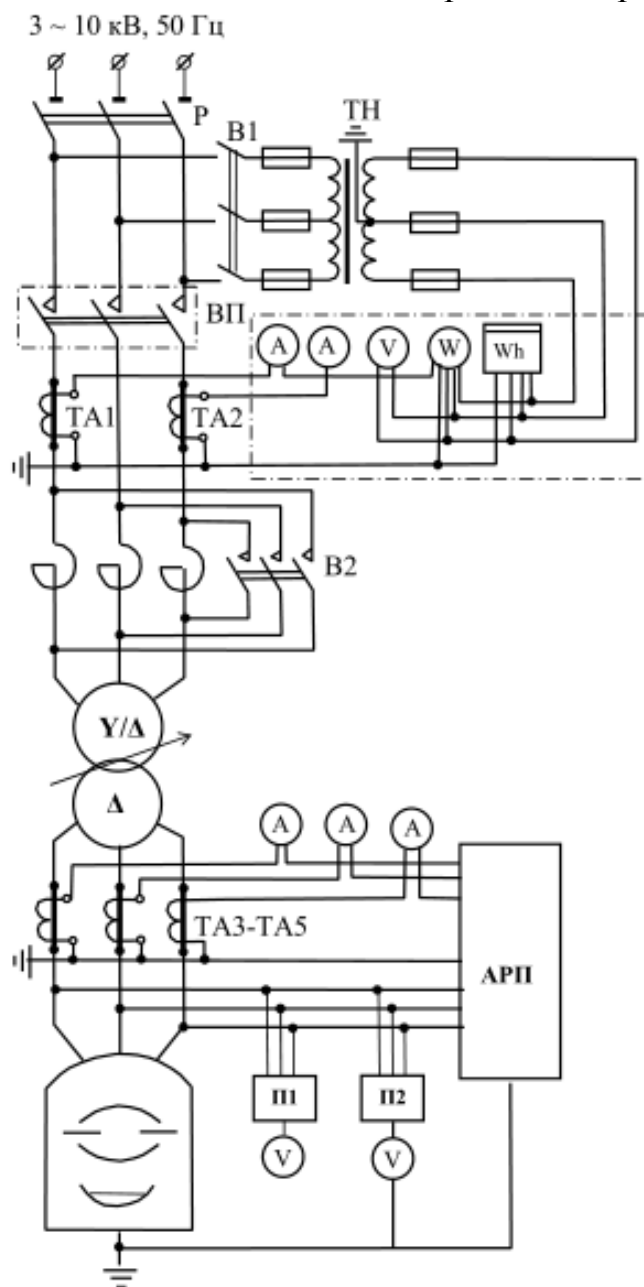


Рисунок 11.9 – Схема електропостачання дугової печі

Підключення лінії живлення високої напруги до введення здійснюється через роз'єднувачі й вимикачі високої напруги, які разом із захисними апаратами встановлюють у розподільчому пристрої пічної установки.

Пічну трансформаторну підстанцію живлять від мережі 10–35 кВ, а для потужних підстанцій – від мережі 110 кВ. Вимірювальні й захисні прилади на високій стороні з'єднують через трансформатори струму й напруги.

Оптимальний режим печі підтримується за допомогою автоматичних регуляторів потужності (АРП на рис. 11.9). Вони подають команду на ме-



ханізми пересування електродів, змінюючи таким чином довжину дуги, і встановлюють задану потужність дугового печі. Для комплексного керування технологічним процесом у дугових печах застосовують автоматизовані системами керування.

Для підтримання горіння дуги потрібна напруга від 120 до 600 В і стум 10–15 кА. Менші значення напруги й струму стосуються печей із ємністю 12 т і потужністю 50 МВА.

Печі споживають значні струми в тисячі й десятки тисяч ампер. Ці струми спричиняють значне падіння напруги навіть на малих опорах мережі живлення електродів. З огляду на це пічні трансформатори встановлюють безпосередньо поруч із піччю.

Електропривод механізмів печі використовує асинхронні двигуни з короткозамкненим ротором на напрузі 280 В, потужністю 1–2 кВт на невеликих печах, 10–20 кВт – на більших печах. Двигуни приводу переміщення електродів постійного струму живляться від електромашинних чи магнітних підсилювачів, а також від тиристорних перетворювачів. Двигуни закритого виконання із теплостійкою ізоляцією.

Печі мають також пристрої перемішування рідкої ванни металу. Під днищем печі розміщують статор з двома обмотками, струми яких зсунуті за фазою на 90°. Обмотки створюють бігуче магнітне поле, яке приводить у рух шар металу.

**11.4.2 Особливості процесу плавлення.** Завантажену в дугову піч тверду шихту починають обробляти зі стадії розплавлювання. На цій стадії в печі запалюється дуга й розпочинається розплавлення шихти під електроди. У процесі розплавлення шихти електрод опускається вниз і утворює колодязі для прискорення. Особливістю стадії розплавлення є нестійке горіння електричної дуги. Низька стійкість дуги обумовлюється низькою температурою в печі.

Перехід дуги з однієї шихти на інші, а також численне обривання дуги експлуатаційними короткими замиканнями, що спричинюється обвалом і переміщенням провідних шматків шихти. Інші стадії обробки металу відбуваються в рідкому стані і характеризуються спокійним горінням дуги. Однак необхідно забезпечити широкий діапазон оперативного регулювання й високу точність підтримування потужності, що вводиться в піч. Регулювання потужності забезпечує необхідний перебіг процесу плавлення.

Напругу на дуговій печі під час плавлення потрібно змінювати в досить широких межах. На першому етапі плавлення, коли відбувається розплавлювання скрапу, у піч необхідно вводити максимальну потужність, щоб пришвидшити цей процес. Однак при холодній шихті дуга нестійка, тому для збільшення потужності необхідно підвищувати напругу. Тривалість етапу розплавлення становить 50 % і більше від загального часу плавлення, при цьому споживається 60–80 % електроенергії. На другому і третьому етапах – при окислюванні й рафінуванні рідкого металу (видаленні

шкідливих домішок і випалюванні зайвого вуглецю) дуга горить спокійніше, температура в печі вища, довжина дуги збільшується.

Печі, у яких можуть виплавляються різні марки металу (різні умови плавлення), потребують регулювання напруги. Щоб забезпечити регулювання напруги дугових печей, їхні трансформатори виготовляють з декількома ступенями низької напруги, зазвичай із перемиканням відпайок обмотки високої напруги (12 і більше ступенів). Трансформатори потужністю до 10 000 кВА оснащені пристроєм ПБЗ (перемикання без збудження). Більш потужні трансформатори обладнані пристроєм РПН (регулювання під напругою). У невеликих печах застосовують 2–4 ступені, а також найпростіший спосіб регулювання напруги – перемикання обмотки високої напруги із «трикутника» на «зірку».

Щоб забезпечити стійке горіння дуги змінного струму й обмежити поштовхи струму при коротких замиканнях між електродом і шихтою 2–3-кратним значенням номінального струму електрода, загальний відносний реактивний опір устаткування повинен становити 30–40 %. Реактивний опір пічних трансформаторів – 6–10 %, опір мережі на стороні низької напруги для малих печей – 5–10 %. Тому на стороні високої напруги трансформатора для печей ємністю до 40 т вмикають реактор із опором приблизно 15–25 %, що входить у комплект трансформаторного агрегату. Реактор виконують як дросель із ненасиченим осердям.

Автоматичне регулювання потужності дугових печей забезпечується автоматичними регуляторами потужності, які підтримують сталість заданої потужності електричної дуги. Робота автоматичного регулятора потужності дугової печі базується на зміні положення електродів щодо завантаження – у дугових печах прямого нагрівання або відносно один одного в дугових печах непрямого нагрівання, тобто в обох випадках регулюється довжина дуги. Виконавчими пристроями зазвичай є електродвигуни.

Загалом зазначимо, що дугові електропечі – це досить потужний споживач ЕЕ, який працює з низьким коефіцієнтом потужності (0,7–0,8). Режим плавлення металу характеризується стрибками струму. Споживана з системи електропостачання потужність змінюється протягом часу плавлення. Електрична дуга є джерелом високочастотних гармонік. Повний час плавлення становить 1–1,5 год для печей потужністю до 10 т і до 2,5 год для печей потужністю до 40 т.

Щоб зменшити вплив дугових електропечей на показники якості системи електропостачання, застосовують такі заходи:

- встановлення конденсаторних батарей на шинах головної знижувальної підстанції, яка забезпечує живлення групи печей, із можливим автоматичним керування реактивною потужністю;
- використання фільтрів, налаштованих на найбільш інтенсивні гармонічні складові;
- підключення пічних трансформаторних підстанцій на самостійне живлення, не пов'язане з іншими споживачами, на напрузі 110, 220 кВ.

**11.4.3 Пічні трансформатори** забезпечують живлення електродугових печей. Для печей невеликої та середньої потужності трансформатори випускають трифазними, для печей великої потужності застосовують електричну схему з однофазних трансформаторів. Вони дозволяють підвищити коефіцієнт потужності внаслідок більш раціональної конструкції короткої мережі та можливості регулювати потужність і напругу окремо на кожній фазі.

Трансформатори дугових сталеплавильних печей мають ряд особливостей:

- допускають високі номінальні струми на низькій стороні (до десятків і сотень кілоампер);
- мають великий коефіцієнт трансформації (від 6–110 кВ до декількох сотень вольт);
- мають багато ступенів напруги й широкий діапазон її регулювання (приблизно на 500 %);
- характеризуються високою стійкістю щодо коротких замикань і високою конструктивною міцністю.

Силові пічні трансформатори обладнані пристроями примусового охолодження зі штучною циркуляцією масла. Вони забезпечені регуляторами напруги під навантаженням.

Обмотки трифазних трансформаторів з'єднують за схемою «трикутник - трикутник» з можливістю подальшого перемикавання на схему «трикутник – зірка», що дозволяє регулювати рівень вторинної напруги.

Ступені напруги дугової сталеплавильної печі малої і середньої потужностей перемикають при вимкненому навантаженні, для чого перемикач постачають блокуванням з головним високовольтним вимикачем. У трансформаторах великої потужності перемикавання можна здійснювати під навантаженням за допомогою спеціального перемикача. Трансформаторний блок містить регулюючий автотрансформатор з обмотками грубого й тонкого регулювання і головний трансформатор з первинною і вторинною обмотками. На первинну обмотку силового трансформатора напруга мережі на першому ступені подається повна, а на інших – її певна частка, яка залежить від положення контактів виборного перемикача.

Високовольтні роз'єднувачі в схемах дугових пічних установок призначені для створення видимого розриву силового ланцюга електропечі. Робота з роз'єднувачем здійснюється тільки при знятій високій напрузі.

Вимикачі високої напруги спільно з апаратурою захисту оберігають піч від струмів короткого замикання і здійснюють оперативне відключення й вимикання печі. Останнім часом на напругах 10, 35 і 110 кВ застосовуються елегазові та вакуумні вимикачі.

Електричною схемою дугової сталеплавильної печі передбачено й аварійне відключення пічного трансформатора, яке спрацьовує при неприпустимих струмах в його первинній обмотці, а також у разі надходження сигналу від газового захисту трансформатора або перемикача напруги.

Дроселі (реактори), що застосовують у схемі, призначені для обмеження стрибків струму при коротких замиканнях і стабілізації горіння дуг за рахунок створення падаючої характеристики ланцюга живлення. У безперервно працюючих дугових сталеплавильних печей режим роботи дроселів переривчастий. Вони працюють у важких умовах, тому мають відповідати високим вимогам щодо термічної і механічної міцності.

Дроселі вмикають між мережею та лінійними контактами обмотки високої напруги трансформатора або у «фазу» послідовно з певною обмоткою.

Для передачі електричної енергії від вторинної обмотки трансформатора в робочий простір ванни використовують коротку мережу дугових печей. Активний і індуктивний опори є складовими частинами загального опору ділянок пічної установки. Вони помітно впливають на такі енергетичні показники, як потужність, коефіцієнт потужності, енергетичний ККД тощо.

Коротка мережа становить струмопровід від вторинних обмоток трансформатора до електродів дугової печі. У цій мережі протікають дуже великі струми (до 100 кА і вище), тому струмопроводи короткої мережі виготовляють із великим перерізом у вигляді пакетів мідних стрічок, мідних шин або труб з водяним охолодженням.

Коротка мережа повинна мати мінімальну довжину і раціональне розташування провідників як для зниження індуктивності, так і для рівномірного завантаження фаз і трансформатора.

В електричній схемі дугової сталеплавильної печі передбачають елементи захисту від струмів перевантаження і аварійного короткого замикання. Захист від перевантажень зазвичай включають на стороні низької напруги за допомогою максимальних струмових реле із залежною витримкою часу. Захист від струмів аварійного короткого замикання здійснюється за допомогою максимальних струмових реле миттєвої дії на стороні високої напруги.

**11.4.4 Особливості режимів роботи дугових печей.** Дугові електричні печі як споживачі електричної енергії належать до II і I категорій надійності електропостачання. Вони характеризуються високою одиничною потужністю (0,4–80 МВА) і мають коефіцієнт потужності від 0,70 до 0,85, а також цілодобовий різко змінний циклічний режим роботи.

Робочий орган дугової сталеплавильної печі – електрична дуга являє собою нелінійний активний опір, її параметри значною мірою залежать від умов горіння. Потужність дуги регулюється індуктивними елементами мережі, а також змінюванням напруги живлення й довжини дуги. У початковий період піч працює з максимальним навантаженням і витрачає від 50 до 80 % усієї споживаної енергії на повний цикл. Миттєва потужність змінюється в діапазоні середнього значення, що визначається автоматичним регулятором. Коливання реактивної потужності досягає 200 % зі швидкістю – до 500 Мвар/с і вони істотно перевищують коливання активної потужно-

сті. У цей період часто виникають технологічні короткі замикання, що спричиняються замиканням електродів шихтою або рідким металом. У процесі роботи печі спостерігаються стрибки струму різної амплітуди і тривалості, які призводять до несинусоїдальності напруги і появи вищих гармоніки випадкового характеру.

Робочі графіки печі відображають значну нерівномірність споживаної потужності. Крім цього, спостерігається статична й динамічна асиметрії навантаження фаз, що становить до 10 % коливань струмів, які спричинюють коливання напруги в мережі живлення, а це істотно погіршує роботу інших споживачів. Щоб знизити шкідливий вплив дугової печі на роботу електричної мережі, проводять обов'язкові організаційно-технічні заходи технологічного та електроенергетичного спрямування: автоматичне регулювання струму й компенсацію реактивної потужності, зменшення коливань напруги по фазах, фільтрацію вищих гармонік.

Технологічні заходи передбачають сортування та підготовку скрапу, його рівномірне завантаження; використання якісних електродів; використання разом зі скрапом збагаченої і частково відновленої залізної руди у вигляді окатишів тощо.

Відповідно до вимог щодо якості електричної енергії [58] у мережі живлення передбачають такі заходи: застосування підвищеної напруги 110–220 кВ; застосування глибокого введення ЛЕП на територію промислових підприємств; підключення печі в точці з великою потужністю короткого замикання. Застосовувані схемні рішення для живлення окремих печей та цехів повинні передбачати зв'язок із іншими споживачами тільки на напрузі 110–220 кВ схеми електропостачання підприємства.

На підприємствах експлуатуються як дугові електропечі змінного, так і постійного струму. У додатках В і Г наведені технічні характеристики деяких моделей дугових електричних печей.

## **Висновки**

Промислове підприємство, як споживач електричної енергії, характеризується такими ознаками:

- значні обсяги споживання електричної енергії;
- великі значення питомої потужності на 1 м<sup>2</sup> площі території;
- нерівномірність добового графіка навантаження;
- наявність власного джерела живлення (головної заводської підстанції), а в деяких випадках і власної електростанції як третього незалежного джерела;
- істотний вплив на режим роботи та показники якості ЕЕ в системі електропостачання промислового підприємства.

## Питання для самоконтролю

1. За якими ознаками класифікують електроспоживачів промислових підприємств?
2. Охарактеризуйте загальнопромислове устаткування.
3. Які електроприймачі відносять до електротехнологічного устаткування?
4. Яким є принцип роботи індукційних печей?
5. Які види індукційних печей використовуються на підприємствах?
6. Поясніть схему і конструкцію індукційної каналної печі.
7. У чому полягають особливості електроприймачів перетворювального електроустаткування?
8. Назвіть основні елементи печі ДСП-200.
9. Яке основне електричне обладнання застосовують у схемі електропостачання печі? Поясніть його призначення.
10. Поясніть схему електропостачання дугової електропечі.
11. Як і з якою метою регулюють напругу дугових печей?
12. Які заходи застосовують для зменшення впливу дугових печей на показники якості електричної енергії?
13. Поясніть призначення і особливості пічних трансформаторів.
14. Охарактеризуйте особливості режимів роботи дугових сталеплавильних печей.

## Список рекомендованих джерел

Основні джерела: [54, С. 151–201].

Додаткові джерела: [59, 69].

## Розділ 12 ЕЛЕКТРОСПОЖИВАЧІ СИСТЕМ ЖИТТЄЗАБЕЗПЕЧЕННЯ МІСТ

**Ключові поняття:** система життєзабезпечення міста, система водопостачання (водовідведення, теплопостачання), насосна станція, бойлерна, міський електричний транспорт, тягова підстанція.

За сучасних умов постійного розвитку й збільшення чисельності населення міст, появи великих міст «мільйонерів», особливу увагу приділяють елементам, які забезпечують ефективне функціонування всіх складових міської інфраструктури, – підприємствам із обслуговування основного виробництва й населення, що виконують на території міст функції створення необхідних умов ефективної діяльності галузей матеріального виробництва і об'єктів невиробничої сфери. Усі ці елементи прийнято об'єднувати в рамках одного поняття – система «Життєзабезпечення міста» (далі – СЖМ).

СЖМ – це складний комплекс містобудівних, соціально-економічних, господарсько-побутових, медичних закладів, підприємств енергопостачання, транспорту і зв'язку, торгівлі, соціально-культурної сфери тощо, основна функція яких зазначена в самій назві системи, складовими якої вони є, а саме – життєзабезпечення міста.

Практично всі об'єкти СЖМ мають потребу в ЕЕ, яку можна розглядати з двох поглядів..

Перший – це *потреба в енергії для функціонування* певного об'єкта, як будівельного елемента, а саме: тепла енергія на опалення житлових і комунального призначення будинків, гаряча й холодна вода для санітарно-гігієнічних потреб населення, прибирання приміщень. ЕЕ на вентиляцію і кондиціювання повітря, роботу ліфтів і підймально-транспортних механізмів, систем протипожежної та іншої автоматики й захисту, освітлення будинків і відкритих просторів.

Другий – це *потреба в ЕЕ для виконання заданого технологічного процесу* й роботи технологічного обладнання. Це процеси перетворення ЕЕ в енергію руху на міському електричному транспорті, обеззараження питної і стічної води, перетворення електричної енергії на світлову й ультрафіолетову у випромінювальному обладнанні, процеси перетікання рідини в системах водо- й теплопостачання.

Щодо адміністративного управління виокремлюють групу комунальних електроспоживачів. До цієї групи відносять підприємства водопостачання та водовідведення, об'єднані котельні й теплові пункти, зовнішнє освітлення, міський електричний транспорт, бази ремонтно-будівельного виробництва й житлового господарства, виробничі бази інших підрозділів комунального господарства міст, устаткування протипожежного захисту, обладнання диспетчерських служб тощо.

*Характерною ознакою електроспоживачів СЖМ є значна нерівномірність добового графіка споживання ЕЕ, особливо в осінньо-зимовий період.*

Близько 60 % ЕЕ споживається в період вечірнього максимуму: улітку споживається на 15–20 % менше ніж зимою.

У цьому розділі ми розглянемо характерні групи системи «Життєзабезпечення міста», електроприймачі й електроспоживачі яких становлять вагомую частину загального обсягу споживання електричної енергії і впливають на показники якості ЕЕ та на режим роботи системи електропостачання. Розгляд усіх складових СЖМ виходить за межі нашого курсу.

На рисунку 12.1 наведено модель взаємодії складових СЖМ (системи «Електропостачання міста» як джерела ЕЕ і систем «Водопостачання та водовідведення», «Теплопостачання міста» і «Міський електричний транспорт» як споживачів ЕЕ) щодо розгляду особливостей функціонування цих груп електроспоживачів і їхнього впливу на систему електропостачання.

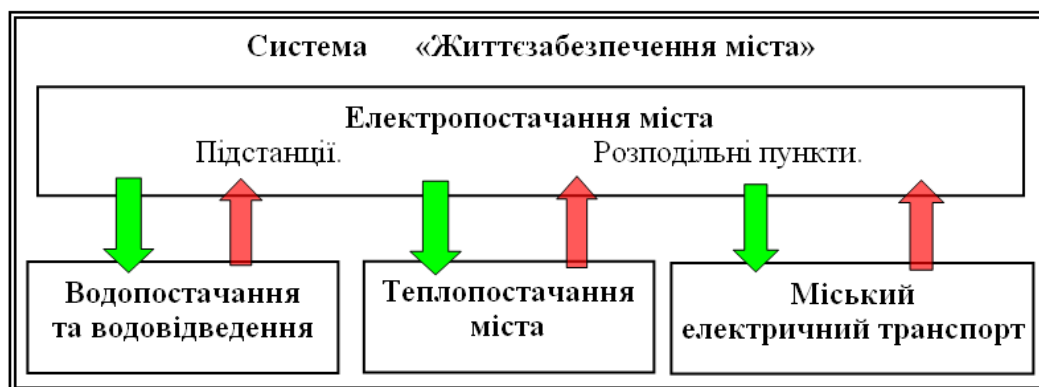


Рисунок 12.1 – Складові системи «Життєзабезпечення міста»

## 12.1 Система «Водопостачання та водовідведення»

**12.1.1 Загальні відомості.** Система водопостачання та водовідведення сучасного міста – це комплекс інженерних мереж і споруд, які забезпечують безперебійне водопостачання мешканців та підприємств міста, відведення господарсько-побутових, виробничих стоків та їхнє очищення. Функціонально комплекс можна поділити на три складових – елементи системи: водопостачання, елементи дренажних систем і елементи системи водовідведення.

Основне устаткуванням систем водопостачання та водовідведення [45]:

- насосні станції першого підйому;
- обладнання підприємств з очищення та обеззараження води питної якості;
- насоси станцій другого підйому, які передають воду від резервуарів чистої води у водопровідну мережу міста;
- насоси станцій третього та наступний підйомів, зокрема станцій підкачування безпосередньо в споживача;
- насоси й насосні станції дренажних систем;
- насоси станцій перекачування стічної води, які встановлюють у випадках, коли неможливе її самостійне стікання до станцій очищення;
- обладнання підприємств з очищення стічної води й оброблення опадів.



Функціонально систему можна поділити на дві складові: систему водопостачання й систему водовідведення.

**12.1.2 Система «Водопостачання міста»** - це комплекс інженерних споруд, основною функцією яких є безперебійне забезпечення всіх споживачів міста водою. Реалізація основної функції потребує виконання низки завдань (підфункцій), а саме: отримання води з природних джерел; очищення води й доведення її якості до вимог споживачів; транспортування води до міста; розподіл води між споживачами.

Для виконання цих завдань систему водопостачання укомплектовують такими складовими:

- водозабірні споруди, які здійснюють прийом води з природних джерел;
- водопідіймальні споруди (насосні станції), які подають воду до місць її очищення, збереження або споживання;
- споруди (станції) очищення води;
- водоводи й водогінні мережі, що слугують для транспортування й подачі води до місць її споживання;
- вежі й резервуари, що відіграють роль регулювальних і запасних ємностей у системі водопостачання.

Вода, подана до міста, забезпечує реалізацію таких потреб:

- використання води населенням для господарських потреб (вживання води, гігієнічні потреби, приготування їжі тощо);
- упорядкування міст і населених пунктів, поливання вулиць, зелених насаджень тощо;
- виробничі цілі на підприємствах промисловості, транспорту, сільськогосподарства;
- пожежогасіння;
- власні потреби водопроводу – промивання фільтрів, мережі тощо.

Подачу води в систему і її подальшу циркуляцію забезпечують насосні станції, до складу яких входять насосні установки, гідротехнічні споруди й енергетичне обладнання, що технологічно пов'язані під час роботи і забезпечують безперебійну подачу води в розвідну мережу системи водопостачання або зрошення, а також її відкачування з осушувальних або каналізаційних систем.

Подати воду до споживача за допомогою однієї насосної станції не завжди можливо. Тому застосовують східчасте піднімання води декількома станціями. Перша насосна станція таких водопіймальних «сходів» називається головною насосною станцією або станцією першого підйому. Інші станції, залежно від виконуваної роботи, називають станціями перекачування або підкачування.

На рисунку 12.2 зображено основні елементи системи водопостачання міста. Вода надходить до водозабірних споруд 1, де насосами насосної станції першого підйому 2 по водоводах першого підйому 3 подається на станцію очищення води 4. Після очищення з резервуарів чистої води 5 вода забирається насосами насосної станції другого підйому 6 і по водоводах другого підйому 7 подається до водонапірної вежі 8. Водонапірна вежа 8 може розташовуватися як у місті так і за його мережами. У разі значної чи-

сельності населення замість водонапірної вежі використовують резервуари чистої води великої ємності. Міська розподільча мережа 19 з'єднана з водонапірною вежею 8 водоводами 9 і забезпечує подачу води в окремі райони та квартали міста.

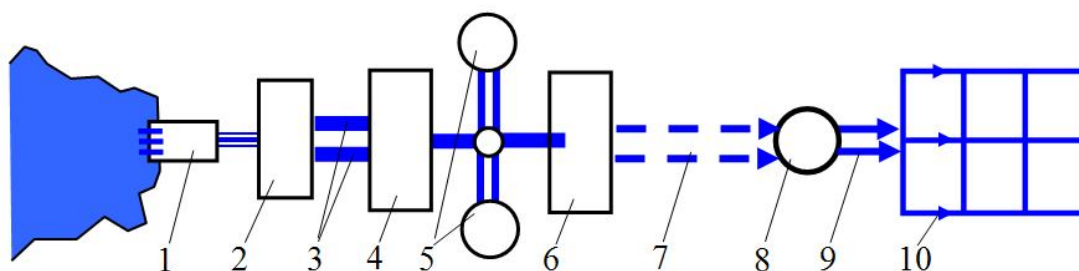


Рисунок 12.2 – Складові системи «Водопостачання міста»

1 – водозабірні споруди; 2 – насосна станція першого підйому; 3 – водоводи першого підйому; 4 – станція очищення води; 5 – резервуари чистої води; 6 – насосна станція другого підйому; 7 – водоводи другого підйому; 8 – водонапірна вежа; 9 – водоводи міської мережі; 10 – зовнішня водорозподільна мережа міста

Взаємне розташування споруд системи водопостачання та їх склад можуть відрізнятися. Насосна водопровідна станція першого підйому може об'єднуватися з водоприймальними спорудами, а насосна станція другого підйому – розташовуватися в одному блоці з резервуаром чистої води. На розташування споруд системи істотно впливає рельєф місцевості. У випадку розташування джерела водопостачання значно вище відносно міста, вода з джерела подається без допомоги насосів, тобто самопливом. Водонапірну вежу завжди встановлюють на височині. За наявності поблизу населеного пункту значної природної височини замість водонапірної вежі використовують напірний резервуар.

Основними електроспоживачами системи «Водопостачання міста» є електродвигуни насосних агрегатів. Вони повинні відповідати специфічним вимогам, а саме:

- пуск двигуна під навантаженням;
- можливість тривалого (не менше 5 хв) обертання ротора у зворотному напрямі з кутовою швидкістю, що визначається вимиканням двигуна від мережі у випадку нормальної експлуатації або аварійної зупинки.

Для насосів невеликої потужності й насосів, що працюють із частими пусками, використовують асинхронні двигуни таких серій:

- при потужності до 100 кВт – А2 й АО2;
- при потужностях 100–400 кВт електродвигуни серій А і АК з контактними кільцями;
- при потужностях понад 400 кВт – А3 закриті й АК з короткозамкненим ротором;

– при потужностях 200–2 000 кВт двигуни єдиної серії АН з короткозамкненим ротором.

Для приводу вертикальних високопродуктивних відцентрових насосів застосовують асинхронні двигуни ВАН потужністю 315–2 500 кВт, напругою 6 кВ. Для насосів потужністю понад 250 кВт з довгостроковим режимом роботи доцільно використовувати синхронні електродвигуни. Для відцентрових насосів із горизонтальним валом використовують синхронні двигуни загальнопромислового призначення з напругою 0,4–10 кВ. Для приводу вертикальних насосів випускають спеціальні серії синхронних двигунів трифазного струму потужністю 630–2 500 кВт і напругою 6 і 10 кВ. Ці двигуни працюють з випереджуючим  $\cos\phi = 0,9$ .

Синхронні електродвигуни серії ВСДН 15–17 габаритів мають потужність 630–3 200 кВт, серії ВДС 18–20 габаритів – потужність 2 000–12 500 кВт. Електродвигуни потужністю 5 000 кВт і більше випускають на напругу 10 кВ. Для збудження синхронних електродвигунів застосовують статичні тиристорні пристрої.

За необхідності регулювання подачі й напору води застосовують двошвидкісні електродвигуни, швидкості яких відрізняються на 25–30 %. Двошвидкісні АД серії ДВДА з КЗ ротором, напругою 6 кВ мають потужності 2 500–5 000 кВт.

ККД насосів складає 70–88 %.

У таблиці 12.1 як приклад наведено технічні показники насосів типу Д.

Таблиця 12.1 – Технічні показники насосів типу Д

Насос	Д200-95	Д320-70	Д2000-100
Діаметр колеса, мм	280	242	855
Подача, м <sup>3</sup> /год	100	320	2 000
Напір, м	23	70	100
Кутова швидкість, с <sup>-1</sup>	24	49	16,3
Потужність насосу, кВт	10	80	760
ККД, %	70	78	75
Електродвигун:			
– тип	П62	АО2-32-2	А13-59-
– Р, кВт	14	100	800
– $U_{н.В}$	220/380	220/380	6 000

Електрична схема насосних станцій складається з електричних апаратів загального призначення і спеціалізованих пристроїв автоматичного контролю та захисту. У схемах керування насосних станцій застосовують магнітні пускачі й автоматичні вимикачі, контактори, електродвигуни приводу насосів, пристрої сигналізації, кнопки керування, пристрої захисту від перенапруг, іншу апаратуру.

До спеціалізованих пристроїв, що допомагають реалізувати систему автоматичного керування насосної станції належать: реле тиску й контролю

рівня рідини (поплавкове реле); манометри й датчики; реле контролю заповнення відцентрових насосів.

Захист електродвигунів від перевантаження й струмів КЗ виконують автоматичні вимикачі з комбінованими розчеплювачами. Захист електродвигуна від зникнення напруги (нульовий захист) – котушка магнітного пускача.

Розглянемо схему керування двома гідроагрегатами насосної станції (рис. 12.3). Схема забезпечує автоматичне керування насосною станцією без участі чергового персоналу. Електрична схема насосної станції містить два гідронасоси – Н1 та Н2. Один насос працює в нормальному режимі, другий насос перебуває в резерві й автоматично вмикається, якщо перший не витримує навантаження або виходить з ладу. Який з насосів має працювати в робочому режимі, а який бути у резерві, визначає перемикач режиму ПР. У положенні перемикача I у робочому режимі працює насос Н1; у положенні II – насос II.

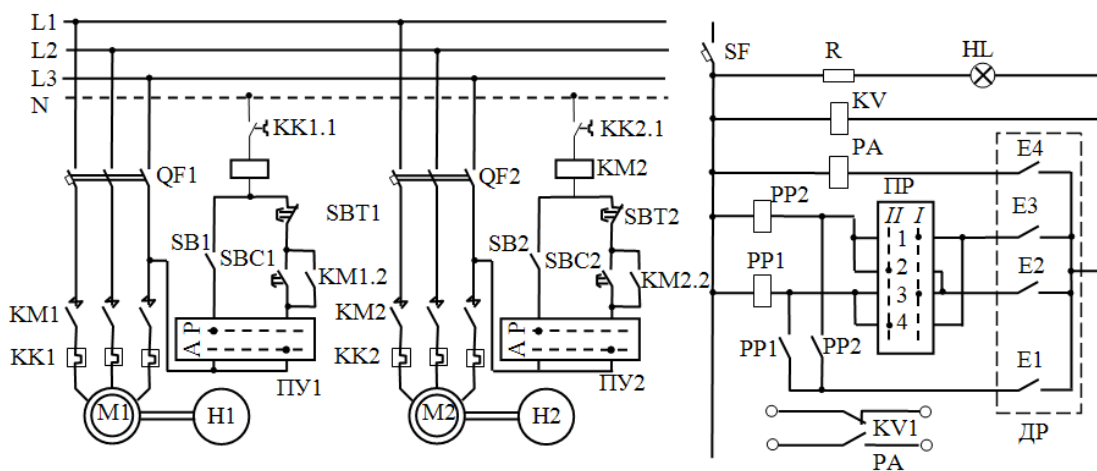


Рисунок 12.3 – Схема керування електродвигунами насосної

Схема забезпечує автоматичне керування електродвигунами гідроагрегатів, обладнаних постійно відкритими вихідними заглушками. Щоб визначити рівень води в ємності, у схемі використовують чотири позиційний електронний датчик рівня ДР. Через його контакти E1, E2, E3, E4 подаються команди керування на вмикання й вимикання двигунів системи водопостачання.

Розглянемо роботу схеми в автоматичному режимі коли робочим є насос Н1 із двигуном М1. Перемикач ПР в положенні I. Контакти 1, 3 перемикача відсічення замкнуті, але реле PP1, PP2 не спрацьовують, тому що їхній ланцюг розімкнений контактами E2, E3 датчика ДУ. Якщо рівень рідини підвищується до рівня датчика E2, ланцюг котушки реле PP1 замикається. Реле спрацьовує. Замикається його контакт PP1, яким подається напруга до котушки магнітного пускача. Магнітний пускач своїми контактами KM1.1 подає живлення до електродвигуна насоса М1. Запускається насос Н1 і розпочинає відкачування води.

У нормальному режимі рівень води в ємності знижується, ланцюг контакту E2 розривається, однак двигун продовжує працювати. Він відключиться тільки тоді, коли рівень води впаде нижче контакту E1. Це зроблено для того, щоб уникнути частих циклів умикання-вимикання двигуна в разі невеликого коливання рівня рідини біля рівня контакту E2.

Якщо продуктивність насоса Н1 недостатня або він вийде з ладу, рівень рідини буде підніматися й замкне контакти датчика E3, який подасть живлення в ланцюг котушки реле РР2. Отже буде подано напругу на магнітний пускач ПМ2, контакти якого забезпечать запуск електродвигуна М2 другого насоса Н2. Другий насос відключиться в разі зниження рівня води нижче контакту E1.

Якщо рівень води з якої-небудь причини досягне максимально припустимого рівня, замкнеться контакт E4. Це спричинить спрацьовування аварійного реле РА, що сповістить персонал про ненормальний режим.

Напругу в схемі контролюють за допомогою реле КV. Кола сигналізації живляться від шин гарантованого живлення. Лампа НL сигналізує про наявність напруги в ланцюгах керування насосами. За необхідності можна перевести насоси в режим ручного керування й керувати процесами вмикання й вимикання вручну.

**12.1.3 Електроспоживачі системи «Водопостачання Харківського регіону»<sup>3</sup>.** Для водопостачання м. Харків та інших населених пунктів Харківської області використовують три незалежні джерела водопостачання, два з яких розміщені на значній відстані від м. Харкова (рис. 12.4):

- річка Сіверський Донець із Печенізьким водоймищем (383 млн м<sup>3</sup>) на відстані 40 км від м. Харкова;
- канал Дніпро – Донбас із Краснопавлівським водосховищем (близько 410 млн м<sup>3</sup>) на відстані 140 км від м. Харкова;
- підземні води з артезіанськими шпаринами 80–800 м завглибшки, що розташовані у м. Харкові й Харківській області.

За рахунок цих трьох джерел підприємство успішно виконує завдання цілодобового й безперебійного водопостачання населених пунктів. Технологічна схема подачі води організована таким чином, що водопостачання споживачів, які мешкають в області, здійснюється безпосередньо від магістральних водоводів, що йдуть на м. Харків. Інші споживачі одержують послугу через систему подачі й розподілу води в місті Харкові.

Комунальне підприємство «Харківводоканал» становить єдиний технологічний виробничо-господарський комплекс водопровідних споруд з виробництва, транспортування, розподілу й реалізації води споживачам системи групового водопостачання міста Харків і Харківської області.

Цей комплекс складається з технологічних об'єктів, споруд і розподільних водогінних мереж, пов'язаних єдиним технологічним процесом забору, водопідготовки, контролю якості, транспортування та подачі питної води.

---

<sup>3</sup> За матеріалами сайту КП «Харківводоканал» [68].

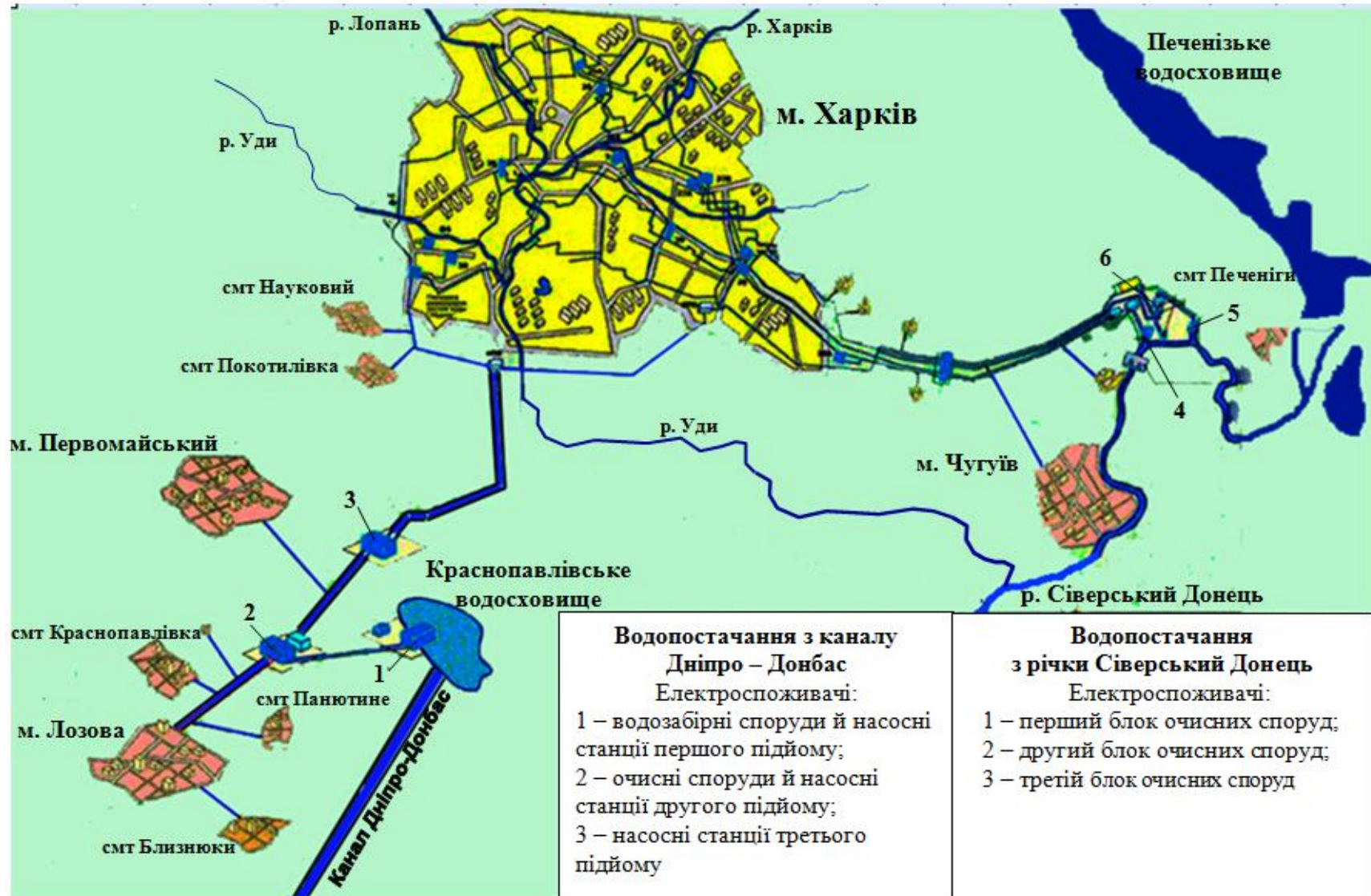


Рисунок 12.4 – Елементи системи «Водопостачання Харківського регіону»

Загальна середньодобова подача питної води становить понад 560 тис. м<sup>3</sup>, з них для м. Харків – 530 тис. м<sup>3</sup> (понад 94 %).

Головним джерелом водопостачання є Печенізьке водоймище, вода якого очищується на комплексі водопідготовки «Донець» і подається у місто по п'ятьох магістральних водоводах діаметром 0,9–1,6 м і загальною довжиною 161 км. Його частка в загальній подачі питної води становить 441 тис. м<sup>3</sup> на добу, або  $\approx 75$  %.

Другим незалежним джерелом водопостачання міста Харків і основним для міст Лозова, Першотравневе та інших населених пунктів є Краснопавлівське водосховище, яке отримує воду з каналу «Дніпро – Донбас». Вода очищується на комплексі водопідготовки «Дніпро» і подається в місто Харків по двох нитках магістральних водоводів діаметром 1,2–1,4 м та загальною довжиною 261 км; у місто Лозова – по двох водоводах діаметром 0,7–1,0 м і загальною довжиною 65 км. Його частка в загальній подачі питної води становить 134 тис. м<sup>3</sup> на добу, або 23 %.

Третім незалежним джерелом водопостачання міста Харків є артезіанські свердловини. На сьогодні їхній внесок у систему міського водопостачання становить тільки 9,7 тис. м<sup>3</sup>, або 1,7 %.

Устаткування артезіанського водопроводу й насосних станцій здійснює підйом артезіанської води з підземних джерел (глибина від 80 до 800 м) і є складовою частиною системи подачі й розподілу води в м. Харків.

Підприємство має одну розвинуту систему водопостачання: загальна довжина водоводів і водогінних мереж становить 2 670 км, зокрема 803 км магістральних водоводів. Тільки у м. Харків експлуатується 315 км водоводів і 1 867 км водогінних мереж.

Комплекс водопідготовки «Дніпро» має три майданчики споруд очищення й транспортування води.

Споруди *майданчика 1-го підйому*: устаткування водозабору острівного типу, сполучене з насосною станцією завглибшки 29 м, призначеною для забору води з Краснопавлівського водосховища і подачі її для очищення на майданчик 2-го підйому.

Споруди *майданчика 2-го підйому*: блок очисних споруд, насосна станція, хлоропереливна станція, дослідно-промислова установка амонізації води, а також допоміжні служби – автотранспортний цех, ділянка ремонту і технічного обслуговування будинків і споруд, цех ремонту й технічного обслуговування енергетичного та механічного устаткування.

Споруди *майданчика 3-го підйому* на сьогодні з метою економії електроенергії виведені в «гарячий резерв».

**Електропривод насосних станцій.** У насосних станціях застосовують відцентрові й поршневі насоси.

Найпоширеніші – відцентрові насоси. Механізм роботи такої системи такий: двигун обертає колесо й скеровує рідину в центр, де розташований трубопровід, а відцентрова сила «викидає» рідину через засувку з корпусу.

За допомогою створеного ефекту розрядження рідина рухається безперервно й рівномірно.

Поршневі насоси використовують для роботи з рідинами, які необхідно підняти на велику висоту. Ці насоси характеризуються нерівномірністю роботи й пульсуючим навантаженням на валу. Рідина під час роботи поршневого насоса тече нерівномірно. Щоб зменшити пульсації і отримати більш рівномірний хід, використовують маховик на валу й декілька циліндрів.

Електродвигун з'єднують з тихохідним поршневим насосом за допомогою зубчастої або клінкерної передачі. Насоси відцентрового типу вирізняються швидкохідністю, їх безпосередньо з'єднують із валом двигуна, який має високу кутову швидкість. Від кутової швидкості залежать тиск, продуктивність, потужність, момент на валу.

Головною особливістю насосних станцій є тривалий режим роботи з постійним навантаженням. Якщо насосні агрегати не потребують регулювання швидкості і вимагають для роботи потужності до 100 кВт, то для їхнього приводу застосовують АД з короткозамкненим ротором на номінальних напругах 220/380 і 500 В. При потужностях більше ніж 100–200 кВт застосовують асинхронні й синхронні електродвигуни на напругах 6 і 10 кВ.

Поширеність АД пояснюється простотою його експлуатації й невеликою вартістю. Але пусковий струм АД із короткозамкненим ротором може бути в 3–7 разів вище номінального струму, тому короткозамкнені АД з прямим пуском застосовують лише порівняно невеликої потужності (до 100–200 кВт залежно від потужності підстанції).

Щоб зменшити пускові струми короткозамкнених АД, застосовують спеціальні схеми: перемикання обмоток статора із «зірки» під час запуску на «трикутник» при досягненні нормальної частоти обертання; ступінчастий запуск з додатковими опорами в ланцюзі статора; запуск із використанням пускових автотрансформаторів. Такі рішення потребують додаткових пристроїв, що ускладнює автоматизацію і знижує переваги асинхронних двигунів.

У тих випадках, коли в одному або декількох агрегатах насосної станції потрібно регулювати подачу й напір шляхом зміни частоти обертання, застосовують регульовані електроприводи. Використання багатошвидкісних електродвигунів дозволяє здійснювати ступеневе регулювання частоти обертання шляхом зміни числа включених пар полюсів. Випускаються дво- і чотиришвидкісні АД потужністю до 100 кВт і високовольтні двошвидкісні двигуни більшої потужності. Для приводу вертикальних насосів використовують двигуни серії ДВДА напругою 6 кВ, потужністю 500–1 400 кВт із синхронними частотами обертання 500/300, 500/375 або 375/300 об/хв. Щоб змінити частоту обертання, необхідно відімкнути одну обмотку статора і ввімкнути іншу.

Плавне регулювання частоти обертання забезпечується електромагнітними муфтами ковзання, які вмикають між двигуном і насосом. Частоту обертання змінюють шляхом змінювання ковзання приводу.



Для насосів високої потужності використовують синхронні електродвигуни. Вони здатні забезпечити тривалу безперебійну роботу системи. Частота обертання цих електродвигунів перебуває в прямій залежності від частоти мережі змінного струму. Синхронні електродвигуни мають високий коефіцієнт потужності і стійко працюють при коливаннях напруги в мережі.

На насоси, які мають горизонтальні вали, встановлюють двигуни синхронного типу серій СДЗ, СДНЗ-2, СДН-2, ЦД2. Вони характеризуються такими параметрами: потужність – від 132 до 4 000 кВт; частота обертання – від 100 до 1 500 об/хв.; номінальна напруга – від 380 до 6 000 В. У приводах вертикальних насосів застосовують синхронні двигуни потужністю від 630 до 12,5 тис. кВт і номінальною напругою 10 кВ.

**12.1.4 Система «Водовідведення»** – це комплекс інженерних споруд, призначених для відведення стічних вод від споживачів і наступної доставки до очисних систем.

Стічні води поділяють на такі категорії:

- побутова – від житлових, адміністративних і виробничих будинків;
- промислова – від різних технологічних процесів промислових підприємств;
- атмосферна – дощі, тала снігова вода.

Основні завданнями системи водовідведення:

- приймання всіх видів стічних вод у місцях її утворення;
- транспортування стічних вод до очисних споруд;
- очищення й знезаражування стічних вод;
- утилізація корисних речовин, що містяться в стічних водах;
- спускання очищеної стічної води до водоймищ.

Система «Водовідведення» відіграє не меншу роль у забезпеченні необхідних умов життєдіяльності міст, ніж система «Водопостачання». Найбільшу питому вагу серед електроспоживачів системи водовідведення мають наносні каналізаційні станції для перекачування стічних вод і електроустаткування очисних споруд, де проводиться очищення, знезаражування стічних вод, оброблення осадів і їхня утилізація.

Для організації системи водовідведення використовують насоси брудної води, дренажні й каналізаційні насоси.

У сучасних містах і населених пунктах застосовують різні системи й схеми каналізації стічної води. Як приклад, розглянемо основні показники комплексу «Харківводовідведення» [68], який виконує такі функції:

- експлуатація зовнішніх мереж водовідведення й каналізаційних насосних станцій м. Харків;
- технічне й аварійно-диспетчерське обслуговування внутрішньо-будинкових мереж каналізації;
- аварійно-диспетчерське обслуговування внутрішньо-будинкових водостоків;

– очищення й перекачування стічної рідини.

До складу комплексу входять очисні споруди № 1 і № 2. Виконання завдань щодо перекачування й очищення стічних вод забезпечують каналізаційні насосні станції, цехи механічного й біологічного очищення, цехи знезаражування стічних вод, допоміжні підрозділи. Загальна виробнича потужність комплексу з переробки стоків становить 900 тис. м<sup>3</sup> на добу.

Міські очисні споруди № 2 забезпечують приймання й очищення стічних вод у цілодобовому режимі від усіх категорій споживачів м. Харків.

Основними електроприймачами систем прийому і очищення стічних вод є АД, що використовуються для привода насосів та механізмів, на етапі механічного очищення АД в решітках-дробарках (рис. 12.5), дробарках відходів (рис. 12.6), конвеєрах, пресах-уцільнювачах тощо.

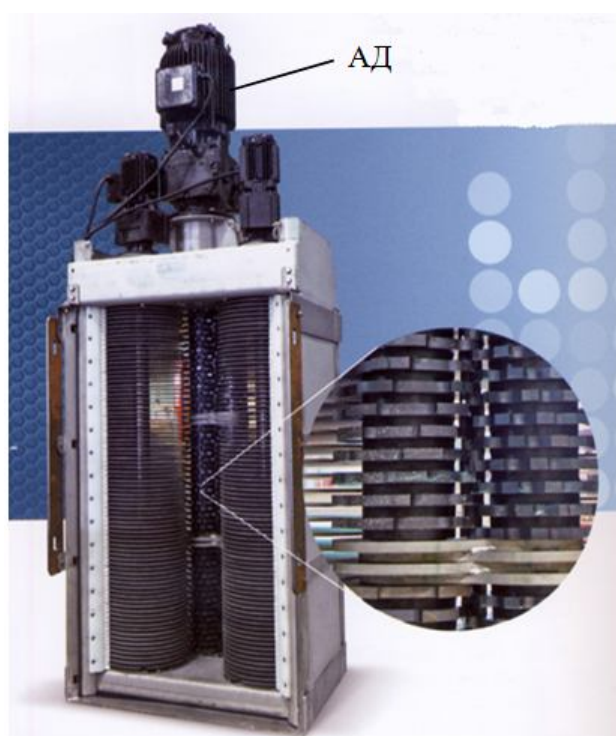


Рисунок 12.5 – Решітка-дробарка

Рисунок 12.6 – Дробарка відходів

**Дренажні насоси** застосовують для відкачування скупчень води з незначною кількістю забруднень із колодязів, траншей, підвалів, льохів, басейнів та інших резервуарів. Використання дренажних насосів особливо актуально в період весняних паводків, коли рівень ґрунтової води різко підвищується, а також у період рясних опадів. Для збирання води підземні приміщення влаштовуються з невеликим ухилом до лінії горизонту, в кінці якого споруджуються дренажні колодязі (зумпфи) для збору води.

Для відкачування води зазвичай застосовують два насоси: робочий і резервний. Схема керування насосами (рис. 12.7) передбачає ручне (місцеве) та автоматичне керування (перемикач SA2).

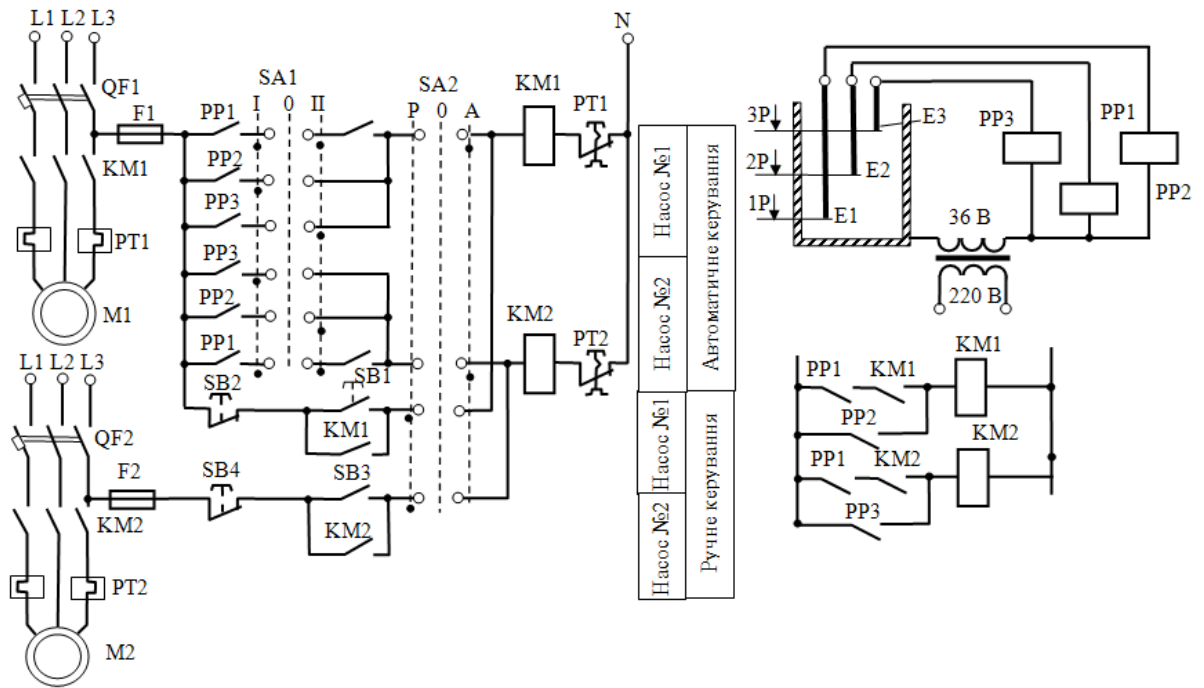


Рисунок 12.7 – Схема керування дренажними насосами

Автоматичне керування забезпечують три реле рівня PP1 – PP3: PP1 – реле нижнього рівня; PP2 – реле верхнього рівня; PP3 – реле верхнього аварійного рівня.

Для рівномірної експлуатації насосів передбачена можливість змінювати черговість увімкнення робочого й аварійного насосів при автоматичному керуванні (перемикач SA1).

Розглянемо роботу схеми керування в автоматичному режимі: перемикач SA2 в положенні А (автоматичне), перемикач SA1 в положенні I (перший насос робочий, другий резервний).

Коли вода заповнює зумпф і досягає рівня 1P, замикається ланцюг живлення обмотки PP1, реле спрацьовує, але магнітний пускач KM1 не вмикається, оскільки послідовно з контактом реле PP1 увімкнений нормально розімкнутий контакт пускача KM1. При досягненні рівня 2P вмикається реле рівня PP2 і своїми нормально розімкненими контактами вмикає магнітний пускач KM1, який своїми силовими контактами замикає кола живлення обмотки статора двигуна M1 першого насоса. Починається відкачування води. Незабаром реле PP2 знеструмлюється, але насос не відмикається, тому що обмотка пускача отримує живлення через контакти PP1 і власний блок-контакт. Коли вода опускається нижче першого рівня, реле PP1 знеструмлюється і розриває ланцюг живлення пускача KM1. Насос відмикається.

У разі наповнення води у зумпфі до другого рівня все повторюється.

Якщо до ґрунтової води додалася дощова, то заповнення зумпфа відбувається сильніше й при увімкненні першого насоса рівень води в зумпфі продовжує підвищуватися. У разі досягнення позначки третього рівня реле

PP3 вмикає другий насос. Обидва насоси зупиняються, коли вода в зумпфі опускається нижче першого рівня.

Схема передбачає ручне керування насосами (профілактичні та ремонтні роботи), перемикач SA2 в положенні Р (ручне). Умикання двигунів виконується кнопками SB1 (першого двигуна) і SB3 (другого двигуна). Вимикання двигунів виконується кнопками SB2 і SB4.

Захист електродвигунів від перевантажень здійснюють теплові реле PT1 і PT2, встановлені в пускачах KM1 і KM2 відповідно. Для захисту електродвигунів від режимів короткого замикання в автоматичних вимикачах QF1 і QF2 встановлені електромагнітні реле.

## 12.2 Система «Теплопостачання міста»

Система теплопостачання міста призначена для задоволення й підтримання потреб населення міста в опаленні громадських і житлових приміщень, а також для забезпечення гарячого водопостачання й вентиляції приміщень.

**12.2.1 Загальні відомості.** Сучасні системи теплопостачання поділяються на дві категорії – централізованого й децентралізованого теплопостачання.

До складу системи централізованого теплопостачання входять: джерела тепла, теплові мережі з насосними станціями і тепловими пунктами, місцеві системи споживання тепла. До складу місцевих систем споживання тепла входять: системи опалення, системи вентиляції і системи гарячого водопостачання.

Як джерела централізованого теплопостачання використовують теплоелектроцентралі (далі – ТЕЦ) і районні котельні. На ТЕЦ здійснюється комбінована генерація тепла та ЕЕ. Тут тепло робочого тіла (водяної пари) використовується для виробництва ЕЕ при розширенні пара в турбіні, а потім пар використовується для нагрівання води в теплообмінниках, які входять до складу теплофікаційного обладнання ТЕЦ. Гаряча вода використовується для теплопостачання.

Централізоване теплопостачання застосовують у великих містах при значних теплових навантаженнях (400 Гкал/г і більше).

Сучасні районні котельні мають теплову потужність 150–200 Гкал/г.

Як теплоносій для теплопостачання міст використовують гарячу воду, яка теплопроводами подається до споживачів. Циркуляцію теплоносія забезпечують насосні станції.

*Міська тепла мережа* – це складний комплекс інженерних споруд, до якого входять теплопроводи, компенсатори, спеціальне устаткування

контролю й керування, насосні станції, районні теплові пункти й теплові пункти.

За призначенням теплові мережі поділяють на магістральні, розподільчі і внутрішньоквартальні.

*Магістральні теплові мережі* становлять ділянки, на які припадає основне теплове навантаження і які з'єднують джерела тепла з великими тепловими споживачами.

*Розподільчі, або між кварталні, мережі* транспортують тепло від теплових магістральних мереж до об'єктів теплоспоживання. Зазвичай вони відрізняються від магістральних мереж меншим діаметром і довжиною.

*Внутрішньоквартальні мережі* відгалужуються від розподільчих мереж і закінчуються в теплових пунктах споживачів тепла. На них припадає теплове навантаження тільки приєднаних до них споживачів тепла.

Оскільки тривалість опалювального сезону залежить від кліматичних умов міста (у теплий період року приміщення, зазвичай, не опалюються), споживання тепла, на відміну від споживання гарячої води, є сезонним.

Для задоволення потреб міста теплом і гарячою водою здебільшого використовують котельні й теплові електростанції. Значну частину обладнання систем становлять інженерні споруди з очищення води для джерел теплопостачання.

Будь-яка система теплопостачання складається з теплових передавальних мереж або пристроїв, устаткування, що споживає тепло, а також джерела цього тепла. Устаткуванням, що споживає тепло, можна вважати системи вентиляції, опалення й гарячого водопостачання.

**12.2.2 Класифікація систем теплопостачання.** За способом вироблення енергії розрізняють такі системи. *Роздільне вироблення тепла* – нагрівання води в теплових станціях або котельних установках відокремлене від вироблення електроенергії. *Комбіноване вироблення тепла* й енергії на теплоелектроцентралях.

За способом забезпечення населення тепловою енергією розрізняють: *одноступінчасті системи* – приєднання споживачів відбувається безпосередньо до теплових мереж; *багатоступінчасті системи* – між споживачами і джерелом тепла розміщують контрольно-розподільні й центрально-теплові пункти, у яких можуть змінюватися параметри теплоносія відповідно до визначених вимог.

Застосовують такі дві схеми теплопостачання.

*Перша схема* – використовуються ті самі трубопроводи для опалення й гарячого водопостачання, а отже, по прямих трубопроводах йде набагато більше води, ніж по зворотних.

*Друга схема* – гаряча вода для опалення надходить по окремих трубопроводах, тоді як гаряче водопостачання забезпечується підігріванням во-

ди в спеціальних котлах – бойлерах безпосередньо в житлових будинках. Джерелом тепла може слугувати як гаряча вода з опалювальної системи, так і паливо (природний газ). У деяких містах бойлерні котли встановлені в кожній квартирі багатоповерхового будинку.

**Централізовані системи теплопостачання** (рис. 12.8) складаються з трьох основних елементів: джерело тепла, теплові мережі, системи використання тепла в споживачів. Джерелом теплопостачання в містах є ТЕЦ і котельні. Системи трубопроводів і спеціального обладнання, призначені для забезпечення руху теплоносія від джерела до споживача і повернення охолодженого теплоносія до джерела теплопостачання, називають **тепловими мережами**. Найпоширенішими є двотрубні мережі, у яких по подавальних трубопроводах від джерела до споживача рухається нагрітий теплоносій, а по зворотних трубопроводах охолоджений у споживача теплоносій повертається до джерела для нагрівання.

Для приймання теплоносія у мікрорайонах споруджують **центральні теплові пункти**, призначенням яких є також розподіл теплоносія по інженерних системах споживачів, підтримання потрібних параметрів (тиск, температура) у абонентів, облік споживання тепла. У централізованих системах теплопостачання тепло використовують для опалення приміщень, приготування гарячої води для санітарно-гігієнічних потреб (гарячого водопостачання) і вентиляції (підігрівання зовнішнього повітря у зимовий період перед його подачею до приміщень).

Значну частку в споживанні ЕЕ систем теплопостачання становить електричний привод насосів, які за технологічною ознакою поділяють так:

- господарські насоси, призначені для забезпечення розрахункового тиску холодної і гарячої води, що подається до споживачів незалежно від зміни тиску в міському водопроводі в різні години доби;
- циркуляційні насоси, забезпечують постійну циркуляцію гарячої води в системі теплопостачання;
- опалювальні циркуляційні насоси, призначені для забезпечення потрібної подачі теплоносія в системі опалення;
- опалювальні підживлювальні насоси, забезпечують постійне заповнення системи опалення за рахунок води в розширювальному баку;
- змішувальні насоси, забезпечують температуру теплоносія, що подається в систему опалення відповідно до температурного графіка або пристроїв автоматичного керування шляхом підмішування до подавального трубопроводу частини відпрацьованої води.

Кількість і потужність насосів визначається тривалістю їхньої роботи протягом доби та параметрами системи. Зазвичай устаткування має два або три насоси. Для приводу застосовують АД потужністю від декількох до тисяч кіловат з напругою живлення 380, 600, 6, 10 кВ.

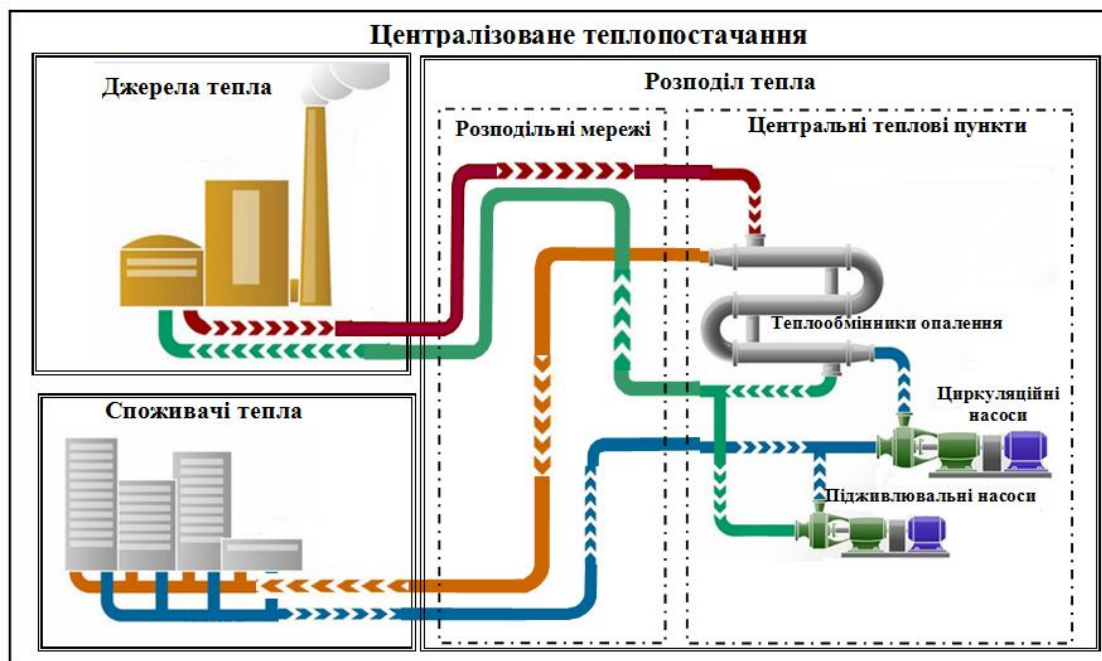


Рисунок 12.8 – Система «Централізоване тепlopостачання міста»

Прикладом системи «Централізоване тепlopостачання міста» є КП «Харківські теплові мережі» [69]. Підприємство забезпечує теплом понад 6 300 житлових будинків міста Харків та майже 870 тис. мешканців міста – гарячим водопостачанням. Встановлена теплова потужність джерел підприємства становить 4 637,2 Гкал/год. Теплову енергію виробляють 253 котельні і ТЕЦ із загальною кількістю котлів – 630. Найбільш потужними є ТЭЦ-3 з теплопродуктивністю 1 353 Гкал/год, районні котельні: Салтівського житлового масиву (780 Гкал/год), Шевченківського району (300 Гкал/год) і Слобідського району (400 Гкал/год), а також ТЭЦ-4 (825 Гкал/год), що працює в режимі котельні. Споживачі, розташовані поза зоною централізованого тепlopостачання, обслуговуються локальними, квартальними й убудованими підвальними котельнями. В експлуатації підприємства знаходиться 1 633,5 км трубопроводів із максимальним діаметром 1 220 мм. У системі централізованого тепlopостачання задіяні 11 перекачувальних насосних станцій із сумарною потужністю понад 25 МВт. До магістральних камер підключено 209 центральних і 88 індивідуальних теплових пунктів.

Понад 354 тис. харків'ян, що мешкають у сімох районах Харкова й області, користуються тепловою енергією, що виробляє ПАТ «Харківська ТЕЦ-5». Сумарна площа опалювальних приміщень перевищує 9,7 млн м<sup>2</sup>.

**12.2.3 Бойлерні.** Бойлерні призначені для забезпечення гарячого й холодного водопостачання кварталів житлової забудови та громадських будівель, а також для циркуляції і підживлення теплоносія систем опалення будинків підвищеної поверховості. Вони розміщуються зазвичай в квартальних енергетичних блоках, електроживлення яких забезпечують два неза-

лежні кабельні введення, як для споживача другої категорії. Також передбачається автоматичне вмикання резерву в разі зникнення будь-якої із фаз робочого живлення. Зазвичай пристрої введення, АВР, обліку та захисту, керування й автоматики розміщують в одному суміщеному ввідно-розподільчому щиті.

У бойлерній передбачається тепловий контроль для навантажень, що належать до I групи обліку, а саме:

– вимірювання й реєстрування температури води в подавальному й зворотному трубопроводах тепломережі, а також у трубопроводах гарячого та холодного водопостачання;

– вимірювання й реєстрування витрати води в зворотному трубопроводі теплової мережі.

Прилади теплового контролю монтують на щиті теплового контролю. На стіні бойлерної монтується блок розеток для підключення апаратів електромагнітної обробки води. Живлення до розеток підводиться від селенових випрямлячів типу ВСА-5А. Від одного селенового випрямляча типу ВСА-10А підводиться живлення до апаратів катодного захисту й іонізації води.

У схемах автоматики бойлерної, призначеної для обслуговування 400–650 квартир будинків із поверховістю до 11 поверхів включно, передбачена робота двох циркуляційних насосів гарячого водопостачання і двох підвищувальних насосів .

Розглянемо роботу насосів бойлерної [36].

**Насоси гарячого водопостачання** (рис. 12.9) забезпечують циркуляцію гарячої води, яка подається в житлові будинки для підтримання постійної температури. Схема керування насосами, що отримує резервне живлення через контакти реле *2РПН*, передбачає місцевий і автоматичний режими.

У положенні ключа *3УП* «+45°» (Місцеве) пуск і зупинка насосів виконуються кнопками управління на лицьовій панелі щита (*5КП*, *6КП*, *5КС*, *6КС*).

Автоматичний режим встановлюють поворотом ключа *3УП* в положення «-45» (Автоматичне). Основним елементом автоматики циркуляційних насосів, що дає команди на їх вмикання й вимикання в разі відхилення від заданих меж температури, є манометричний електроконтактний термометр *ІКТ* типу ТТП-СК зі шкалою 1–100 С.

У разі зниження температури в зворотному трубопроводі замикається контакт *ІКТ-1* термометра *ІКТ*, подає напругу живлення на котушку реле контролю низької температури *10РП*, яке своїми нормально відкритими контактами готує до спрацьовування реле ввімкнення насосів при низькій температурі і високому тиску *8РП*.



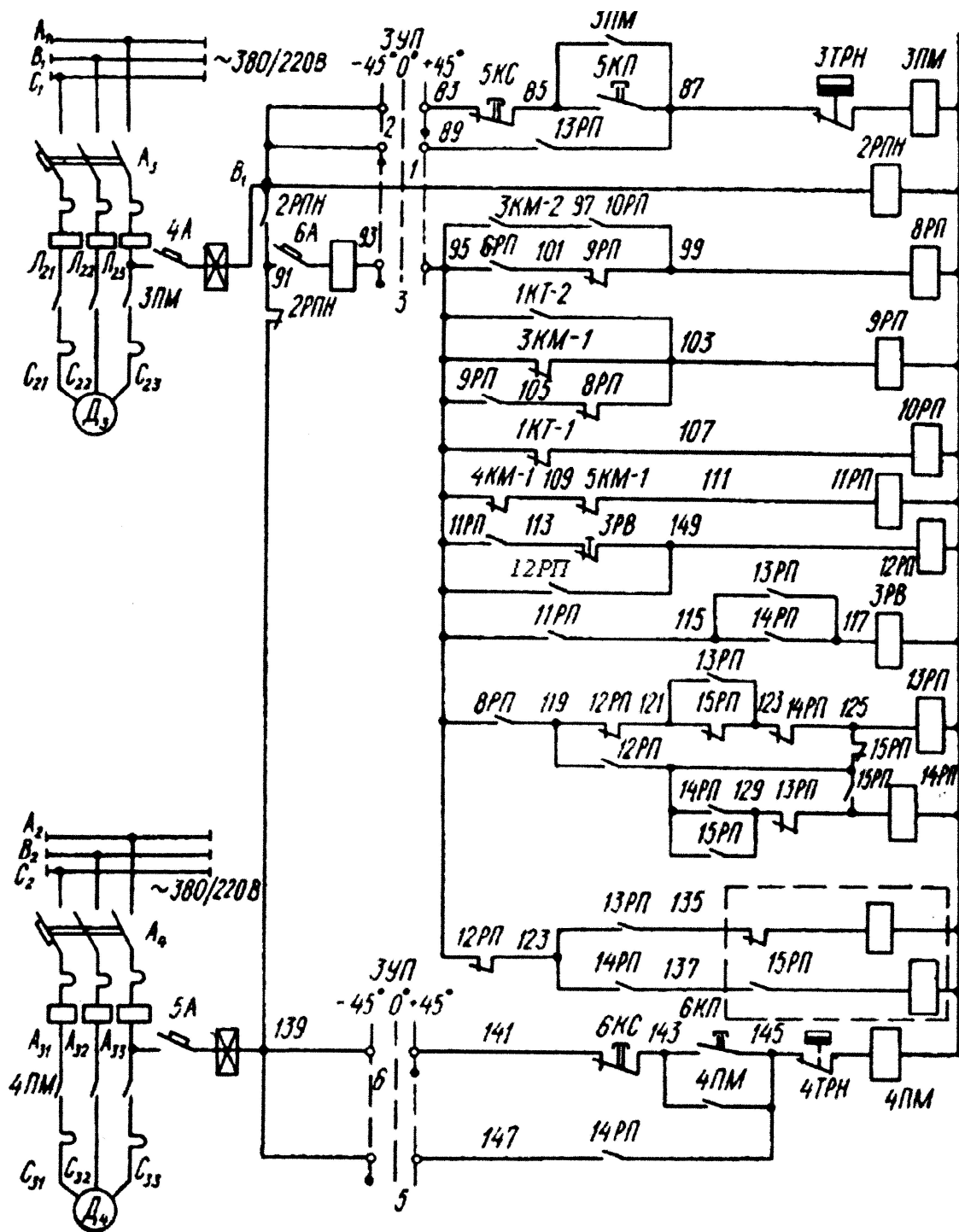


Рисунок 12.9 – Схема керування насосами гарячого водопостачання бойлерної

Реле 8РП, умикається в разі замикання контакту 3КМ-2 електроконтактного манометра 3КМ при нормальному тиску в мережі гарячого водопостачання, самоблокується і своїми нормально відкритими контактами вмикає реле 13РП. Це реле нормально відкритим контактом вмикає магнітний пускач робочого насоса, а також перемикає двопозиційне реле автоматичного вибору послідовності роботи насосів 15РП типу РП-351.

При досягненні верхньої межі температури замикається контакт 1КТ-2 електроконтактного термометра 1КТ, включається реле вимикання насосів

при високій температурі або низькому тиску *9РП*, яке своїм нормально закритим контактом розмикає ланцюг самоблокування реле *8РП*. При цьому знімається напруга з котушки реле *13РП* і вимикається робочий насос.

Робочий насос аналогічно вимикається і в разі замикання контакту *3КМ-1* електроконтактного манометра *3КМ* при низькому тиску води в мережі гарячого водопостачання. У разі подальшого зниження температури реле *8РП* завдяки перекиданню двопозиційного реле *15РП*, умикає не реле *13РП*, а реле *14РП*, тобто підготовлює ланцюг вмикання другого насоса.

Якщо під час увімкнення робочого насоса не створюється тиск за насосами, контакти *4КМ-1* або *5КМ-1* електроконтактних манометрів *4КМ* і *5КМ* замикаються, і спрацьовує реле *11РП*, яке готує увімкнення реле аварійного перемикачання *12РП* і *3РВ*. Контакт пневматичного реле часу типу РВП-2121 з витримкою часу до 3 хв подає напругу на котушку реле *12РП*. Контакти цього реле замикають ланцюг самоблокування, вимикають робочий насос, включають реле *14РП*, яке подає живлення на котушку магнітного пускача резервного насоса та на сигнальне табло «аварія насосів гарячого водопостачання» (на схемі рис. 12.9 не показано).

Аварійний режим знімають поворотом ключа *3УП* в нейтральне положення або шляхом вимикання і вмикання автоматичного вимикача живлення ланцюгів автоматики після усунення несправності робочого насоса.

**Підвищуючі насоси** призначені для підвищення тиску води, яка подається в житлові будинки, в разі незадовільного тиску в міській водопровідній мережі. Автоматичне вмикання резервного живлення схем керування виконується за допомогою реле *1РПН* (рис. 12.10).

У місцевому режимі (ключ управління *1УП* в положенні «+45°») шляхом натискання на кнопку *1КП* («Пуск») включають магнітний пускач *1ПМ* двигуна *Д1* першого насоса, обмотка якого разом реле *1РП* самоблокується нормально відкритими блок-контактами. Через нормально відкриті контакти реле *1РП* загоряється сигнальна лампа «Насос увімкнено» (на рис. 12.10 не показано). Натисканням кнопки *1КС* («Стоп») ланцюг живлення котушок магнітного пускача й реле *1РП* розривається, електродвигун зупиняється, і сигнальна лампа гасне. Ланцюги вмикання й вимикання другого насоса аналогічні.

Автоматичний режим роботи обирають поворотом ключа *1УП* у положення «-45°», а робочий насос в цьому режимі – поворотом ключа *2УП* в положення «-45°» (перший насос) або «+45°» (другий насос). При низькому тиску в мережі холодного водопостачання замикається контакт *1КМ-1* електроконтактного манометра *1КМ* і вмикається реле контролю низького тиску за насосом *2РП*. Реле *2РП* своїми контактами вмикає реле часу *1РВ*, магнітний пускач робочого насоса, а також реле *1РП*, яке своїм контактом замикає ланцюг сигнальної лампи «Насос увімкнено» (на схемі рис. 12.10 не показано).

При вмиканні робочого насоса створюється необхідний тиск, контакт *1КМ* розмикається і реле *2РП* і *1РВ* відмикається.

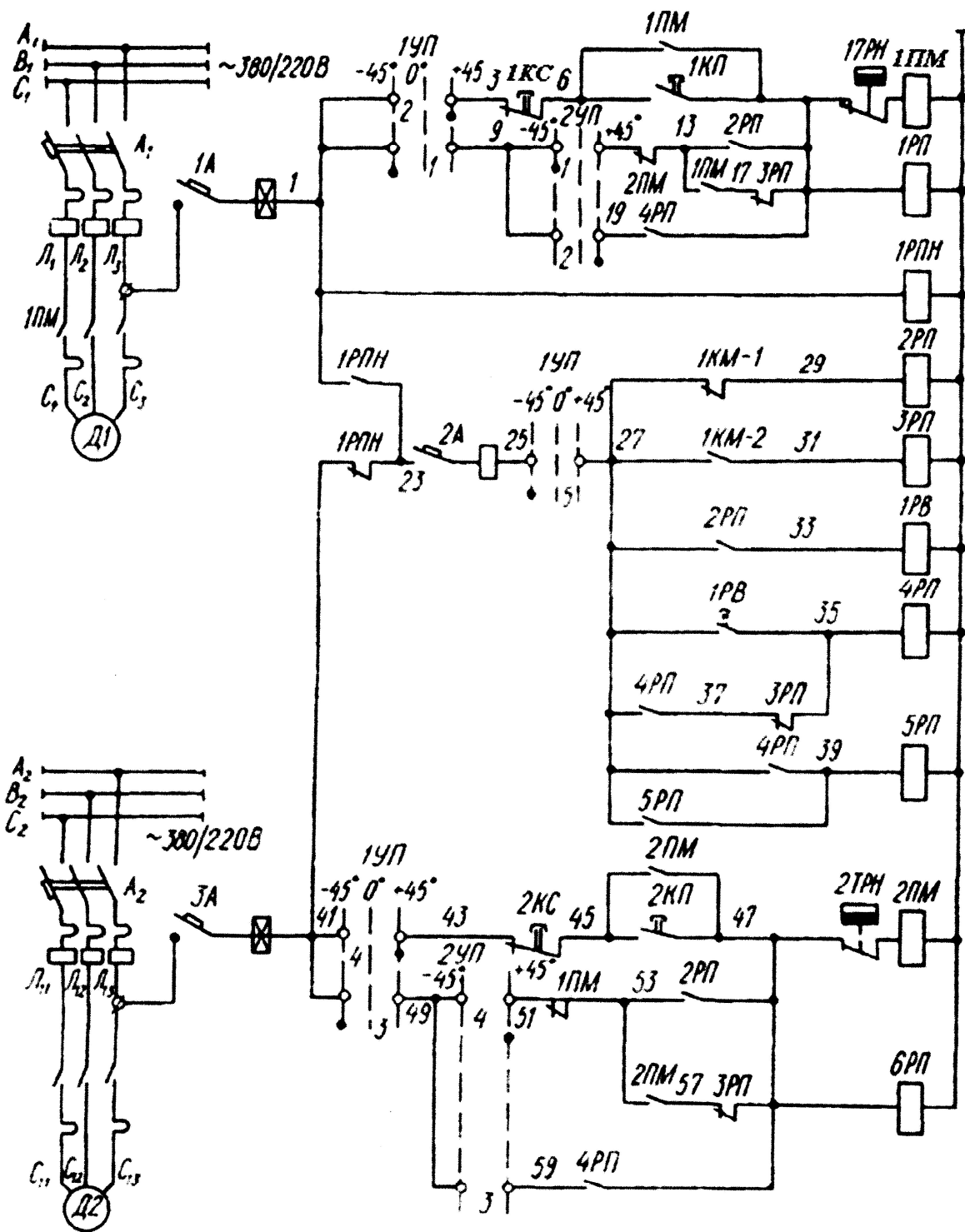


Рисунок 12.10 – Схема керування підвищуючими насосами бойлерної

У разі аварій, якщо робочий насос не створює тиск, контакт *1КМ-1* електрoконтактного манометра не розмикається, реле часу не відключається, через його контакт, з витримкою часу включається реле аварійного перемикання *4РП*. Це реле своїми контактами самоблокується, вмикає реле аварійної сигналізації *5РП*, магнітний пускач резервного насоса й реле *6РП*.

Нормально відкритий контакт реле *6РП* замикає ланцюг сигнальної лампи «Насос № 2 ввімкнено» (на схемі рис. 12.10 не показано). Нормально

замкнуті блок-контакти магнітного пускача резервного насоса відключають робочий насос. Реле *5РП* самоблокується і вмикає сигнальне табло «Аварія насосів» (на схемі рис. 12.10 не показано). Знімається аварійний сигнал так само, як у схемі циркуляційних насосів.

При високому тиску води замикається контакт *ІКМ-2* електроконтактного манометра *ІКМ*, включається реле контролю високого тиску *3РП*, що відмикає магнітний пускач робочого насоса й реле сигналізації його роботи *1РП*.

**12.2.4 Теплові пункти гарячої води.** Розрізняють теплові пункти центральні та індивідуальні. Центральні теплові пункти постачають тепло до декількох будинків, індивідуальні теплові пункти – до одного будинку.

Теплові пункти забезпечують подачу необхідної кількості тепла в будинки для опалення й вентиляції з автоматичним підтриманням у системах опалення потрібного гідравлічного й теплового режимів. У теплообмінниках теплових пунктів підігрівають воду до температури  $65^{\circ}\text{C}$ , а потім подають її в житлові й будинки громадського призначення для гарячого водопостачання. Температура гарячої води регулюється автоматично.

У системі теплопостачання міста теплові пункти виконують такі функції:

- облік витрати тепла споживачами;
- розподіл тепла по місцевих системах споживачів;
- приготування гарячої води з параметрами, необхідними для санітарно-побутових і технічних потреб;
- підтримання й регулювання параметрів теплоносія тиску й температури;
- збір, а іноді й очищення конденсату й перекачування його в джерело тепла;
- регулювання, автоматизація, захист, контроль і диспетчеризація роботи місцевих систем споживачів тепла.

У тепловому пункті встановлені водонагрівачі для гарячого водопостачання й опалення, теплові й водомірні вузли, насосні агрегати (циркуляційні, пожежні, підживлювальні), устаткування для оброблення води, запорно-регулювальне обладнання, контрольно-вимірювальні прилади, устаткування для автоматизації роботи системи.

## 12.3 Міський електричний транспорт

Міський електричний транспорт ми розглядаємо як складову (підсистему) системи «Життєзабезпечення міста» (рис. 12.1), основна функція якої полягає в перевезенні громадян за встановленими маршрутами відповідно до вимог життєдіяльності міста. Одночасно міський електричний транспорт є складовою транспортної системи державного рівня, вагомим споживачем ЕЕ в якій є залізничний транспорт, який виконує функцію перевезення вантажів і пасажирів між містами на великі відстані. Характер-

ною ознакою міського електричного транспорту є використання ЕЕ для приводу рухомого складу – вагонів метрополітену, тролейбусів, трамваїв.

До складу міського електротранспорту входять підприємства міського електротранспорту, що здійснюють перевезення пасажирів, вантажів, багажу, пошти, рухомий склад, трамвайні й тролейбусні лінії, ремонтно-експлуатаційні депо, службові приміщення, фунікулери, канатні дороги, ескалатори, заводи по ремонту рухомого складу й виготовленню запасних частин, споруди енергетичного господарства та зв'язку, промислові, ремонтно-будівельні, торговельні та постачальницькі організації, навчальні заклади, науково-дослідні та проектно-конструкторські установи, заклади охорони здоров'я, відпочинку, фізичної культури і спорту та інші культурно-побутові заклади й підприємства, установи та організації незалежно від форм власності, що забезпечують роботу міського електротранспорту.

Основними видами електричного транспорту великих міст є трамваї, тролейбуси й метрополітен. В останні десятиріччя набуває поширення монорельсовий транспорт (на безшумній повітряній або магнітній підвісці), що приводиться в рух лінійними електродвигунами. У розвинутих країнах на частку міського електричного транспорту припадає більш ніж 50 % пасажирських перевезень.

Тягові підстанції міського електротранспорту живляться по кабельних (у рідких випадках повітряних) трифазних лініях.

На тяговій підстанції напруга знижується до 600 В і змінний струм перетворюється випрямлячами на постійний. По живлячих лініях позитивної і негативної полярності електроенергія подається в контактні проводи трамвая або контактні проводи тролейбуса. Рухомий склад трамваїв і тролейбусів одержує електроенергію через контакт струмоприймачів із контактним проводом, у трамваї другий контакт здійснюється через колісні пари й рейки.

Контактною мережею називається сукупність усіх пристроїв, що включає контактну підвіску, яка підтримується опорами й підсилювальними конструкціями, тросову систему, арматуру й спецчастини, що слугують для підведення електричної енергії до рухливого складу через безпосередній контакт із його струмоприймачем.

**12.3.1 Система «Міський електричний транспорт».** Складові системи «Міський електричний транспорт» подано на рисунку 12.11.

Під час розгляду електропостачання міського електричного транспорту виділяємо дві частини:

- зовнішнє електропостачання, що включає всі пристрої від центра живлення до тягової підстанції, разом з кабельними (повітряними) лініями;
- внутрішнє електропостачання, що включає тягові підстанції і всі елементи тягової мережі; контактну й рейкову мережі, що живлять лінії.

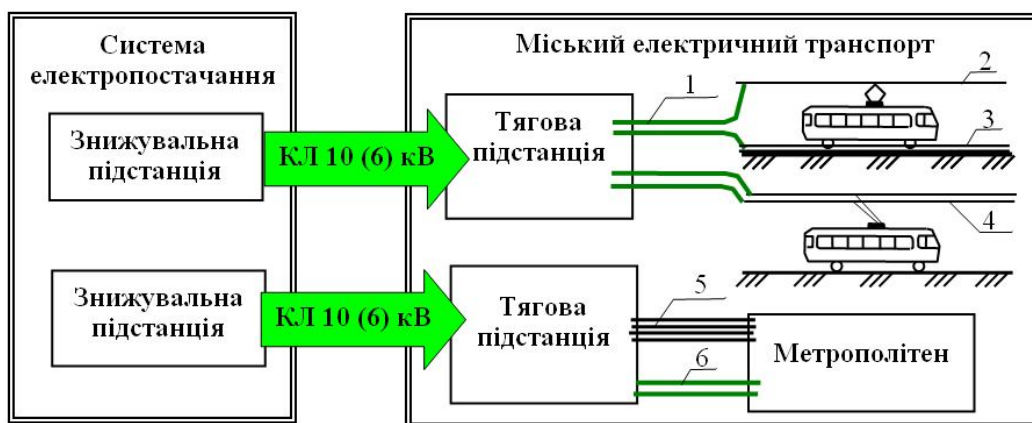


Рисунок 12.11 – Складові системи «Міський електричний транспорт»:

1 – кабельна лінія  $\pm 600$  В; 2 – контактний провід тягової мережі трамвая; 3 – рейки трамвая; 4 – контактні проводи тягової мережі тролейбуса; 5 – кабельна лінія 3 x 380 В; 6 – кабельна лінія  $\pm 825$  В

**Контактною мережею** називається сукупність устаткування, що включає контактні підвіски, опори для підтримання підвісок, конструкції, що підсилюють проводи, тросову систему, арматуру й спецчастини, що слугують для підведення електричної енергії до рухомого складу через безпосередній контакт із його струмоприймачем.

**12.3.2 Тягові підстанції.** Тягові підстанції становлять собою комплекс електротехнічного устаткування, призначеного для прийому, перетворення й розподілу електричної енергії для живлення транспортних засобів на електричній тязі. Залежно від системи тяги, тобто типу застосовуваного рухомого складу, розрізняють тягові підстанції постійного (випрямленого) струму з напругою на шинах: 3,3 і 16,5 кВ – для рухомого складу залізниць, електрифікованих на постійному струмі; 825 В – для електропостачання вагонів метрополітену; 600 В – для рухомого складу міського електричного транспорту – трамваїв і тролейбусів [7]. Тягові підстанції змінного струму забезпечують електропостачання однофазним змінним струмом 27,5 кВ промислової частоти 50 Гц тягові мережі залізниць, електрифікованих змінним струмом. Стикові підстанції постійного-змінного струму розташовують поблизу стиків ділянок тягової мережі постійного і змінного струмів.

Окрім того, тягові підстанції електрифікованих залізниць здійснюють електропостачання районних, промислових, комунальних, сільськогосподарських підприємств, що умовно називають районними, і нетягових споживачів: локомотивних і вагонних депо, майстерень, мереж освітлення, зв'язку, сигналізації, централізації й блокування. Пристрої сигналізації, централізації й блокування застосовують для організації безпечного руху потягів, підвищення пропускної здатності і забезпечення автоматичного регулювання руху потягів.

Тягові підстанції метрополітену, розташовані в тунелях і поблизу пасажирських станцій, забезпечують електроживлення мереж освітлення, вентиляції і силових ланцюгів станцій, ескалаторів, тунельного обладнання й пристроїв сигналізації блокування. Тягові підстанції, обладнані разом із підстанціями енергосистем, пристроями електропостачання районних і не-тягових споживачів, черговими пунктами дистанцій контактної мережі й районних диспетчерських пунктів телемеханічного керування, називають сполученими.

За іншими ознаками тягові підстанції класифікують:

- за схемою підключення до системи електропостачання (схема зовнішнього електропостачання підстанцій) – опорні, проміжні транзитні, проміжні на відгалуженнях, тупикові, підстанції з радіальною схемою первинного електропостачання;
- за значенням напруги живлення – 6; 10; 35; 110; 220 кВ;
- за кількістю встановлених перетворювальних агрегатів – багатоагрегатні й одноагрегатні;
- за системою тягового електропостачання – *тягові підстанції* централізованого й децентралізованого живлення тягової мережі;
- за способом керування – телемеханізовані й нетелемеханізовані;
- за способом обслуговування – з постійним черговим персоналом, із чергуванням на дому, без чергового персоналу;
- за конструктивним виконанням – наземні закриті, відкриті, змішані (частина устаткування розташовується в приміщенні підстанції), підземні глибокого й дрібного закладення, стаціонарні й пересувні, що використовуються під час капітальних ремонтів устаткування стаціонарних підстанцій або для посилення їхньої потужності.

Існує *дві системи електроспоживання трамвая й тролейбуса*: централізована й децентралізована.

**Централізована система** характеризується наявністю багатоагрегатних підстанцій, що вирізняються високою надійністю роботи, великим районом живлення контактних мереж, протяжністю кабельних ліній 600 В. Їм властиві два режими: нормальний і аварійний. Відмова в роботі підстанції централізованої системи електроспоживання призводить до призупинення руху на лінії. Показники роботи системи розраховують тільки для нормального режиму.

**Децентралізована система** електроспоживання базується на резервуванні потужності суміжних тягових підстанцій і їхньому розвантаженні по контактній мережі. У цьому разі резервне живлення на підстанції відсутнє, за винятком власних потреб. Вимкнена підстанція резервується сусідніми підстанціями, які мають для цього додаткову потужність.

У разі децентралізованої системи електроспоживання можливі три режими роботи: нормальний, вимушений і аварійний.

У **нормальному режимі** працюють усі елементи системи електроспоживання й виконуються норми цього режиму.

**Вимушений режим** виникає тоді, коли виходить з ладу окремих пристрій системи або підстанція загалом. У цьому випадку показники системи електроспоживання погіршуються, але знаходяться в межах, припустимих технічними нормами.

Нормальний та вимушений режими забезпечують потрібні обсяги руху транспорту на лінії. Показники роботи децентралізованої системи електроспоживання розраховуються для нормального й вимушеного режимів.

**Аварійний режим** настає при важких ушкодженнях елементів системи електропостачання, коли рух у розрахункових межах стає неможливим. У цьому режимі рух або скорочується, або зовсім припиняється.

Основним нормованим технічним показником роботи пристроїв електроспоживання є максимально припустиме падіння напруги тягової мережі, граничні навантаження контактного проводу й кабельних ліній, припустимі навантаження перетворювальних агрегатів та іншого обладнання тягових підстанцій, падіння напруги в колійній мережі за умови захисту підземних споруд від електричної корозії.

**12.3.3 Особливості режимів тягових мереж.** Робота тягових мереж відрізняється від роботи інших систем електропостачання. Напруга на шинах тягової підстанції і на струмоприймачах електричного рухомого складу має відповідати значенням ГОСТ 6962-75 [7] (подані у табл. 12.2). Для трамвая й тролейбуса відповідно до [7] встановлена номінальна напруга 600 В з припустимими відхиленнями на струмоприймачі електрорухомого складу найбільших значень – до 700 В і найменших – до 400 В. Тягові навантаження постійно змінюються в дуже широких межах за часом і місцем підключення на контактній мережі. Під час гальмування тягові двигуни рухомого складу можна перевести в генераторний режим і віддавати електричну енергію в тягову мережу, здійснюючи рекуперацію.

Відмінною особливістю роботи рейкової мережі є мала ізоляція рейок від землі. Земля – хороший провідник електричного струму, тому частина струму, що повертається на підстанцію, відгалужується в землю і проходить як по землі, так і по підземних металевих спорудженнях (трубах, каркасах підземних спорудах, броні й оболонках кабелів тощо.). Струми витокку із рейки в землю називаються *блукаючими струмами*.

У місцях виходу блукаючих струмів із поверхні металевих споруджень відбувається електрохімічний процес, що супроводжується корозією (руйнуванням) металу підземних споруджень. Роль електроліту в цьому процесі відіграють розчини солей, кислот і лугів, що містяться в ґрунті. Інтенсивність електричної корозії залежить від значення величини блукаючих струмів і часу їхньої дії.

Підраховано, що струм величиною в 1 А, протягом року може за певних умов зруйнувати до 34 кг свинцю або понад 9 кг сталі. Щоб знизити шкідливу дію блукаючих струмів до безпечних значень, застосовують низку заходів щодо їхнього обмеження й потрапляння в підземні металеві спорудження. Головними заходами є зменшення повздовжнього опору ре-



йок за допомогою зварювання стиків і з'єднання мідним дротом окремих ланок і всіх ниток рейок для паралельної роботи, збільшення перехідного опору між рейками й землею шляхом поліпшення ізоляції основи, застосування водовідводу, зменшення різниці потенціалів між пунктами приєднання до рейок кабелів живильних ліній.

Таблиця 12.2 – Значення напруг електрифікованого транспорту [7]

Вид електрифікованого транспорту	Напруга, В				
	на шинах тягової підстанції		на струмоприймачі електричного рухомого складу		
	номінальна	найбільша	номінальна	найбільша	найменша
1 Залізні дороги					
1.1 Магістральні					
– змінного струму;	27 500	29 000	25 000	29 000	19 000
– постійного струму.	3 300	3 850	3 000	3 850	2 200
1.2 Промислові	10 500	11 500	10 000	11 500	75 00
– під'їзні і кар'єрні шляхи змінного струму;	27 500	29 000	25 000	29 000	19 000
– під'їзні, кар'єрні та внутрішньо-заводські шляхи постійного струму.	3 300	3 850	3 000	3 850	2 200
	1 650	1 950	1 500	1 950	1 100
	(600)	(700)	(550)	(700)	(400)
2 Міський електрифікований транспорт:					
– метрополітен;	825	975	750	975	550
– трамвай, тролейбус.	600	700	550	700	400

## Висновки

Електроспоживачі систем життєзабезпечення міст становлять значну частину електроспоживачів, що впливають на режим роботи систем електропостачання та показники якості електричної енергії.

Характерними групами електроспоживачів систем життєзабезпечення міст є системи «Водопостачання та водовідведення», «Теплопостачання», «Міський електричний транспорт».

Режим роботи системи «Водопостачання та водовідведення» характеризується сталим навантаженням, яке має виражений добовий характер.

Режим роботи системи «Теплопостачання» характеризується сезонністю навантаження.

Основними електроприймачами систем «Водопостачання та водовідведення» та «Теплопостачання» є електричні двигуни.

Добовий графік навантаження системи «Міський електричний транспорт» має два періоди максимального навантаження (ранкова й вечірня години «пік»).

## Питання для самоконтролю

1. Охарактеризуйте систему «Життєзабезпечення міста» як споживача електричної енергії.
2. Назвіть характерні групи електроспоживачів системи «Життєзабезпечення міста».
3. Поясніть структуру системи «Водопостачання та водовідведення».
4. Поясніть структуру системи «Водопостачання міста» та функції електроспоживачів у цій системі.
5. Назвіть режими роботи насосних станцій.
6. Які електродвигуни застосовують в електричному приводі насосних станцій?
7. Поясніть, як працює схема керування електродвигунами насосної станції.
8. Охарактеризуйте систему «Водопостачання Харківського регіону».
9. Які основні електроприймачі системи «Водовідведення»?
10. Поясніть роботу схеми керування дренажними насосами.
11. Які основні складові електроспоживачі системи «Теплопостачання міста»? Яку роль виконують електроспоживачі в цій системі?
12. Поясніть роботу схеми керування насосами гарячого водопостачання бойлерної.
13. Поясніть роботу схеми керування підвищувальними насосами бойлерної.
14. Поясніть структуру системи «Міський електричний транспорт».
15. Які особливості режимів роботи міського електричного транспорту?

## Список рекомендованих джерел

Основна література: [18, С. 11–19, 70–72, 152–154], [52, С. 5–31].  
Додаткова література: [7], [36], [68], [69].

## Розділ 13 ЕЛЕКТРОСПОЖИВАЧІ ІНЖЕНЕРНИХ СИСТЕМ БУДИНКІВ

**Ключові поняття:** інженерне устаткування, електричне опалювання, вентиляція, кондиціювання

### 13.1 Загальна характеристика інженерних систем будинків

Будинки й споруди в містах можна поділити на три групи: житлові будинки, комунальні підприємства й будинки громадського призначення.

Ефективна експлуатація сучасних житлових, громадських і промислових будинків забезпечується інженерними системами, до складу яких входить різноманітне електроустаткування. Системи кондиціювання й вентиляції повітря, опалення будинків, зволожувачі й очищувачі повітря, ліфтові й підймальні установки, установки електричного опалення посідають важливе місце в інженерних системах будівель.

Усе більшого поширення набувають висотні будинки й торгово-розважальні центри, що становлять складну конструктивну систему з великою кількістю інженерних комунікацій, з розміщенням на одному об'єкті різних систем інженерно-технічного життєзабезпечення підвищеної складності. Багато висотних будівель багатофункціональні і містять або один основний функціональний елемент (житловий, адміністративно-офісний, готельний), або два основних функціональних елементи (офісний і житловий, офісний і готельний, житловий і готельний). Крім цього, у висотних будинках є допоміжні функціональні елементи, призначені для обслуговування людей, які в них перебувають, а саме автостоянки, технічні приміщення, басейни, тренажерні зали, зали для гри в боулінг, лазні-сауни; амбулаторні й медичні кабінети тощо. У висотних будинках також можуть розташовуватися об'єкти загальноміського призначення: магазини, ресторани, кафе, буфети, фінансові й банківські установи, різноманітні офіси та ін.

Основними компонентами інженерних систем будинків є електро-, тепло- й водопостачання, водопідготовка, каналізація, вентиляція, кліматичне обладнання, кондиціювання, електрообігрівання, охоронно-пожежні системи, очистка стоків, іонізатори й очищувачі повітря, освітлення та деякі інші.

Важливу роль в інженерних системах будівель відіграє **силове електрообладнання**, до складу якого входять *електродвигуни й пускорегулююча апаратура, технологічне, санітарно-технічне, протипожежне устаткування, підймально-транспортні установки, збиральні механізми*, а також силові електроприймачі теплового, лабораторного, лікувального обладнання та інші аналогічні апарати й прилади електромережі з усім комплексом провідників, розподільних пристроїв і електромонтажних виробів.

**Інженерне устаткування** будинку – це комплекс технічних пристроїв, що забезпечують сприятливі (комфортні) умови побуту й трудової діяльності мешканців будинку.

Інженерне устаткування будівель включає системи вентиляції, водопостачання (холодного й гарячого), каналізації, опалювання, кондиціонування повітря, газопостачання, штучне освітлення, електроустаткування, внутрішній транспорт (пасажирські й вантажні ліфти), засоби видалення сміття, прибирання пилу, пожежогасіння, телефонізації, радіофікації та інші види внутрішнього благоустрою.

За останнє десятиліття у великих містах побудовані висотні будинки й будинки-комплекси від 75 до 100 метрів заввишки, які характеризуються наявністю електроприймачів як I категорії надійності електропостачання, так і особливої групи електроприймачів. Електроприймачі висотних будинків належать до таких категорій [20]:

особлива група I категорії – електроприймачі ліфтів для транспортування пожежних підрозділів, систем протидимового захисту, автоматичної пожежної сигналізації та пожежогасіння, оповіщення та управління евакуацією, освітлення безпеки та евакуаційного освітлення, систем протипожежного водопроводу, протипожежних пристроїв систем інженерного обладнання, аварійно-рятувального обладнання вогнів світлового обгородження й світломаркування та сигналізації довивухової концентрації газу;

I категорія – електроприймачі, пов'язані з роботою інженерних систем будинку, зв'язку, ліфтів та електроприймачі згідно з ДБН В.2.5-23:2010 [21];

II категорія – електроприймачі, що не увійшли до переліку особливої групи I та II категорій.

Далі ми розглянемо деякі групи електроприймачів інженерних систем будівель.

### **13.2 Системи електричного опалення й обігрівання будинків**

Принципи й способи електричного опалення були розглянуті у розділі 7.2, а системи централізованого опалення, як складові системи «Життєзабезпечення міста», – у розділі 12.2. У цьому розділі ми розглянемо декілька характерних електроприймачів, які використовуються автономно або як доповнення до наявної системи центрального опалення. Таке устаткування, зокрема, ефективне в разі похолодання у весняно-осінні періоди, коли центральне опалення відімкнене.

Істотною перевагою електричного опалення є можливість економічно й раціонально використовувати ЕЕ. У кожному опалюваному приміщенні встановлюють термостат, який дає змогу регулювати температуру в широкому діапазоні (5–30 °С). Зазначимо, що зниження температури на 1 °С зменшує витрати електроенергії на 4–5 %. При гнучкому змінюванні температурних режимів у кожному окремому приміщенні економія може сягати 30–50 %. Особливо істотна економія (до 80 %) досягається для високих (понад 4,5 м) об'єктів у разі використання інфрачервоних обігрівачів або

«теплої підлоги». Можна запрограмувати будь-який графік змінювання температур, можна відімкнути будь-яку кімнату, групу кімнат або цілий поверх. Після тимчасового відімкнення електроживлення опалення починає працювати без втручання людини.

Серед електроприймачів цієї групи найпоширенішими є електрокалорифери й електроконвектори. Останнім часом набувають поширення системи з інфрачервоними джерелами теплоти.

**Електрокалорифери** застосовують для створення мікроклімату в будинках промислового, комунального, побутового й культурного призначення, у теплицях вирощування сільськогосподарської продукції. Їх встановлюють як складову в системах вентиляції, повітряно-опалювальних агрегатів, сушильного устаткування. Електричними калориферами обладнують великі майстерні, офіси, гаражі, склади, сушильні камери. Зазвичай їх застосовують на будівельних майданчиках для прискорення висихання штукатурки, фарби та інших будівельних матеріалів. Часто їх використовують і з іншою метою, наприклад, як теплові завіси воріт і дверних конструкцій.

Зразком сучасних електрокалориферів є калорифери серії ПНЕ (скорочення від «ПовітроНагрівачі Електричні»). Конструктивно калорифери цієї ПНЕ становлять опалювальний модуль (рис. 13. 1, *а*): металевий каркас прямокутного перерізу, усередині якого розташовані ребристі ТЕНи (трубчасті електронагрівачі). Нагрівачі розташовують у шаховому порядку в два або три ряди, кожний із яких становить автономну електричну секцію. У кожній секції нагрівачі з'єднані за схемою «зірка» (рис. 13. 1, *б*). Кількість установлених секцій ТЕНів визначає загальну потужність електрокалорифера. При підключенні до трифазного джерела напругою 380 В на кожному ТЕНі напруга становить 220 В. Технічні характеристики електрокалориферів серії ПНЕ виробництва вентиляторного заводу «Укрвентсистеми» [67] наведені в таблиці 13.1.

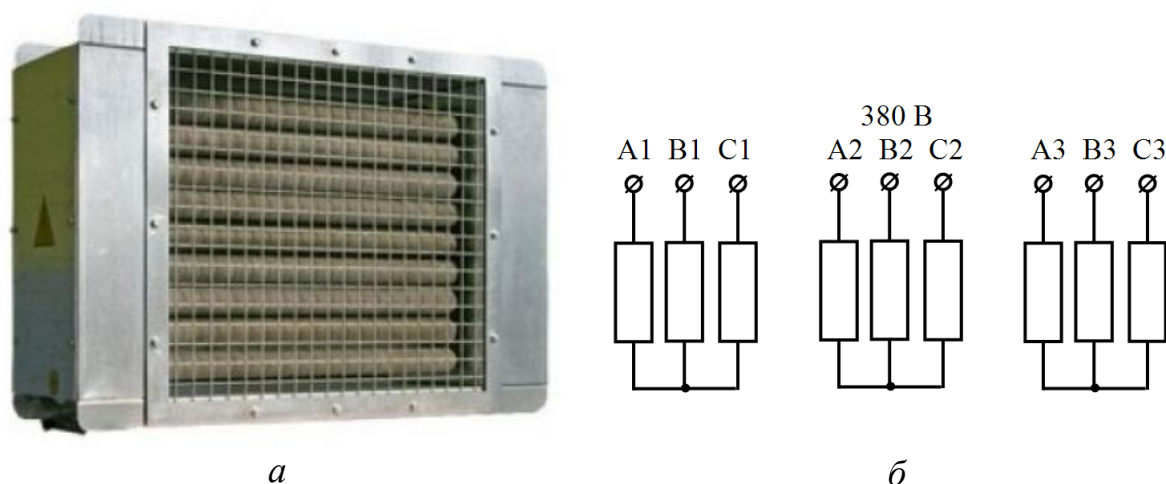


Рисунок 13.1 – Електрокалорифер:  
*а* – зовнішній вигляд; *б* – варіант схеми вмикання ТЕНів

Таблиця 13.1 – Технічні характеристики калориферів ПНЕ

Параметр	Тип калорифера						
	ПНЕ-7,5	ПНЕ-10	ПНЕ-15	ПНЕ-25	ПНЕ-45	ПНЕ-90	ПНЕ-250
Номінальна потужність, кВт	7,5	10	15	25	45	90	250
Витрати повітря, м <sup>3</sup> /год	600	800	1 200	1 800	3 500	7 000	20 000
Температура на поверхні ТЕНів, не більше, °С	240	240	240	240	240	240	240
Кількість електричних секцій	1	2	2	3	3	3	9
Напруга мережі, В	3 x 380	3 x 380	3 x 380	3 x 380	3 x 380	3 x 380	3 x 380
Напруга на ТЕНах, В	220	220	220	220	220	220	220
Схема з'єднання нагрівачів	У	У	У	У	У	У	У
Маса, кг	4,4	4,9	5,6	6,4	11,2	150	198

На рисунку 13.2 наведені приклади розміщення електрокалорифера в системі обігрівання. Задана температура вихідного повітря підтримується автоматично двома електроконтактними термометрами, датчики яких установлені на виході повітря з калорифера. При вмиканні електрокалорифера працюють всі нагрівні елементи. Коли температура повітря на виході стане вищою за граничну, автоматично вимкнеться одна секція, при подальшому підвищенні температури вимкнеться друга секція. Якщо температура вихідного повітря стане вищою за граничну для однієї секції, то автоматично вимкнуться й останні нагрівачі.

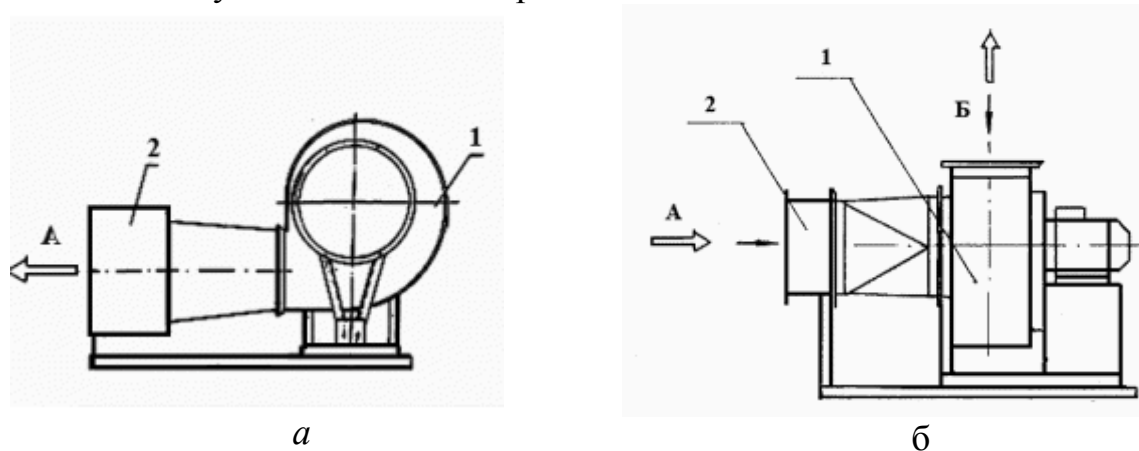


Рисунок 13.2 – Приклади розміщення електрокалорифера:  
а – на виході повітряного потоку; б – на вході повітряного потоку:  
1 – вентилятор; 2 – електрокалорифер

У разі пониження температури нагрівні елементи вмикаються в зворотній послідовності. В електричних колах контролю температури передбачене автоматичне блокування: вимикання електрокалорифера в разі зупинки електродвигуна вентилятора; запобігання вмиканню ТЕНів при непрацюючому електродвигуні вентилятора.

На рисунку 13.3 подано схему електрокалорифера на три окремі трифазні секції ТЕНів – *EK1*, *EK2* та *EK3*. Вимикачем *SA2* можна вмикати окремі секції нагрівачів і регулювати потужність електрокалорифера в межах 100, 67 або 33 % від номінальної потужності. У шафі керування встановлено вимикач *QF*, запобіжники *FU1*, *FU2*, *FU3*, *FU4* для захисту секцій калорифера й кола керування, три електромагнітні пускачі *KM1*, *KM2*, *KM3* для вмикання секцій нагрівачів, сигнальні лампи *HL1–HL5*, проміжне реле *K1*, перемикач *SA1* для вибору режиму роботи (ручний «Р» чи автоматичний «А»), перемикач *SA2* для вибору кількості ввімкнутих секцій при ручному керуванні та автоматичний вимикач *QF2* для керування двигуном вентилятора.

При ручному керуванні перемикач *SA1* встановлюють у положення «Р». Температуру повітря в приміщенні регулюють шляхом вмикання й вимикання окремих секцій електронагрівачів за допомогою перемикача *SA2*. Якщо температура ребер трубчастого нагрівача перевищить +180 °С, розімкнеться контакт температурного реле *SK1* в колі живлення проміжного реле *K1*, що призведе до вимикання всіх нагрівачів.

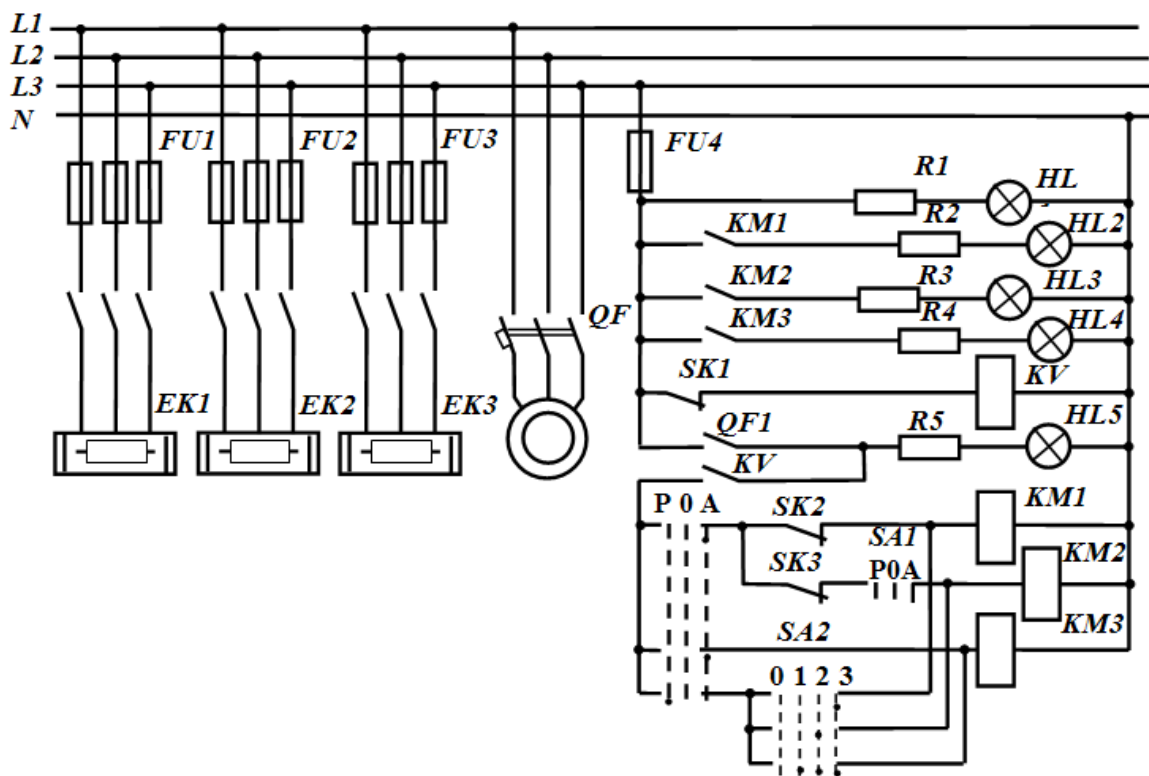


Рисунок 13.3 – Схема електрична калорифера на 3 секції ТЕНів

При автоматичному керуванні перемикач *SA1* ставлять у положення «А». Температура повітря в приміщенні контролюється за допомогою температурних реле *SK2* і *SK3*. Коли температура повітря в приміщенні стане вищою за встановлену нормами, то контакт температурного реле *SK2* розімкнеться, що призведе до вимикання першої секції електронагрівачів. Якщо температура в приміщенні підвищуватиметься й далі, розімкнеться контакт температурного реле *SK3*, що призведе до вимикання другої секції електронагрівачів. Вимикання останньої секції електронагрівачів відбудеться тільки тоді, коли температура ребер трубчастого нагрівального елемента перевищить  $+180\text{ }^{\circ}\text{C}$ . Якщо температура стане нижчою за задану нормами, то секції нагрівачів вмикатимуться в зворотному порядку. Про роботу окремих секцій нагрівачів сигналізують лампи *HL2–HL4*.

**Електричні конвектори** зазвичай застосовують як пристрої додаткового обігрівання приміщень. Назва «конвектор» відображає принцип розподілу гарячого повітря в приміщенні – природну конвекцію. Нагрівання повітря відбувається під час його проходження через нагрівальний елемент. Холодне повітря проходить через нагрівальний елемент, нагрівається й виходить через жалюзі, а його місце займає повітря з приміщення. Таким чином, тепле повітря циркулює в приміщенні, забезпечуючи швидке й комфортне тепло. Конвектор нагріває приміщення, не використовуючи пристроїв для примусової циркуляції повітря, що робить його надійнішим і економічнішим приладом порівняно з обігрівачами із вбудованим вентилятором. До того ж, на відміну від тепловентиляторів, конвектори, забезпечуючи ефективний рух теплого повітря, працюють безшумно.

Розміщують конвектори внизу приміщення, орієнтовно на висоті 15 см від підлоги (рис. 13.4).

Сучасні електричні конвектори обладнані електронним термостатом, що забезпечує досить точне (до  $0,1\text{ }^{\circ}\text{C}$ ) дотримання заданої температури. Для порівняння: у масляних радіаторах термостат контролює не температуру повітря, а температуру масла, тому точність підтримання температури в них набагато менша й становить приблизно  $3\text{--}5\text{ }^{\circ}\text{C}$ .

Важливими перевагами електроконвекторів є такі.

Низький рівень шуму. Електроконвектори працюють майже безшумно: у них немає вентиляторів та інших рухомих частин. Використання електронних програматорів дає змогу позбутися регулярних клацань, властивих механічним термостатам.

Високий ККД – близько  $95\text{--}99\%$ .



Рисунок 13.4 – Електроконвектор



Низька інерційність. Обігрівання приміщення розчинається майже одночасно з умиканням приладу в мережу. Оминаючи проміжні теплоносії, наприклад воду чи масло, для нагрівання яких потрібно досить багато часу, повітря прогрівається напряму. Електричний конвектор досягає робочого режиму всього за 1–2 хв.

Різні виробники випускають електроконвектори з широким діапазоном номінальних потужностей – від декількох сотень ват до 2–3 кВт. На обігрівання 1 м<sup>2</sup> кімнати в середньому витрачається 100 Вт потужності конвектора.

### 13.3 Системи вентиляції і кондиціонування повітря

Призначення систем кондиціонування й вентиляції полягає у створенні, регулюванні й автоматичному підтриманні комфортного мікроклімату в закритих приміщеннях: температури, вологості, чистоти, швидкості руху повітря тощо.

**Вентиляція** забезпечує циркуляцію повітря в приміщенні з метою видалення надлишків тепла, вологи, шкідливих та інших речовин, щоб забезпечити допустимі метеорологічні, санітарно-гігієнічні, технологічні умови повітряного середовища. **Система вентиляції** – це сукупність пристроїв для оброблення, транспортування, подавання й видалення повітря. Елементом примусового руху повітря в системі вентиляції є вентилятор із приводом від асинхронного електродвигуна. Потужність АД визначається вимогами щодо системи вентиляції і становить від сотень ват до одиниць кіловат. Режим роботи – довгостроковий.

**Кондиціонування** здійснюється комплексом технічних засобів, які називаються **системою кондиціонування повітря** (далі – СКП). На відміну від вентиляції, СКП забезпечує не тільки заміну повітря в приміщенні, але й автоматично підтримує в ньому необхідні метеорологічні умови: чистоту повітря, газовий склад, ароматичні запахи, а в деяких випадках і тиск повітря.

До складу СКП входять технічні засоби забору повітря, підготовки його параметрів (фільтри, теплообмінники, зволожувачі або осушувачі), переміщення (вентилятори) і розподілу, а також засоби автоматики, дистанційного керування й контролю. СКП великих громадських, адміністративних і виробничих будівель зазвичай обслуговуються комплексними автоматизованими системами керування.

За призначенням СКП поділяються на системи комфортного й технологічного кондиціонування. **Комфортне кондиціонування** застосовують для створення й автоматичного підтримання чистоти повітря й метеорологічних умов у будинках житлового й громадського призначення. Технологічне кондиціонування застосовують для забезпечення параметрів повітря, що відповідають вимогам щодо вироблюваної продукції, проведення технологічних операцій, зберіганню обладнання тощо.

Залежно від розташування кондиціонерів відносно обслуговуваних приміщень СКП поділяють на центральні й локальні.

**Центральні СКП** застосовують для багатопверхових, функціональних будівель, приміщення в яких об'єднані єдиними завданнями (поліклініки, офісні будівлі, виробничі приміщення, архіви, склади та ін.). Такі системи забезпечуються теплом, що доставляється гарячою водою, паром або електрикою; холодом, що доставляється холодною водою або холодоагентом; електрикою, для забезпечення роботи вентиляторів, насосів тощо. Центральні СКП забезпечують ефективне підтримування заданої температури й відносної вологості повітря; забезпечують ефективне шумо- й віброгасіння, що важливо для приміщень з підвищеними вимогами до акустики (радіо-, телестудії, студії запису та ін.).

**Локальні СКП** зазвичай базуються на автономних і неавтономних кондиціонерах, встановлених безпосередньо в обслуговуваних приміщеннях. Перевагами таких систем є простота установа й монтажу, можливість установа в уже побудованих житлових і адміністративних будинках, в окремих кімнатах споруджуваних будинків, наприклад якщо режим споживання холоду/тепла в них значно відрізняється від переважної більшості інших приміщень. Крім поліпшення параметрів (рециркуляції) повітря, що вже є в приміщенні, також існують **спліт-системи**, що забезпечують забір і подачу очищеного повітря ззовні.

На рисунку 13.5 подано зразок конструкції кондиціонера, у якому АД М1 використовується в приводі вентилятора, що подає приточне повітря до охолоджувача, а АД М2 – у приводі насоса циркуляції холодоагенту.

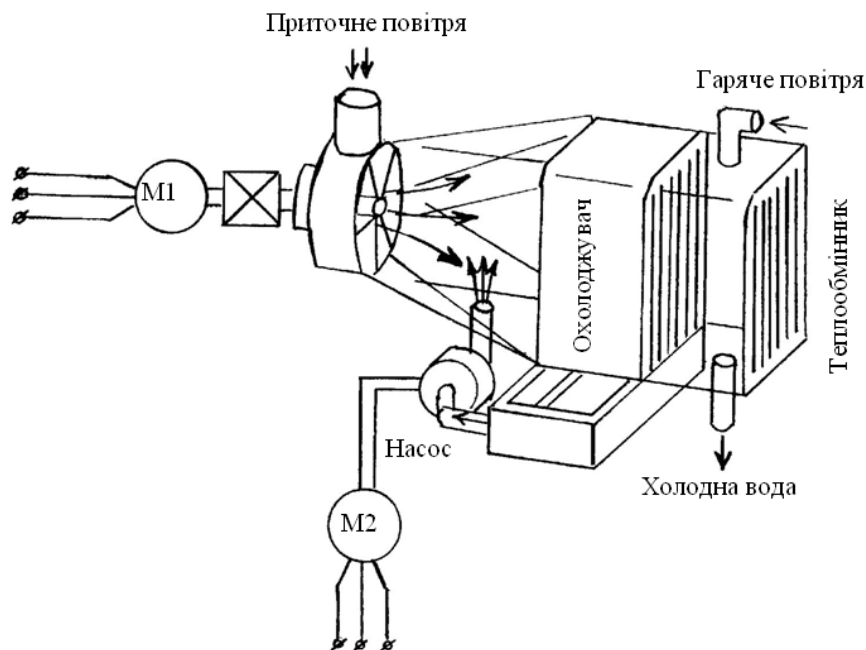


Рисунок 13.5 – Елементи конструкції кондиціонера

### 13.4 Ліфти й ескалатори

**Ліфт** становить стаціонарну вантажопідіймальну машину періодичної дії, призначену для підйому й спуску людей або вантажів. Перевезення пасажирів здійснюється окремими групами через певний проміжок

часу, до того ж рух чергується із зупинками для посадки й висадки людей. Ліфт є найпоширенішим підйомником періодичної дії.

До пасажирських підйимально-транспортних машин належать і фунікулери. Ці машини зазвичай використовують на крутих підйомах. Приміром у місті Києві фунікулер використовується для підйому на Володимирську гірку.

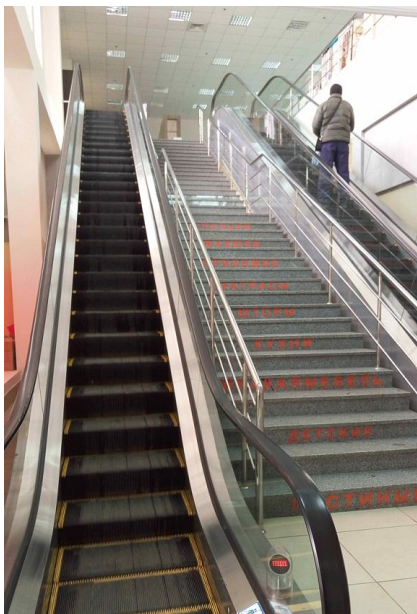


Рисунок 13.6 – Ескалатор

До підйимально-транспортних машин безперервної дії належать також ескалатори (рис. 13.6). Посадка й висадка пасажирів у таких машинах відбувається без зупинки останніх у процесі роботи. При значних і інтенсивних пасажиропотоках, характерних для більшої частини громадських будівель, у метрополітенах, портах, вокзалах і універмагах широко розповсюджені саме ескалатори.

Окрім того там, де пасажиропотік порівняно невеликий і непостійний (житлові й адміністративні будівлі), установлюють ліфти. За призначенням вони можуть бути пасажирськими, вантажними, вантажопасажирськими, лікарняними й спеціальними. За швидкістю ліфти поділяють на

тихохідні – до 1 м/с, швидкохідні – від 1 до 2,5 м/с і швидкісні – від 2,5 м/с до 9,2 м/с.

Пасажирський ліфт з електроприводом становить кабінку, підвішену на сталевих канатах у вертикальній шахті. Установлений у машинному приміщенні лебідка намотує канати на барабан. Кабіна рухається по напрямних, закріплених на стінах шахти. Сучасні ліфти – досить складні системи з вантажопідйомністю від 50 кГ (100, 150 і 250 кГ – маловантажні) до 5 000 кГ. Вони оснащуються складними системами автоматичних пристроїв, що запобігають аварійним ситуаціям.

У ділових центрах, банках та інших громадських будівлях склалася практика встановлювати ліфти, що дозволяють обслуговувати великі пасажиропотоки в періоди приходу й виходу співробітників. При цьому зовсім не обов'язково збільшувати кількість ліфтів або їхню вантажопідйомність. У наш час подібні завдання можна вирішити за допомогою спеціального програмного забезпечення, яким обладнані деякі моделі ліфтів провідних виробників. Приміром існують спеціальні програми для зменшення часу очікування приходу ліфта.

У торговельних і виставкових комплексах зазвичай встановлюють панорамні ліфти. Панорамний ліфт, призначений для огляду, може мати різну конфігурацію. Для створення максимального огляду здебільшого застосовують скляні панелі від підлоги до стелі.

Конкуренція на ліфтовому ринку змушує підприємства постійно підвищувати якість своєї продукції. Цьому сприяє модернізація виробництва, установлення сучасного високотехнологічного обладнання, розроблення нових конструкцій ліфтів. Розширення номенклатури підприємств-виробників забезпечує великий вибір ліфтового обладнання для замовників. Приміром, окрім типових і серійних проектів, заводи виготовляють ліфти за індивідуальними замовленнями. Наприклад, у зв'язку із запровадженням нових будівельних норм багато виробників випускають ліфти для перевезення пожежних підрозділів. До того ж системи керування ліфтами можуть виконуватися на різній елементній базі, що забезпечує необхідний режим роботи ліфта залежно від типу будівлі, у якій його встановлено.

**Електрообладнання ліфтів** за складом і призначенням аналогічне до електроустаткування вантажопідіймальних машин (див. підрозділ 10.1). Напруга від джерела живлення подається до машинного приміщення ліфта через увідний пристрій, що повинен вимикати живлення приводного електродвигуна, кіл керування, сигналізації й освітлення кабіни ліфта. Для живлення кіл сигналізації і ремонтного освітлення використовують знижувальні трансформатори напруги з номінальною напругою первинних обмоток 220 і 380 В, вторинних обмоток – 24 і 36 В. Потужності знижувальних трансформаторів – 250–1 500 ВА.

Для захисту електродвигунів від перевантаження й коротких замикань використовують автоматичні вимикачі з тепловими й електромагнітними розчеплювачами.

Для вимикання силових кіл електродвигунів і гальмових електромагнітів застосовують контактори постійного і змінного струмів.

На рисунку 13.7 як приклад подано фрагмент схеми силових кіл вантажного ліфта. На схемі показані: *М* – двошвидкісний АД, *ЕмГ* – електромагнітне гальмо, *КН* – силові контакти контактора «униз», *КГ* – силові контакти контактора «нагору», *КВ* – силові контакти контактора «велика швидкість», *КМ* – силові контакти контактора «мала швидкість».

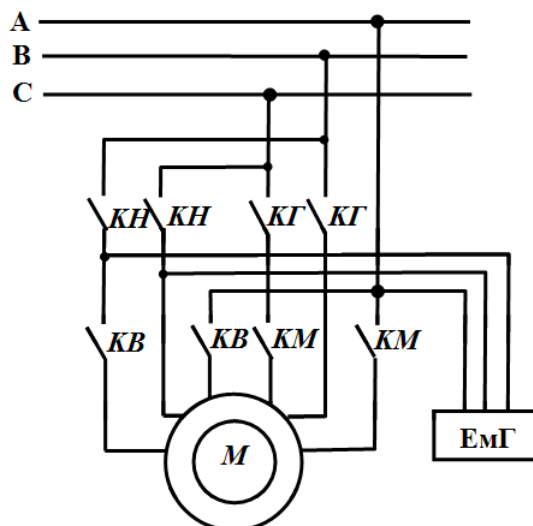


Рисунок 13.7 – Силові кола вантажного ліфта

## **Висновки**

Основними значущими складовими інженерних систем будинків є електроспоживачі систем водопостачання та водовідведення, теплопостачання, міського електричного транспорту.

Складові інженерних систем будинків – це складні багатоелементні комплекси електрообладнання, значну частину якого становлять електродвигуни.

Сучасні інженерні системи будинків вирізняються високим ступенем автоматизації керування режимами роботи.

## **Запитання для самоперевірки**

1. Назвіть основні компоненти інженерних систем будинків.
2. Охарактеризуйте особливості електроприймачів сучасних висотних будинків.
3. Які елементи становлять силове електроустаткування інженерних систем будинків?
4. Назвіть основні електроприймачі систем електричного опалювання будинків. Охарактеризуйте їхні режими роботи.
5. Охарактеризуйте сучасні калорифери.
6. Поясніть як працює схема електричного калорифера на три секції ТЕНів.
7. На які групи й за якими ознаками поділяють системи кондиціонування повітря?
8. Охарактеризуйте особливості ліфтів і сферу їхнього застосування.
9. Охарактеризуйте переваги й недоліки використання електроенергії для опалення будинків.

## **Список рекомендованих джерел**

Основні джерела: [28, С. 366–374].

Додаткові джерела: [63, 67, 20].

## Розділ 14 ЕЛЕКТРОПРИЙМАЧІ ЖИТЛОВИХ БУДИНКІВ

**Ключові поняття:** клас енергоефективності, побутові електричні прилади, холодильник, загальнобудинкове устаткування.

Сучасні житлові будинки наповнені великою кількістю різноманітних приймачів ЕЕ. Їх поділяють на дві групи: електроприймачі квартир і електроприймачі загально-будинкового призначення. У першу групу входять освітлювальні й побутові електроприлади та різноманітне електроустаткування. Другу групу становить електричне устаткування системи життєзабезпечення житлового будинку: силове устаткування вантажних і пасажирських ліфтів, насосів господарського і протипожежного водопостачання, кліматичних і вентиляційних систем, пристроїв димозахисну, машини механічного прибирання сходів і коридорів, електричне обігрівання й освітлення загальнобудинкових приміщень тощо.

Постійне збільшення кількості встановлених у квартирах побутових електричних приладів загострює проблему ефективного використання та економії електричної енергії. У 1992 році в Європейському Союзі було прийнято Директиву 92/75/СЄЕ [74] щодо маркування й стандартної інформації зі споживання побутовими приладами електроенергії й інших ресурсів. Ефективність використання енергії позначається класами – від А до G, які характеризують енергетичну ефективність обладнання під час експлуатації. Клас А має найменше енергоспоживання, G – найменш ефективне. Наліпка з позначенням класу енергоефективності також містить іншу корисну для покупця інформацію, допомагаючи зробити вибір між різними моделями. Ця інформація також надається і в каталогах продукції.

Пізніше було введено в дію документи, які конкретизують показники й класи енергоефективності для різної побутової техніки. Нові нормативні документи (Directive 2010/30/UE [72], Décret n° 2011-1479 [73] та ін.) розширили сферу регулювання також і для промислових і торговельних приладів і устаткувань. Введено три нові класи енергоефективності: А+, А++ і А+++. Нижчі класи (Е – G) з наліпки енергетичної ефективності вилучено.

На сьогодні вимоги до маркування енергетичної ефективності відображені в таких законодавчих актах Європейського Союзу [74]:

- Директива 96/60/ЕС (машини комбіновані прально-сушильні);
- Директива 98/11/ЕС (лампи електричні);
- Директива 2002/40/ЄС (духовки електричні);
- Регламент 1059/2010/EU (машини посудомийні);
- Регламент 1060/2010/EU (холодильники й морозильники);
- Регламент 1061/2010/EU (пральні машини);
- Регламент 1062/2010/EU (телевізори й монітори);
- Регламент 626/2011/EU (кондиціонери);
- Регламент 392/2012/EU (сушильні машини барабанного типу).

Клас енергоефективності побутової техніки визначає її виробник відповідно до індексів енергоспоживання (даних про стандартне енергоспоживання) як співвідношення енергоспоживання певного приладу з нормативними величинами для різних класів енергоефективності.

У таблиці 14.1 наведено дані про споживання електричної енергії побутовою технікою відповідних класів енергоефективності порівняно зі стандартним споживанням ЕЕ.

Таблиця 14.1 – Показники енергоефективності

Клас енергоефективності	A, A+, A++, A+++	B	C	D	E	F, G
Електроспоживання до стандартного	менше на 45 %	менше на 25 %	менше на 5 %	100 %	до 110 %	більше на 25 %

Важливим показником електроспоживачів житлових будинків також є група за категорію надійності електропостачання. Для електроспоживачів житлових будинків і гуртожитків вона визначається кількістю поверхів. Категорійність поширюється не на весь будинок (споживач ЕЕ), а на окремі електроприймачі цього будинку. Приміром, у житлових будинках і гуртожитках понад 16 поверхів заввишки електроприймачі систем протипожежного захисту, сигналізації загазованості, ліфти, аварійне освітлення відносяться до I категорії надійності електропостачання, решта електроприймачів житлового будинку – до другої категорії [21]. Дані щодо категорійності будинків і споруд цивільного призначення наведені в додатку А.

#### 14.1 Електроприймачі квартир

Характерними приймачами ЕЕ у квартирах є електричне освітлення, електропобутові прилади різноманітного призначення: електронагрівальні прилади, холодильники й морозильні камери, кондиціонери, пральні машини, радіоприлади, дрібні побутові прилади тощо. Розвиток технологій сприяє розширенню номенклатури й кількості великої та дрібної побутової техніки. Електроводонагрівачі, посудомийні машини, кухонні комбайни, хлібопічки, соковарки, печі НВЧ набувають усе більшого поширення в групі електроприймачів квартир. Вони забезпечують зменшення витрат часу й праці на ведення домашнього господарства і поліпшують комфорт сучасного житла.

Характер і обсяги електроспоживання кожної квартири визначаються кількістю й різноманіттям наявних побутових електричних приладів. Найенергоємніші електроспоживачі – це кухонні електричні плити, холодильники й морозильні камери, бойлери, кондиціонери та спліт-системи.

**Електричне освітлення** квартир забезпечують за допомогою світильників загального й місцевого освітлення. Застосовують лампи розжарювання, світильники з люмінесцентними лампами. Усе більшого по-

ширення набувають енергозберігаючі лампи, перевагою яких є менше споживання електричної енергії і більший термін роботи.

Для загального освітлення житлових кімнат застосовують однолампові або багатолампові світильники різного конструктивного виконання з лампами розжарювання потужністю 60–150 Вт, з енергозберігаючими лампами потужністю 10–30 Вт, зі світлодіодними лампами потужністю 5–10 Вт.

Останнім часом поширені енергозберігаючі лампи потужністю 5–30 Вт, споживання електричної енергії яких у середньому у 5 разів менше порівняно з лампами розжарювання при забезпеченні аналогічного рівня освітленості.

Коефіцієнт потужності ламп розжарювання  $\cos\phi$  дорівнює 1, люмінесцентних ламп без компенсаційних конденсаторів – 0,5–0,6.

Для місцевого освітлення застосовують однолампові світильники з лампами розжарювання 25–60 Вт, люмінесцентними лампами потужністю 10–20 Вт, зі світлодіодними лампами потужністю 5–7 Вт.

На етикеті упакування лампи також зазначають такі дані:

- категорія ефективності використання енергії від А до G;
- світловий потік лампи в люменах;
- електроспоживання лампи у ватах;
- термін служби в годинах.

За енергоефективністю лампи поділяються на такі класи:

- люмінесцентні й енергозберігаючі лампи – класи А і В;
- галогенні лампи – класи С і D;
- лампи розжарювання – класи Е і F.

**Побутові електричні прилади.** Зі зростанням добробуту населення і збільшенням виробництва електроенергії значно зріс попит на побутові електричні прилади, що полегшують домашню працю й скорочують витрати часу на домашню роботу. Промисловість випускає багато побутової електричної апаратури, використання якої постійно зростає. Побутова техніка безупинно вдосконалюється й ускладнюється, конструкції модифікуються, випускаються нові пристрої, у нових розробках усе ширше використовується нова елементна база.

Побутові електричні прилади умовно можна поділити на такі групи: нагрівальні для приготування їжі, для оброблення й зберігання продуктів, господарські (для догляду за білизною та одягом, прибирання приміщень, електричний інструмент тощо); культурно-побутові, санітарно-гігієнічні (побутові кондиціонери повітря, водонагрівачі, прилади для опалення приміщення).

За типом захисту від ураження електричним струмом електропобутову техніку поділяють на п'ять класів: 0, 01, 1, 2 і 3. До класу 0 відносять вироби, у яких захист здійснюється основною ізоляцією; клас 01 – вироби, що мають основну ізоляцію і обладнані захисним затискачем для заземлення; до класу 1 – вироби, що мають основну ізоляцію й додатково приєднуються до жили заземлюючого шнура, або мають заземлюючий контакт



вилки; до класу 2 – вироби, що мають подвійну ізоляцію (основну й додаткову) або посилену ізоляцію; клас 3 – вироби, у яких захист від ураження електричним струмом забезпечується шляхом їх живлення від безпечної напруги, що не перевищує 42 В.

У таблиці 14.2 наведені орієнтовні середньостатистичні показники побутової техніки.

Таблиця 14.2 – Технічні показники побутової техніки

Вид техніки	Рн, кВт	Тривалість пускового струму, с	Кратність пускового струму
Холодильники	0,250–0,350	4	3
Пральні машини	2,5	1–3	3–5
Кондиціонери	2,5–3,0	1–3	3–5
Мікрохвильові печі	1,6	–	2
Пилососи	1,5	2	1,2–1,5
Кухонні комбайни	1,5–2,0	2–4	7
Посудомийні машини	2,2	1–3	3
Бойлер	6	–	–
Лампи розжарення	60–150	0,15–0,2	5–13

**Електричне опалення.** У сучасних житлових будинках усе більшого поширення набуває застосування електричного опалення на об'єктах цивільного призначення додатково до основної системи опалення (наприклад водяної), приладів та систем електричного опалення для додаткового нагрівання повітря в окремих приміщеннях будинку чи квартири (наприклад, системи «тепла підлога»).

Для електричного опалення квартир використовують електричні печі, калорифери, конвектори, а також устаткування, яке монтується в стінах, підлогах і стелях: електрошпалери, електроплінтуси, електронагрівальні панелі та кабелі. Питома потужність під час електричного обігрівання підлоги електричними кабелями становить 120–150 Вт/м<sup>2</sup>, при цьому 1 м довжини кабелю повинен мати потужність не більше ніж 20–25 Вт, щоб температура підлоги (з гігієнічних міркувань) не перевищувала 25–27 °С.

До теплових приладів відносять також теплові насоси та кондиціонери, призначені для забору тепла з більш нагрітого середовища і передачі його менш нагрітому. Унаслідок забору тепла із зовнішнього середовища кількість тепла, що віддається, у 2–4 рази перебільшує кількість енергії, яка витрачається на роботу теплового насоса. Працюють ці пристрої або за типом компресійного холодильника, або використовують ефект Пельтьє у напівпровідниках. Установлена потужність теплових насосів і кондиціонерів – 0,3–5 кВт.

Електроприймачі електричного нагрівання було розглянуто в розділах 7.1 та 13.1.

**Електронагрівальні прилади.** До цієї групи належать пересувні (електрочайники, кип'ятильники, електрокаміни, пилососи тощо) та ста-

ціонарні (кухонні плити, водонагрівачі, електроопалювальні печі тощо) прилади. Потужність пересувних приладів – 0,5–1,5 кВт, включаються вони у звичайні розетки, розраховані на струм до 6–10 А. Потужність стаціонарних приладів – від 3 до 25 кВт, включаються вони в електромережу за допомогою спеціальних розеток більшої потужності (16 або 25 А) з третім (заземлюючим) контактом. Коефіцієнт потужності електронагрівальних приладів –  $\cos\varphi = 1$ .

Асортимент електронагрівальних приладів за призначенням поділяють на такі групи: прилади для нагрівання води, опалення приміщень, просування, для розігрівання й приготування їжі, електричний інструмент тощо.

Електричне нагрівання має ряд переваг порівняно з іншими видами нагрівання: високий ККД (до 95 %), відсутність шкідливих виділень, можливість автоматизації регулювання потужності й температури. Перетворення електричної енергії на теплову в побутових приладах здійснюється провідниками високого опору, інфрачервоним, індукційним та високочастотним нагріванням.

**Прилади для розігрівання і приготування їжі** можна поділити на такі підгрупи.

**Прилади загального призначення** – стаціонарні електроплити й переносні електроплитки. Робочою частиною цих приладів є конфорки (чавунні, з ТЕНів тощо.)

*Стаціонарні електроплити* мають 4–5 конфорок потужністю від 1 000 до 2 000 Вт з трьох або п'ятиступеневим регулюванням потужності.

*Переносні електроплитки* випускають з однією і двома конфорками діаметром 145 і 180 мм, потужністю від 800 до 1 200 Вт (експрес-конфорки – 1 500 і 2 000 Вт). Плитки мають триступеневе регулювання нагрівання.

**Прилади для підігрівання й підтримки температури їжі** – марміти, підігрівачі дитячого харчування, термостати.

*Марміти* – металеві або керамічні підставки, обладнані електричним нагрівачем, що нагріває робочу поверхню до 100 °С.

*Підігрівачі дитячого харчування* становлять ємності з теплоізоляцією або подвійними стінками, між якими розміщується нагрівальний елемент невеликої потужності.

*Термостати* – шафи з тепловою ізоляцією, у яких за допомогою терморегулятора шляхом вмикання/вимикання нагрівального елемента підтримується стабільна температура близько 70 °С. Термостати також використовуються як пристрої керування в системах опалення, як компоненти радіаторів та кондиціонерів.

**Побутові електрохолодильники** – пристрої, призначені для зберігання різних продуктів за рахунок підтримання низької температури в теплоізольованій камері. Робота холодильника базується на використанні теплового насоса, який переносить тепло з камери холодильника назовні, де воно розсіюється в зовнішнє середовище.

За принципом дії існує чотири типи електричних холодильників: компресійні, абсорбційні, термоелектричні, з вихровими охолоджувачами.

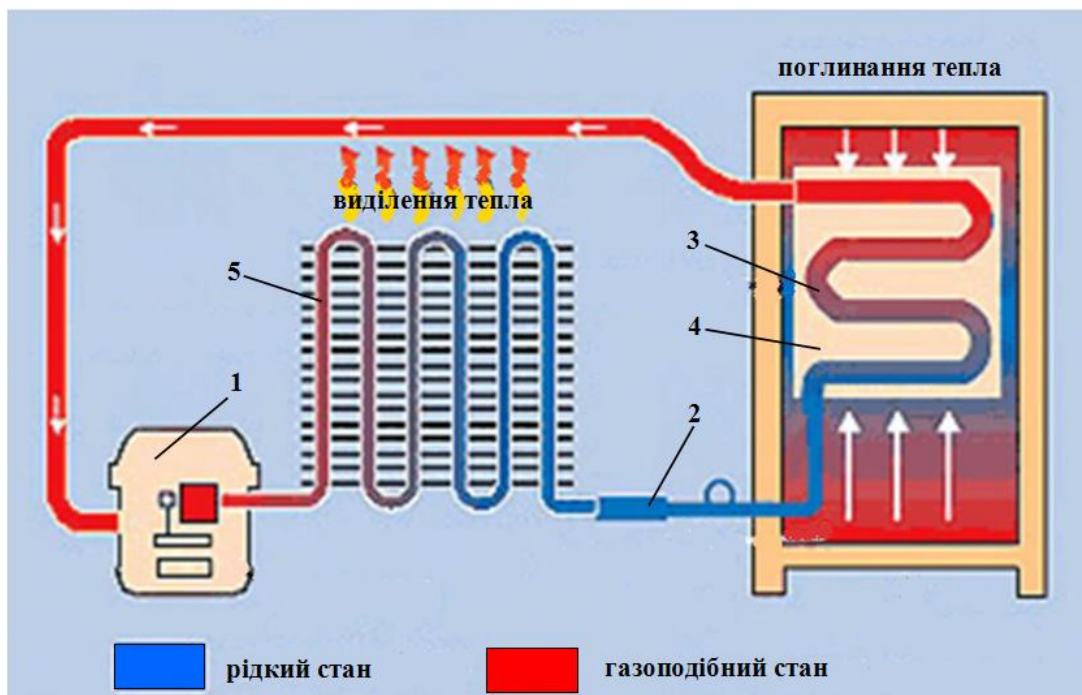


Рисунок 14.1 – Принцип роботи холодильника

Принцип дії холодильника ґрунтується на теплообміні між холодильною камерою і навколишнім середовищем. Теплообмін забезпечується циркуляцією спеціального газу – холодоагенту (зазвичай фреону) по замкненому контуру (рис. 14.1) під дією двигуна-компресора 1. У процесі циркуляції холодоагент періодично нагрівається та охолоджується. Компресор створює в газовому середовищі досить високий тиск, під дією якого холодоагент перетворюється на рідину. Потім ця рідина починає просочуватися через капіляр 2 усередину випарника 3, що міститься в холодильній камері 4. Рідина починає дуже швидко розширюватися, внаслідок перехідних процесів із одного агрегатного стану в інший. Газ, що випаровується, створює в холодильній камері 4 сильний охолоджувальний ефект, забираючи тепло у випарника 3. Потім газ направляється спочатку в компресор 1, а потім у конденсатор 5, який змонтований на задній стінці холодильника й зовні нагадує радіатор. У конденсаторі розігрітий газ віддає в навколишнє середовище тепло, отримане з випарника, і тепло, що утвориться під час стискування газу компресором. Цей процес повторюється знову й знову, доки не буде досягнуто необхідної температури всередині холодильної камери. Капіляр 2, через який зріджений газ просочується у випарник, змінює свою пропускну здатність залежно від співвідношення тисків у випарнику й конденсаторі, що забезпечує створення необхідного процесу теплообміну. Температура всередині холодильника відслідковується електричним або механічним термостатом, що запускає й зупиняє компресор при коливанні температури.

Розглянемо роботу електричної схеми холодильника (рис. 14.2). З мережної вилки  $X$  через контакти 3, 4 термореле напруга мережі подається на схему компресора холодильника, що складається з пускозахисного реле  $K$ , через контакти якого напруга подається на мотор-компресор  $M$ . Пускозахисний блок включає також теплове реле  $KT$ , що відключає пускову обмотку двигуна після його запуску. Після охолодження до заданої температури контакти 3-4 терморегулятора розмикаються й компресор холодильника зупиняється.

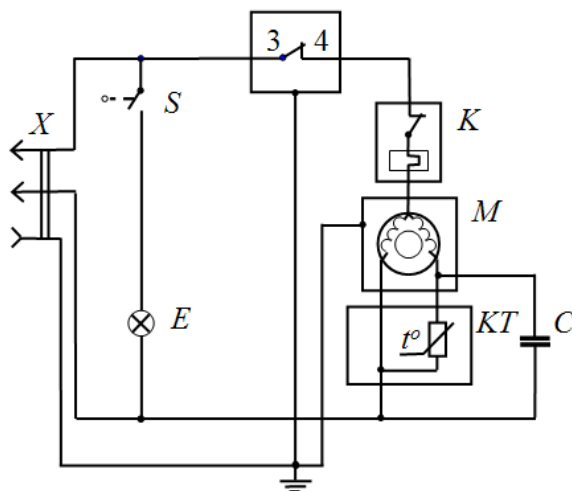


Рисунок 14.2 – Схема холодильника

Через деякий час температура в холодильнику підвищується, контакти терморегулятора замикаються, і за допомогою захисного пускового реле запускається двигун компресора, і далі весь цикл повторюється.

Основними технічними характеристиками сучасних моделей холодильників є: кількість компресорів; номінальна споживана потужність; добове споживання електроенергії, кВт·г/доба; річне споживання електроенергії, кВт·г/рік.

Згідно з нормативами Європейського Союзу на холодильниках розміщують наліпку енергоефективності (рис. 14.3), яка містить наступні дані про холодильник:

- торговельна марка і позначення моделі;
- клас енергоспоживання (табл. 14.3);
- річне споживання електроенергії в кВт·г/рік;
- внутрішній об'єм холодильної камери в літрах;
- внутрішній об'єм морозильної камери в літрах;
- рівень шуму в дБ.

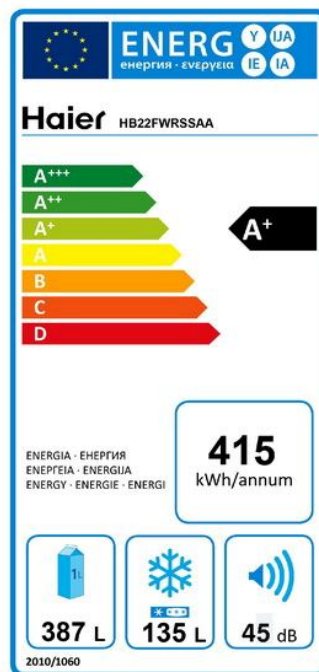


Рисунок 14.3 – Наліпка холодильника

У таблиці 14.3 подано індекси енергетичної ефективності (EEI – Energy Efficiency Index) холодильників, що обчислюється за фактичною величиною споживання електроенергії даною моделлю, виміряною з урахуванням таких параметрів холодильника, як кількість відділень і їх об'єм,

температура у відділенні, наявність системи Frost Free, кліматичний клас, кількість «зірочок» для низькотемпературних відділень, а також який це холодильник – убудований чи вільно стоячий.

Таблиця 14.3 – Показники енергоефективності холодильників

A+++	A++	A+	A	B	C	D	E	F	G
EEl < 22	22 ≤ EEl < 33	33 ≤ EEl < 42	42 ≤ EEl < 55	55 ≤ EEl < 75	75 ≤ EEl < 95	95 ≤ EEl < 110	110 ≤ EEl < 125	125 ≤ EEl < 150	EEl ≥ 150

У квартирах використовують холодильники й морозильні камери компресійного типу з потужністю двигун-компресорного агрегату 160 Вт і добовою витратою електроенергії 0,8–1,2 кВт·год (залежно від об'єму холодильної камери) та адсорбційні холодильники з нагрівальними елементами потужністю 40–125 Вт і добовою витратою електроенергії 1,2–3,1 кВт·год (залежно від об'єму холодильної камери), коефіцієнт потужності –  $\cos\varphi = 0,8$ .

Адсорбційні холодильники менш економічні за витратою електроенергії, але вони працюють безшумно, що є їх перевагою порівняно з компресійними, коефіцієнт потужності –  $\cos\varphi = 1$ .

**Пральні машини.** Використовуються машини різних типів. Сучасні пральні машини працюють у програмованому режимі автоматично й мають центрифуги для віджимання білизни та пристрої для підігрівання води. Установлена потужність пральних машин 0,4–4 кВт, коефіцієнт потужності –  $\cos\varphi \approx 0,6$ .

**Радіоприлади.** До цієї групи належать телевізори, радіоприймачі, магнітофони, персональні ЕОМ та інше обладнання, що базується на використанні напівпровідникових приладів. Потужність радіоприладів зазвичай невелика – десятки – сотні ват.

Характерною особливістю телевізорів є одночасність їхнього вмикання в часи вечірнього максимуму, що створює високе навантаження в системі електропостачання.

**Дрібні побутові прилади.** Це група найрізноманітніших приладів: електричні м'ясорубки, соковижималки, кавомолки, кавоварки, міксери, вентилятори, іонізатори тощо. Їхня потужність становить 30–250 Вт,  $\cos\varphi = 0,2$ – $0,6$ . Умикаються порівняно рідко й на короткий час.

## 14.2 Загальнобудинкові електроприймачі

До цієї групи електроприймачів належать:

– освітлення (коридорів, сходів, технічних приміщень, горищ, входів до будинків, зовнішнє);

– силові електроприймачі (електродвигуни ліфтів та сантехнічних установок).

**Освітлення.** Система електричного освітлення житлових будинків включає освітлення квартир і освітлення загальнобудинкових приміщень (сходи, поверхові майданчики, ліфтові холи, входи під'їздів, горища, технічні підпілля, шахти ліфтів, підсобні приміщення тощо).

Освітлювальне устаткування загальнобудинкових приміщень – це світильники різних типів залежно від призначення приміщення. У приміщеннях щитів, насосних, сміттєзбирання, у підвалах зі струмопровідною підлогою застосовують світильники, конструкція яких унеможливорює доступ до лампи без спеціального обладнання.

Характерною особливістю загальнобудинкових освітлювальних пристроїв є робота в нічні часи при збільшеній напрузі, що призводить до швидкого перегорання звичайних ламп. У зв'язку з цим для таких пристроїв випускаються лампи розжарювання на підвищену напругу (237, 248 В). Термін використання таких ламп значно зростає, але для освітлення квартир ці лампи не використовують, тому що при нормальній напрузі 220 В світловіддача таких ламп дуже низька, що призводить до перевитрати електроенергії. Для подовження роботи ламп розжарювання загальнобудинкових освітлювальних пристроїв зазвичай при напрузі 220 В використовують по дві лампи на 127 В, з'єднані послідовно. Застосовують також послідовно з'єднані дві лампи на 220 В різної потужності; більш потужна з яких слугує баластним опором для меншої. Здебільшого послідовно з лампами вмикають діод, який забезпечує струм тільки одного з напівперіодів напруги. У цьому випадку лампа дає «мерехтливий» світловий потік, але термін її використання подовжується.

Люмінесцентні світильники менш чутливі до підвищення напруги, але їх використання в загальнобудинкових освітлювальних пристроях затримується через високу вартість та неможливість запалювати при низьких температурах.

З метою економії ЕЕ передбачають автоматичне керування світильниками загальнобудинкового призначення.

**Силові електроприймачі.** До цієї групи належать пасажирські й вантажопасажирські ліфти та різні санітарно-технічні пристрої. У житлових будинках встановлюють два типи пасажирських ліфтів – вантажопідйомністю 350 кг та 500 кг. Перші обладнані електродвигунами потужністю 4–4,5 кВт, другі – 7–7,5 кВт. Зазвичай двигуни двошвидкісні. Крім того, ліфтова установка має гальмівний електромагніт і трансформатор для живлення системи керування. Шахти ліфтів освітлюються лампами розжарювання, вимикати які забороняється правилами техніки безпеки незалежно від того, працює ліфтова установка чи ні. Щоб лампи не перегорали при збільшеній напрузі в нічні часи, послідовно з ними включають діоди.

Основними електроприймачами сантехнічних пристроїв є асинхронні короткозамкнені електродвигуни потужністю 0,6–10 кВт. Вони використовуються в електроприводі систем господарського та протипожежного во-

допостачання, подавання повітря, видалення диму. Крім того, встановлюються допоміжні електроприводи з двигунами або електромагнітами для відкривання шиберів, димових ґраток, вентилів. Усі сантехнічні пристрої обладнують системами автоматичного або дистанційного керування.

Більш детально силові електроприймачі будинків було розглянуто в розділі 13.

## **Висновки**

У житлових будинках наявні дві характерні групи електроприймачів – електроустаткування квартир та електроустаткування загальнобудинкового призначення (освітлення й електродвигуни сантехобладнання).

Загальнобудинкове освітлення створює постійне електричне навантаження, яке працює переважно в темний період доби.

Електричне навантаження від силового загальнобудинкового устаткування здебільшого створюється АД електричного приводу ліфтів та господарських насосів.

## **Запитання для самоконтролю**

1. Надайте загальну характеристику електроприймачам житлових будинків.

2. Як класифікують енергоефективність побутової техніки?

3. Яке електроосвітлювальне обладнання використовують у квартирах?

4. На які класи поділяють електропобутову техніку за типом захисту від ураження електричним струмом?

5. Охарактеризуйте технічні показники побутової техніки.

6. Охарактеризуйте побутові електронагрівальні прилади.

7. Поясніть принцип роботи холодильника.

8. Які позначення наносять на наліпку енергоефективності холодильників?

9. Поясніть електричну схему холодильника.

10. Охарактеризуйте силові електроприймачі загальнобудинкового призначення.

## **Список рекомендованих джерел**

Основні джерела: [48, С. 302–322], [45, С. 213–224], [3, С. 171–181].

Додаткові джерела: [32, С. 5–15], [20], [21].

## ПІСЛЯМОВА

Споживачі електричної енергії – важлива й невід’ємна частина системи електропостачання. Розглянуті в підручнику питання взаємодії електроспоживачів і системи електропостачання, а саме впливу показників якості електричної енергії, нормативне забезпечення яких є завданням системи електропостачання, на продуктивність і ефективність роботи електроспоживачів у межах реалізації процесів перетворення електричної енергії на інші види енергії, з одного боку, і впливу електроспоживачів на режим роботи системи електропостачання й показники якості електричної енергії, з іншого боку, дають змогу забезпечити вирішення завдань проектування нових систем електроспоживання, аналіз існуючих систем і пошук шляхів забезпечення їхньої енергоефективності.

Розглянутий матеріал стане в нагоді під час вивчення дисциплін «Електромагнітна сумісність в системах електропостачання», «Проектування систем електропостачання», «Електропостачання міст та промислових підприємств», у межах розв’язання задач дипломного проектування.

Розглянуті в підручнику групи електроспоживачів не охоплюють усього різноманіття електроспоживачів міст і промислових підприємств. Обмежений обсяг дисципліни «Споживачі електричної енергії» унеможливує розгляд багатьох груп електроспоживачів, зокрема перспективну з погляду регулювання графіків електричного навантаження групу споживачів-регуляторів, дослідження яких ведеться в останні роки [30, 31, 33, 38, 41], зокрема на кафедрі систем електропостачання та електроспоживання міст ХНУМГ ім. О. М. Бекетова [51].

Важливим напрямом розвитку галузі є дослідження можливості симетрування електричного навантаження трифазних розподільних мереж [5, 17, 47]. Надалі ці та інші питання підвищення ефективності роботи систем електропостачання та систем електроспоживання можуть бути розглянуті під час виконання випускних магістерських робіт.

Насамкінець варто зазначити доцільність використання методології системного аналізу, яка стала ефективним інструментарієм виконання науково-дослідних і проектно-конструкторських робіт.



## СПИСОК ДЖЕРЕЛ

### 1. Основна література

1. **Баркан Я. Д.** Эксплуатация электрических систем : учеб. пособие / Я. Д. Баркан. – Москва : Высш. шк., 1990. – 304 с.
2. **Бурбело М. Й.** Умови симетрування електричних навантажень розподільних мереж за допомогою СТАТКОМ [Електронний ресурс] / М. Й. Бурбело, Ю. П. Войтюк, Ю. В. Лобода // Вісник Вінницького політехнічного інституту. – 2016. – № 2. – С. 139–143. – Режим доступу : [http://nbuv.gov.ua/UJRN/vvpi\\_2016\\_2\\_26](http://nbuv.gov.ua/UJRN/vvpi_2016_2_26). – (дата звернення: 12.03.2019).
3. **Василега П. О.** Електропостачання : навч. посібник / П. О. Василега. – Суми : ВДТ «Університетська книга», 2008. – 415 с.
4. **Вольдек А. И.** Электрические машины. Машины переменного тока : учебник для вузов / А. И. Вольдек, В. В. Попов. – Санкт-Петербург : Питер, 2010. – 350 с.
5. **Гаряжа В. М.** Симетрування навантаження в розподільних мережах / В. М. Гаряжа, В. О. Грініна, Є. О. Грінін [Електронний ресурс] // Новітні технології в електроенергетиці: матер. Міжнар. наук.-практ. інтернет-конф. 21–22 травня 2015 р. – Харків, ХНУМГ ім. О. М. Бекетова. – Режим доступу: <http://eprints.kname.edu.ua/40576/1/84-86.pdf>. – (дата звернення: 12.03.2019).
6. **ГОСТ 183-74.** Машины электрические вращающиеся. Общие технические условия. – Москва : Изд-во стандартов, 2001. – 26 с.
7. **ГОСТ 6962-75.** Транспорт электрифицированный с питанием от контактной сети. Ряд напряжений. – Москва : Госстандарт, 1976. – 8 с.
8. **ГОСТ 721-77.** Системы электроснабжения, сети, источники, преобразователи и приемники электрической энергии. Номинальные напряжения свыше 1000 В. – Москва : Изд-во стандартов, 2002. – 6 с.
9. **ГОСТ 19108-81.** Электронагреватели трубчатые (ТЭН) для бытовых нагревательных приборов. – Москва : Госстандарт, 1990. – 21 с.
10. **ГОСТ 17677-82.** Светильники. Общие технические условия. – Москва : Изд-во стандартов, 2002. – 71 с.
11. **ГОСТ 25546-82.** Краны грузоподъемные. Режимы работы. – Москва : Госстандарт, 1997. – 8 с.
12. **ГОСТ 21128-83.** Системы электроснабжения, сети, источники, преобразователи и приемники электрической энергии. Номинальные напряжения до 1000 В. – Москва : Изд-во стандартов, 1994. – 4 с.
13. **ГОСТ 13268-88.** Электронагреватели трубчатые. – Москва : Госстандарт, 1989. – 14 с.
14. **ГОСТ 23875-88.** Качество электрической энергии. Термины и определения. – Москва : Издательство стандартов, 1988. – 14 с.
15. **ГОСТ 28108-89 (МЭК 61-1-69).** Цоколи для источников света. – Москва : Стандартиформ, 2007. – 108 с.
16. **ГОСТ Р 55704-2013.** Источники света электрические. – Москва : Стандартиформ, 2014. – 16 с.

17. **Гриб О. Г.** Контроль и регулирование несимметричных режимов в системах электроснабжения : учеб. пособие / **О. Г. Гриб.** – Харьков : ХНАГХ, 2004. – 180 с. – Режим доступа: <http://eprints.kname.edu.ua/10929/>. – (дата обращения: 12.03.2019).
18. **Далека В. Х.** Електропостачання електричного транспорту : навч. посібник / В. Х. Далека, В. К. Нем, В. І. Скурихін ; Харків. нац. акад. міськ-го госп-ва. – Харків : ХНАМГ, 2012. – 168 с. – Режим доступа: <http://eprints.kname.edu.ua/26720/>. – (дата звернення: 12.03.2019).
19. **ДБН В.2.3-18:2007.** Трамвайні та тролейбусні лінії. Загальні вимоги до проектування. – Київ : Мінрегіонбуд України, 2008. – 58 с.
20. **ДБН В.2.2-24:2009.** Проектування висотних житлових і громадських будинків. – Київ : Мінрегіонбуд України, 2009. – 105 с.
21. **ДБН В.2.5-23:2010.** Проектування електрообладнання об'єктів цивільного призначення. – Київ : Мінрегіонбуд України, 2010. – 165 с.
22. **ДБН В.2.5-28:2018.** Природне і штучне освітлення. – Київ : Мінрегіон України, 2018. – 137 с.
23. **ДСТУ 2267-93.** Вироби електротехнічні. Терміни та призначення. – Київ : Держстандарт України, 1993. – 47 с.
24. **ДСТУ 2456-94.** Зварювання дугове і електрошлакове. – Київ : Держстандарт України, 1994. – 41 с.
25. **ДСТУ 3465-96.** Системи електропостачальні загального призначення. Терміни та визначення. – Київ : Держстандарт України, 1997. – 19 с.
26. **ДСТУ EN 50160 : 2014.** Характеристики напруги електропостачання в електричних мережах загальної призначеності. – Київ : Мінекономрозвитку України, 2014. – 32 с.
27. **Електропостачання у будівництві:** навч. посібник / [А. Є. Ачкасов, В. А. Лушкін, В. М. Охріменко та ін.] ; за ред. В. М. Охріменка; Харк. нац. акад. міськ. госп-ва. – Харків : ХНАМГ, 2012. – 159 с.
28. **Електротехніка у будівництві :** підручник / [А. Є. Ачкасов, В. А. Лушкін, В. М. Охріменко, Т. Б. Воронкова] ; за ред. В. М. Охріменка ; Харків. нац. ун-т міськ. госп-ва ім. О. М. Бекетова. – 2-ге вид., випр. і доп. – Харків : ХНУМГ ім. О. М. Бекетова, 2015. – 447 с.
29. **Калентионок Е. В.** Оперативное управление в электроэнергетике : учеб. пособие / Е. В. Калентионок, В. Г. Прокопенко, В. Т. Федина ; под общ. ред. В. Т. Фебина. – Минск : Вышш. шк., 2007. – 352 с.
30. **Кацадзе Т. Л.** Регулювання споживання електричної енергії установками з акумулюванням тепла [Електронний ресурс] / Т. Л. Кацадзе, П. С. Бахмачук. – Сучасні проблеми електроенергетики та автоматики. – 2017. – С. 188–191 : Режим доступа: <http://jour.fea.kpi.ua/article/download/130317/125965>. – (дата звернення: 12.03.2019).
31. **Керування графіка навантаження** в електричних мережах споживачами-регуляторами [Електронний ресурс] / [С. В. Бахмачук, Ю. С. Громадський, С. М. Савицький, Д. А. Гапон] // ScienceRise. – 2016. – № 2/2 (19). – С. 55– 57. – Режим доступа <http://journals.uran.ua/eejet/article/view/16444/13926>. – (дата звернення: 12.03.2019).

32. **Киреева Э. А.** Электроснабжение жилых и общественных зданий / Э. А. Киреева, С. А. Цыпук. – Москва : НТФ «Энергопрогресс», «Энергетик», 2005. – 96 с.
33. **Коменда Т. І.** Споживачі-регулятори як основний технічний засіб оптимізації графіка електричного навантаження / Т. І. Коменда // Проблеми загальної енергетики. – 2003. – № 8. – С. 58–62.
34. **Литвиненко А. С.** Світлові прилади : навч. посібник [Електронний ресурс] / А. С. Литвиненко, О. Л. Черкашина. – Харків : ХНУМГ ім. О. М. Бекетова, 2015. – 125 с.. – Режим доступу: <http://eprints.kname.edu.ua/40865/>. – (дата звернення: 12.03.2019).
35. **Лотоцький К. В.** Електричні машини і основи електропривода : навч. посібник / **К. В. Лотоцький.** – Київ : Вища школа, 1970. – 475 с.
36. **Мотренко А. И.** Автоматика в жилищном хозяйстве / А. И. Мотренко, Ю. Г. Каплан. – Киев : Будивельник, 1977. – 168 с.
37. **Назаренко Л. А.** Штучне зовнішнє освітлення : навч. посібник / Л. А. Назаренко, К. І. Іоффе ; Харків. нац. ун-т міськ. госп-ва ім. О. М. Бекетова. – Харків : ХНУМГ ім. О. М. Бекетова, 2017. – 88 с. – Режим доступу: <http://eprints.kname.edu.ua/45144/>. – (дата звернення: 12.03.2019).
38. **Обґрунтування** впровадження споживача-регулятора для керування електричним навантаженням в системі електропостачання [Електронний ресурс] / С. В. Тихоненко, Ю. С. Громадський, С. М. Савицький, Д. А. Гапон // Технологический аудит и резервы производства. – 2016. – № 2(1). – С. 22–26. – Режим доступу: [http://nbuv.gov.ua/UJRN/Tatrv\\_2016\\_2\(1\)\\_\\_6](http://nbuv.gov.ua/UJRN/Tatrv_2016_2(1)__6). – (дата звернення: 12.03.2019).
39. **Основы** теории цепей : учебник для вузов / [Г. В. Зевеке, П. А. Ионкин, А. В. Нетушил, С. В. Страхов]. – Москва : Энергия, 1975. – 752 с.
40. **Охріменко В. М.** Конспект лекцій з дисципліни «Автоматизовані системи диспетчерського управління» [Електронний ресурс] / В. М. Охріменко : Харків. нац. ун-т міськ. госп-ва ім. О. М. Бекетова, 2015. – 138 с. – Режим доступу: <http://eprints.kname.edu.ua/38927>. – (дата звернення: 12.03.2019).
41. **Петрова К. Г.** Управління добовими графіками електричного навантаження промислових споживачів техніко-технологічними методами / К. Г. Петрова, С. В. Серебренніков // Техніка в сільськогосподарському виробництві, галузеве машинобудування, автоматизація : зб-к наук. праць Кіровоградського національного технічного університету. – Кіровоград : вид-во КНТУ, 2012. – Вип. 25(1). – С. 294–302.
42. **Правила улаштування електроустановок.** – 5 вид., переробл. й доповн. – Харків : Видавництво «Форт», 2014. – 800 с.
43. **Салтиков В. О.** Освітлення міст : навч. посібник. – Харків, ХНАМГ, 2009. – 221 с. – Режим доступу: <http://eprints.kname.edu.ua/10791>. – (дата звернення: 12.03.2019).
44. **Справочник** по проектированию электроснабжения / Под ред. Ю. Г. Барыбина и др. – Москва : Энергоатомиздат. – 576 с.

45. **Тарнижевский В. М.** Электрооборудование предприятий жилищно-коммунального хозяйства : справочник / В. М. Тарнижевский, Е. И. Афанасьева. – Москва : Стройиздат, 1987. – 368 с.
46. **Теорія систем і системний аналіз** : навч. посібник / [А. Є. Ачкасов, В. А. Лушкін, В. М. Охріменко, Т. Б. Воронкова ]; Харк. нац. ун-т міськ. госп-ва ім. О. М. Бектова. – Харків : ХНУМГ, 2014. – 167 с.
47. **Терешкевич Л. Б.** Симетрування електричного режиму шляхом зсуву в часі графіків навантаження електроприймачів однофазного навантаження / Л. Б. Терешкевич, О. О. Хоменко // Вісник приазовського державного технічного університету. Серія «Технічні науки». – 2017. – Вип. 34. – С. 132–139.
48. **Тульчин И. К.** Электрические сети и электрооборудование жилых и общественных зданий / И. К. Тульчин, Г. И. Нудлер. – Москва : Энергоатомиздат, 1990. – 480 с.
49. **Ус А. Г.** Электроснабжение предприятий и гражданских зданий : учеб. пособие / А. Г. Ус, Л. И. Евминов. – Минск : НПООО «ПИОН», 2002. – 450 с.
50. **Хмара Л. А.** Будівельні крани. Конструкції та експлуатація / Л. А. Хмара, М. П. Колісник, О. І. Голученко. – Київ : Техніка, 2001. – 296 с.
51. **Щербак І. Є.** Дослідження можливостей керування споживачами-регуляторами в залежності від навантажувальної здатності трансформаторів / І. Є. Щербак // Енергетика та комп'ютерно-інтегровані технології в АПК. – 2015. – № 1. – С. 30–32.
52. **Электроснабжение метрополитенов.** Устройство, эксплуатация и проектирование / [А. М. Колузаев, Л. С. Едигарян, Д. Г. Ермолов и др.] ; под. ред. Е. И. Быкова. – Москва : Транспорт, 1977. – 431 с.
53. **Электротехнический справочник** : в 3 т. Т. 2. Электротехнические устройства / Под общ. ред. профессоров МЭИ : И. Н. Орлова (гл. ред.) и др. – Москва : Энергоатомиздат, 1981. – 640 с.
54. **Электротехнический справочник** : в 3 т. Т. 3 в 2 кн. Кн. 2. Использование электрической энергии / Под общ. ред. профессоров МЭИ : И. Н. Орлова (гл. ред.) и др. – Москва : Энергоатомиздат, 1988. – 661 с.
55. **Ястребов П. П., Смирнов И. П.** Электрооборудование и электротехнология : учеб. пособие / П. П. Ястребов, И. П. Смирнов. – Москва : Высш. школа, 1987. – 199 с.

## 2. Интернет-ресурси

56. **Бытовые электротехнические товары.** Товары культурно-бытового назначения : конспект лекций [Электронный ресурс] / Г. Г. Левкин. – Москва-Берлин : Директ-Медиа, 2016. – 212 с. – Режим доступа: <https://books.google.com.ua/books?isbn=5447578787>. – (дата обращения: 12.03.2019).
57. **Вікіпедія** [Електронний ресурс]. – Режим доступу: [https://uk.wikipedia.org/wiki/Лампа\\_розжарення](https://uk.wikipedia.org/wiki/Лампа_розжарення). – (дата звернення: 12.03.2019).

58. **Е02 ГОСТ 13109-97.** Электрическая энергия. Совместимость технических средств электромагнитная. Нормы качества электрической энергии в системах электроснабжения общего назначения. [Электронный ресурс]. – 2002.– Режим доступа: [http://odz.gov.ua/lean\\_pro/standardization/files/elektromagnitnaja\\_sovmestimost\\_2014\\_03\\_11\\_1.pdf](http://odz.gov.ua/lean_pro/standardization/files/elektromagnitnaja_sovmestimost_2014_03_11_1.pdf).
59. **Сравнительные показатели дуговых сталеплавильных печей** постоянного и переменного тока для литейных производств [Электронный ресурс] / К. А. Елизаров и др. – *Электрометаллургия*, 2011, № 1. – С. 9–15. – Режим доступа: [http://www.comterm.ru/about\\_us\\_ru/press\\_ru/index.php?ELEMENT\\_ID=2301](http://www.comterm.ru/about_us_ru/press_ru/index.php?ELEMENT_ID=2301). – (дата обращения: 12.03.2019).
60. **Постанова НКРЕ № 1234 від 29.10.2009** . Про затвердження Критеріїв визначення класів споживачів електричної енергії, диференційованих за ступенями напруги [Електронний ресурс]. – Режим доступа: <http://zakon3.rada.gov.ua/laws/show/z1126-09>. – (дата звернення: 12.03.2019).
61. **Постанова НКРЕКП № 437 від 03.03.2017** . Про внесення змін до постанови Національної комісії, що здійснює державне регулювання у сфері енергетики, від 04 жовтня 2012 року № 1257 [Електронний ресурс]. – Режим доступа: <http://www.nerc.gov.ua/?id=24482>. – (дата звернення: 12.03.2019).
62. **Про енергетику** : Закон України від 16.10.1997 р. № 575/97-ВР// Відомості Верховної ради України, 1998. – № 1 [Електронний ресурс]. – Режим доступа: <http://zakon2.rada.gov.ua/laws/show/575/97-вр>. – (дата звернення: 12.03.2019).
63. **Сайт «Большая Советская Энциклопедия»** [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <http://bse.sci-lib.com/particle008911.html>. – (дата обращения: 12.03.2019).
64. **Сайт компанії «Вентиляторний завод «Укрвентсистеми»»** [Електронний ресурс]. – Режим доступа: <http://ukrvent.com/>. – (дата звернення: 12.03.2019).
65. **Сайт компанії «Невский»** [Електронний ресурс]. – Режим доступа: <https://nvs.katatalog/vodosnabzhenie/vodonagrevateli/vodonagrevatel-1000-litrov-tip-gorizontalnyy/>. – (дата звернення: 12.03.2019).
66. **Сайт компанії «ЕлектроТехИнфо»** [Електронний ресурс]. – Режим доступа: [http://www.eti.su/articles/elektricheskie-mashini/elektricheskie-mashini\\_1457.html](http://www.eti.su/articles/elektricheskie-mashini/elektricheskie-mashini_1457.html). – (дата звернення: 12.03.2019).
67. **Сайт компанії «Сучасні технології нагрівання»** [Електронний ресурс]. – Режим доступа : <http://www.stn.com.ua/>. – (дата звернення: 12.03.2019).
68. **Сайт КП «Харківводоканал»** [Електронний ресурс]. – Режим доступа: <http://vodokanal.kharkov.ua/content/watersupply>. – (дата звернення: 12.03.2019).
69. **Сайт КП «Харківські теплові мережі».** Режим доступа: <http://www.hts.kharkov.ua/>. – (дата звернення: 12.03.2019).
70. **Сайт компанії «PowerGroup»** [Електронний ресурс]. – Режим доступа: <http://powergroup.com.ua>. – (дата звернення: 12.03.2019).

71. **Симетричні складові та вищі гармоніки у трифазних колах** : Метод. вказівки до виконання розрахунково-графічних робіт з курсу «Теоретична електротехніка» [Електронний ресурс] / Уклад. А. А. Щерба, І. А. Курило, І. Н. Намацалюк. – Київ : НТУУ «КПІ», 2007. – 76 с.– Режим доступу: [http://toe.fea.kpi.ua/te\\_sait/posibniki/3\\_faz.pdf](http://toe.fea.kpi.ua/te_sait/posibniki/3_faz.pdf). – (дата звернення: 12.03.2019).
72. **Сайт Європейського Союзу «EUR-Lex»**. Directive 2010/30/UE du Parlement européen et du Conseil du 19 mai 2010 [Електронний ресурс]. – Режим доступу: <http://eur-lex.europa.eu/legal-content/FR/TXT/HTML/?uri=CELEX:32010L0030>. – (дата звернення: 12.03.2019).
73. **Сайт Європейського Союзу «EUR-Lex»**. Décret n° 2011-1479 du 9 novembre 2011 relatif à l'étiquetage des produits ayant une incidence sur la consommation d'énergie [Електронний ресурс]. – Режим доступу: <https://www.legifrance.gouv.fr/eli/decret/2011/11/9/EFIC1126821D/jo/texte>. – (дата звернення: 12.03.2019).
74. **Сайт Європейського Союзу «EUR-Lex»**. [Режим доступу]: <https://eur-lex.europa.eu/legal-content/IT/TXT/?uri=CELEX%3A31992L0075>. – (дата звернення: 12.03.2019).
75. **Сайт «Школа для електрика»**. [Режим доступу]: <http://electricalschool.info/main/lighting/1870-sovremennye-indukcionnye-lampy.html>. – (дата звернення: 12.03.2019).

## ТЕРМІНОЛОГІЧНИЙ СЛОВНИК

**Автоелектронна емісія** – відривання електронів від поверхні металу під дією зовнішнього електричного поля.

**Амплітуда імпульсу** – максимальне миттєве значення імпульсу напруги.

**Відхилення частоти** – різниця між дійсним і номінальним значеннями частоти.

**Доза флікера** – міра сприйняття людиною коливань світлового потоку штучних джерел світла, спричинених коливаннями напруги електричної мережі за встановлений час.

**Електрична ніч** – плавильна або нагрівальна установка, у якій тепловий ефект досягається за допомогою електричного струму.

**Електричне зварювання** – процес створення нероздільних з'єднань деталей машин, конструкцій і споруд за умови їх місцевого або загального нагрівання, пластичного деформування, або за умови одночасного впливу цих двох факторів, наслідком чого є встановлення міжатомних зв'язків у місці з'єднання.

**Електронагрівальне устаткування** – устаткування у якому електрична енергія використовується для нагрівання матеріалів і виробів.

**Електропостачальна система** загального призначення – сукупність електричних установок, призначених для виробництва, передавання, перетворення та розподілу електричної енергії.

**Електрифікований транспорт** – вид транспорту, який для руху використовує електричну енергію (залізця, метрополітен, трамвай, тролейбус).

**Елемент** – складова системи (підсистеми), яка в межах певного дослідження не поділяється на складові, і взаємодія якої з іншими елементами або підсистемами цієї системи забезпечує реалізацію деякої підфункції загальної функції системи.

**Зовнішня характеристика** електрозварювального устаткування – залежність між напругою на вихідних клеммах і струмом у зварювальному ланцюзі.

**Імпульс напруги** – різка зміна напруги в точці електричної мережі, за якою настає відновлення напруги до початкового або близького до нього рівня за проміжок часу до декількох мілісекунд.

**Індекс передачі кольору** – параметр, що характеризує ступінь відповідності природного кольору предмета кольору цього предмета, що сприймається під час освітлення його джерелом світла.

**Інженерне устаткування** будинку – комплекс технічних пристроїв, що забезпечують сприятливі (комфортні) умови для побуту й трудової діяльності мешканців будинку.

**Іонізація** – процес, при якому в газовому середовищі з нейтральних атомів і молекул утворюються позитивні й негативні іони.

**Коефіцієнт корисної дії** – відношення корисної потужності на виході до активної потужності на вході електроприймача.

**Коефіцієнт перевантажувальної здатності** – кратність максимального обертового моменту стосовно номінального моменту.

**Критичний момент (ковзання)** – максимальний обертовий момент асинхронного двигуна й ковзання, при якому він розвивається.

**Міжнародна електротехнічна комісія (МЕК)** – міжнародна некомерційна організація зі стандартизації у сфері електричних, електронних і суміжних технологій.

**Надійність електропостачання** – здатність системи електропостачання забезпечити споживачів електроенергією, що відповідає вимогам якості, без аварійних перерв у електропостачанні й порушення технологічного процесу споживача.

**Напруга збудження дуги** – напруга, при якій між електродами виникає електрична дуга.

**Номінальна напруга** – величина напруги, на яку розраховано чи до якої віднесено електричну мережу, а також у прив'язці до якої визначено окремі експлуатаційні характеристики.

**Номінальна напруга електроспоживача** – напруга на шинах з'єднання споживачів із джерелом ЕЕ і за умови якої електроспоживачі функціонують з розрахунковими режимами і забезпечують напругу на введеннях електроприймачів у межах допустимих відхилень.

**Номінальна напруга електроприймача** – напруга, зазначена в паспортних (каталожних) даних, і підключення якої забезпечує функціонування електроприймача з розрахунковою продуктивністю (ККД, розрахункові режими роботи, обсяг споживання потужності, коефіцієнт активної потужності  $\cos\phi$  тощо).

**Номінальний струм** – струм, що споживається електроприймачем при номінальній напрузі живлення й номінальному навантаженні на виході електроприймача.

**Номінальна потужність** – розрахункова потужність електроприймача, зазначена в технічному паспорті, яку він споживає з електричної мережі за умови номінального значення напруги й нормального режиму роботи.



**Об'єднана енергетична система** – сукупність електростанцій, електричних і теплових мереж, інших об'єктів електроенергетики, об'єднаних спільним режимом виробництва, передачі та розподілу електричної і теплової енергії при централізованому управлінні цим режимом.

**Освітленість** – щільність світлового потоку на поверхні освітлення, тобто відношення світлового потоку до площі освітлюваної поверхні за умови його рівномірного розподілу.

**Параметр** – властивість (показник) системи, яку можна вимірити.

**Підсистема** – це виділена в межах системи сукупність складових, які мають певний набір властивостей, і взаємодія яких забезпечує реалізацію деякої складової функції системи.

**Приймач електричної енергії** (електроприймач) – апарат, агрегат, механізм, призначений для перетворення електричної енергії в інший вид енергії.

**Провал напруги** – раптова значна зміна напруги в точці електричної мережі нижче рівня  $0,9U_{ном}$ , за яким слідує відновлення напруги до попереднього або близького до нього рівня через проміжок часу від десяти мілісекунд до декількох десятків секунд.

**Процес** – сукупність послідовних дій (змінювання стану або значень параметрів складових системи) для досягнення певного результату (реалізації функції системи).

**Режим:**

– **аварійний** – режим роботи електроприймача, за якого напруга або струм досягають таких значень, що при певній тривалості роботи це загрожує пошкодженням або руйнуванням електроприймача;

– **анормальний** – режим, за якого значення хоча б одного параметра режиму виходять за межі найбільшого або найменшого робочого значення.

– **короткого замикання** – режим роботи, за якого електричний опір навантаження дорівнює нулю, або режим, за якого електроприймач з'єднаний із джерелом живлення і перебуває у заклиненому стані;

– **номінальний** – режим системи електропостачання (електроприймача), за якого значення кожного із параметрів режиму дорівнює номінальному;

– **нормальний** – режим, за якого параметри електроприймача відповідають робочим значенням;

– **перевантаження** – режим роботи електроприймача, за якого навантаження на його виході перевищує номінальне значення;

– **неповнофазний** – режим роботи трифазного електроприймача, за відсутності живлення по одному з проводів трифазної системи.

**Потужність променевої енергії (променевий потік)** – кількість енергії, що випромінюється за одиницю часу.

**Прямий пуск АД** – пуск АД шляхом безпосереднього вмикання до мережі змінного струму без обмеження струмів.

**Світлова віддача лампи** – відношення світлового потоку лампи до її потужності.

**Світловий потік** – частина потужності променевої енергії (променевого потоку), що сприймається оком людини як світлове відчуття.

**Світність** – оптична характеристика поверхневої інтенсивності світлового потоку, випромінюваного з певної точки поверхні тіла.

**Сільськогосподарський споживач** – споживач електроенергії, що безпосередньо виробляє сільськогосподарську продукцію (зрошувальні системи і їхні станції, майстерні ремонту сільськогосподарських машин і механізмів тощо).

**Сила світла** – просторова щільність світлового потоку, яка чисельно дорівнює відношенню потоку випромінювання до тілесного кута, у якому він випромінюється.

**Система** – виділена з середовища сукупність матеріальних або абстрактних об'єктів, явищ, процесів, які мають певний набір властивостей, і взаємодія яких забезпечує досягнення деякої функції протягом певного часу.

**Споживач електричної енергії** (електроспоживач) – електроприймач або група електроприймачів, об'єднаних технологічним процесом, які розміщуються на певній території.

**Термоелектронна емісія** – відрив електронів від поверхні металу під дією високої температури.

**Тілесний (просторовий) кут** – частина простору, обмежена кінечною поверхнею.

**Тимчасова перенапруга** – підвищення напруги в точці електричної мережі понад  $1,1 \cdot U_{\text{ном}}$  значення тривалістю більш ніж 10 мс.

**Характеристика системи** – функціональна залежність між двома або більшою кількістю параметрів системи.

#### **Характеристики АД:**

– **механічна** – залежність обертового моменту асинхронної машини від ковзання  $M = f(s)$  за умови  $U_1 = \text{const}$ , що має місце в нормальному режимі експлуатації;

– **робочі характеристики** – залежності низки величин (частота обертання  $n_2$ , ковзання  $s$ , момент на валу  $M$ ,  $\cos\phi$ , ККД і струм статора  $I_1$ ), що визначають властивості двигуна, від корисної потужності  $P_2$ , яка розвивається на його валу.

**Якість електричної енергії** – ступінь відповідності параметрів електричної енергії їхнім установленим значенням.

**Яскравість** – відношення сили світла, що випромінюється елементом поверхні в певному напрямі, до площі поверхні, яка світиться.

## ПРЕДМЕТНИЙ ПОКАЖЧИК

- А**  
Амплітуда імпульсу 63
- Б**  
Бойлерна 233
- В**  
Вібратор 191:  
внутрішній 194  
дебалансний 192  
зовнішній 192  
Відносна тривалість вмикання 37, 169  
Відносна тривалість роботи 169  
Відхилення частоти 62  
Водонагрівач 111  
Випрямляч зварювальний 175
- Г**  
Гальмування АД:  
рекуперативне 94  
динамічне 93  
противмиканням 92
- Д**  
Джерело світла 131  
Динамічне гальмування 93  
Доза флікера 54
- Е**  
Електроприймач 16:  
другої категорії 25  
особливої групи 25  
першої категорії 25  
третьої категорії 25  
Електроспоживач 16, 21  
Електрична піч 200  
Електричне зварювання 53, 159  
Електрифікований транспорт 27, 238  
Електроосвітлювальне устаткування 53  
Електропрогрівання 119  
Електротермічна установка 53  
Елемент (системи) 12  
Електродвигун:  
асинхронний 82, 99  
крановий 181  
однофазний 103  
постійного струму 184  
Електротермія 200
- Емісія:**  
автоелектронна 161  
термоелектронна 161
- З**  
Зварювання 169:  
електродугове 164  
електрошлакове 164  
електронно-променево 164  
контактне 176  
лазерне 164  
плазмове 164  
Зварювальний апарат:  
із убудованим дроселем 171  
із окремим дроселем 170  
із рухомим магнітним шунтом 172  
зі збільшеним магнітним розсіюванням 173  
Зварювальний випрямляч 175  
Зварювальний осцилятор 174  
Зварювальний трансформатор 173
- І**  
Імпульс напруги 63  
Індекс передачі кольору 132  
Іонізація 161
- К**  
Категорія надійності електроприймача 24  
Коефіцієнт:  
активної потужності 29, 67  
корисної дії 30  
несиметрії напруг за зворотною послідовністю 59  
несиметрії напруг за нульовою послідовністю 59  
перевантажувальної здатності 90  
потужності 67  
реактивної потужності 70  
спотворення синусоїдальності напруги 56  
тимчасової перенапруги 64

Колба лампи 134  
Колірна температура 132  
Коливання напруги 54  
Комбінований електромеханізм 191  
Кратність  
пускового струму 99  
початкового обертового момен-  
ту 90

## Л

Лампа:  
газорозрядна 141  
галогенна 140  
індукційна 156  
ксенонова 150  
люмінесцентна 141  
металогалогенна 147  
натрієва 150  
розжарювання 136  
ртутна 146  
світлодіодна 153  
типу ДРЛ 147

## М

Машина:  
вантажопідіймальна 180  
електрична ручна 189  
Модель «чорний ящик» 18, 32  
Мотор-вібратор 192

## Н

Нагрівальний елемент 108  
Надійність електропостачання 24  
Несиметрія напруги 58  
Номінальна потужність 68  
Номінальний параметр 83  
Напруга:  
горіння дуги 166  
збудження дуги 162  
номінальна 28  
холостого ходу 166  
Насоси:  
дренажні 228  
гарячого водопостачання 234  
підвищуючі 236  
Насосна станція 221  
Несинусоїдальність напруги 55

## О

Об'єднана енергетична система 14  
Освітленість 131  
Освітлення:  
аварійне 129  
евакуаційне 129  
загальне локалізоване 128  
загальне рівномірне 128  
комбіноване 129  
місцеве 129  
охоронне 130  
робоче 129  
чергове 130

## П

Параметр 28:  
номінальний 28,83  
Підсистема 12  
Підстанція тягова 240  
Піч:  
дугова електрична 207  
індукційна канална 205  
індукційна плавильна 205  
опору 200  
плавильна 202  
тигельна 203  
Перфоратор електромагнітний 191  
Потужність номінальна 29  
Принцип 13  
Приймач електричної енергії 16  
Провал напруги 62  
Процес 12  
Пульсація світлового потоку 132  
Пуск асинхронного двигуна:  
автотрансформаторний 101  
перемиканням «зірки» на  
«трикутник» 103  
прямий 99

## Р

Режим:  
аварійний 37  
короткого замикання 38, 74  
короткочасний 35  
неповнофазний 45, 74, 94  
номінальний 35  
нормальний 37  
перевантаження 38

переривчасто-тривалий 36  
перехідний 37  
повторно-короткочасний 36  
пусковий 37  
симетричний (несиметричний) 39, 41  
тривалий 36  
усталений 37  
Режим нейтралі 26  
Режим роботи електричної машини 85  
Розмах зміни напруги 54  
Ряд Фур'є 78

## С

Світлова віддача 131  
Світлова температура 156  
Світловий потік 130  
Світлодіод 153  
Світність 131  
Сила світла 130  
Симетрування напруги 74  
Система 12:  
«Водовідведення» 227  
«Водопостачання та водовідведення» 218  
«Водопостачання міста» 219  
електропостачальна 15  
«Електропостачання споживачів» 17  
«Життєзабезпечення міста» 217  
«Міський електричний транспорт» 239  
«Передача електричної енергії» 15  
«Розподіл електричної енергії» 15  
«Споживання електричної енергії» 16, 21  
«Теплопостачання міста» 230  
Споживач електричної енергії 16:  
другого класу напруги 25  
першого класу напруги 25  
промисловий 26  
сільськогосподарський 27  
побутовий 27

Струм:

зварювальної дуги 161, 163  
номінальний 29

Схема :

«зірка» без нульового проводу 38  
«зірка» з нульовим проводом 42  
«трикутник» 40  
Штейнметца 61

## Т

ТЕН 109  
Тіло розжарювання 137  
Трансформатор:  
зварювальний 172  
пічний 213  
Тривалість:  
імпульсу 64  
провалу напруги 63  
тимчасової перенапруги 64

## У

Усталене відхилення напруги 50  
Устаткування:  
електрозварювальне 198  
електротермічне 53, 200  
електротехнологічне 197, 199  
загальнопромислове 196  
індукційного нагрівання 203  
контактного зварювання 176  
перетворювальне 197  
прямого нагрівання 201

## Х

Характеристика:  
вольт-амперна 78, 162  
зовнішня 166  
електроприймача 31  
механічна 83, 91  
нелінійна 78  
природна 84  
пускова 33  
робоча 83, 88  
штучна 85

## Ц

Цоколь лампи 133

## Я

Якість електричної енергії 49  
Яскравість 131

## ДОДАТКИ

### Додаток А

#### Категорії надійності електроприймачів будинків [21]

Назва споруди й електроприймачів	Категорія надійності
Житлові будинки і гуртожитки заввишки понад 16 поверхів: – електроприймачі протипожежних установок (пожежні насоси, системи підпору повітря, димовидалення, пожежної сигналізації, централізованої системи оповіщення про пожежу), сигналізація загазованості, ліфти, аварійне освітлення (освітлення безпеки й евакуаційне), вогні світлового огороження; – комплекс решти електроприймачів	I  II
Житлові будинки заввишки до 16 поверхів включно з електроплитами й електроводонагрівачами для гарячого водопостачання, за винятком одно-, восьмиквартирних будинків	II
Житлові одно-, восьмиквартирні будинки, зокрема з електроплитами й електроводонагрівачами для гарячого водопостачання	III
Житлові будинки заввишки понад 5 поверхів з плитами на природному, скрапленому газі або твердому паливі	II
Житлові будинки заввишки до 5 поверхів включно з плитами на природному, скрапленому газі або твердому паливі	III
Будинки гуртожитків заввишки до 16 поверхів загальною місткістю: – понад 50 осіб; – до 50 осіб включно	II III
Громадські будинки заввишки понад 16 поверхів: – електроприймачі протипожежних установок, сигналізація загазованості, ліфти, аварійне освітлення, вогні світлового огороження; – комплекс решти електроприймачів	I  II
Будинки установ, організацій, офісів з чисельністю працівників понад 2 000 осіб незалежно від кількості поверхів: – електроприймачі протипожежних установок, сигналізація загазованості, ліфти, аварійне освітлення, охоронна сигналізація; – комплекс решти електроприймачів	I  II
Будинки установ, організацій, офісів заввишки до 16 поверхів включно з чисельністю працюючих від 50 до 2 000 осіб	II
Будинки установ, організацій, офісів з чисельністю працюючих до 50 осіб незалежно від кількості поверхів (крім будинків установ органів управління обласного, міського та районного значення, які належать до II категорії)	III
Лікувально-профілактичні та санаторні заклади: – електроприймачі протипожежних установок, сигналізація загазованості, лікарняні ліфти, аварійне освітлення, охоронна сигналізація; – електроприймачі операційних і пологових блоків, відділень анестезіології, реанімації й інтенсивної терапії, кабінетів лапароскопії, бронхоскопії й ангиографії та інших, від безперебійної роботи яких безпосередньо залежить життя хворих; – комплекс решти електроприймачів	I  I  II

Назва споруди і електроприймачів	Категорія надійності
Будинки навчальних закладів, у яких навчається понад 1 000 осіб: – електроприймачі протипожежних установок, сигналізація загазованості, аварійне освітлення, охоронна сигналізація; – комплекс решти електроприймачів	I II
Будинки навчальних закладів, в яких навчається: – від 200 до 1 000 осіб; – до 200 осіб включно	II III
Дошкільні навчальні заклади	II
Універсами, торговельні центри й магазини з торговими залами загальною площею понад 2 000 м <sup>2</sup> : – електроприймачі протипожежних установок, сигналізація загазованості, аварійне освітлення, охоронна сигналізація; – комплекс решти електроприймачів	II III
Торговельні заклади з торговою площею: – від 250 до 2 000 м <sup>2</sup> включно; – до 250 м <sup>2</sup> включно	II III
Дахові котельні, котельні, прибудовані до житлових будинків, і котельні, вбудовані в громадські будинки та споруди (згідно зі Зміною № 1 СНіП II-35): – електроприймачі протипожежних установок, сигналізація загазованості, аварійне освітлення, охоронна сигналізація; решта електроприймачів: – у котельних I категорії надійності відпуску тепла споживачам; – у котельних II категорії надійності відпуску тепла споживачам	I I II
Теплові пункти (бойлерні): – що обслуговують житлові будинки заввишки понад 16 поверхів; – що обслуговують житлові будинки заввишки до 16 поверхів	I II
Вбудовані сховища цивільної оборони: – електроприймачі протипожежних установок, сигналізація загазованості, аварійне освітлення; – комплекс решти електроприймачів	I II

## ДОДАТОК Б

## Технічні характеристики зварювальних джерел живлення [54]

Джерело зварювального струму	Номинальний струм зварювання, А, при ПВ* = 60 %	Межа регулювання струму, А	Напруга на дузі, В	Напруга холостого ходу, В	Первинна напруга, В	Потужність, кВА	Габаритні розміри, мм	Маса, кг
Джерела змінного струму — трансформатори								
ТСД-1000-3	1 000	400–1 200	42	69–78	220/380	76	950 x 818 x 1 215	540
ТСД-2000-2	2 000	800–2 200	53	72–84	380	180	1 050 x 900 x 1 300	670
ТДФ-1001	1 000	400–1 200	44	68–71	220/380	82	1 200 x 830 x 1 200	720
ТДФ-1601	1 600	600–1 800	44	95–105	380	182	1 200 x 830 x 1 200	1 000
ТДФ-2001	2 000	800–2 200	50	74–79	380	170	1 200 x 830 x 1 200	980
Джерела постійного струму — випрямлячі								
ВС-300	300	30–300	–	20–40	380	17	560 x 720 x 965	250
ВСЖ-303	315	50–315	–	18–50	220/380	20	710 x 550 x 955	280
ВДГ-302	315	50–315	16–38	30–50	220/380	19	1 045 x 748 x 959	275
ВС-600	600	60–600	–	20–40	380	35	1 000 x 805 x 1 510	490
ВДГ-601	630	100–700	18–66	66	220/380	67	1 234 x 868 x 1 081	525
ВДУ-504	500	70–500	18–50	72–78	220/380	40	1 275 x 816 x 940	380
ВДУ1001	1000	300–1 000	24–66	24–66	380	105	950 x 1 150 x 1 850	750
ВДУ-1601	1600	500–1 600	26–66	26–66	380	165	950 x 1 150 x 1 850	950
Джерела постійного струму — перетворювачі								
ПД-501	500	125–500	40	55–90	220/380	28	1 075 x 650 x 1 085	454
ПСГ-500	500	60–500	40	16–40	220/380	28	1 055 x 580 x 920	500



**ДОДАТОК В**  
**Основні параметри дугових печей постійного струму [59]**

Тип печі	ДП-0,1	ДП-0,25	ДП-0,5	ДП-1,5	ДП-3,0	ДП-6,0	ДП-12	ДП-15	ДП-25	ДП-50
Потужність джерела, кВА	140	250	630	1 600	2 500	5 000	9 600	12 800	18 360	43 200
Напруга живлення, кВ	0,4	0,4	0,4; 6,3; 10,5	0,4; 6,3; 10,5	0,4; 6,3; 10,5	6,3; 10,5	6,3; 10,5	6,3; 10,5	6,3; 10,5; 35	6,3; 10,5; 35
Діаметр електрода, мм	75	100	100; 150	200	200	250	300	400	500	555
Кількість електродів	1	1	2	2	2	2	2	2	3	4
Ємність печі, т	0,1	0,25	0,5	1,5	3,0	6,0	12	15	25	50
Питоме споживання електричної енергії, кВт·год/т	735	660	560	540	530	500	495	480	405	380
Тривалість розплавлення, хв.	40	40	32	36	46	50	60	55	45	36

**ДОДАТОК Г**  
**Основні параметри дугових сталеплавильних**  
**печей змінного струму [66]**

Тип печі	$S_{\text{ном}}$ трансформатора, кВ·А	$U_1$ , кВ	Межі зміни $U_2$ , В	$I_2$ , кА	Питомі Витрати електроенергії, кВт·г/т
ДС-0,5	400	6; 10	213–110	1,085	650
ДСП-1,5	1 000	6; 10	225–118	2,57	550
ДСП-3	1 800	6; 10	242–122,5	2,25	525
ДСП-12	5 000	6; 10	278–202	10,4	500
ЖДСП-20	9 000	6; 10	318–116	16,35	470
ДСП-25	16 000	6; 10	384–148	24–10	–
ДСП-40	15 000	35	386–126	23,5	–
ДСП-50	20 000–29 150	35	486–152	27,7– 34,6	460–440
ДСП-80	32 000	35	478–161	38,8	420
ДСП-100	45 000	35	591,5–164,1	43,9	–
ДСП-200	45 000	35	–	–	400
ДСП-250	85 000	35	–	–	–

## ДОДАТОК Д

## Кранові асинхронні двигуни з фазним ротором: 380 В, 50 Гц, ПВ = 25 %

Тип	$P_n$ , кВт	$n_n$ , об/хв	$M_M/M_n$	Статор						Ротор					Момент інерції ротора $J$ , кг м <sup>2</sup>	Маса двигуна, кг
				cosφ		$I_{с.н.}$ , А	$I_{с.хх.}$ , А	$R_c$ , Ом	$X_c$ , Ом	$E_p$ , В	$I_{р.н.}$ , А	$R_p$ , Ом	$X_p$ , Ом	Коефф. трансформації напруги $k_e$ ( $k_R = k_e^2$ )		
				номінальний	холостого ходу											
MT011-6	1,4	885	2,3	0,65	0,15	5,3	3,9	5,98	3,93	112	9,3	0,695	0,57	3,14	0,0212	51
MT012-6	2,2	895	2,3	0,67	0,13	7,5	5,4	3,6	2,58	144	11,0	0,67	0,58	2,5	0,0288	58
MT111-6	3,5	915	2,3	0,70	0,11	10,5	6,6	2,16	2,03	181	13,7	0,525	0,755	1,96	0,0488	76
MT112-6	5,0	925	2,5	0,69	0,12	14,8	9,5	1,32	1,39	206	16,6	0,50	0,43	1,72	0,0675	88
MT211-6	7,5	935	2,5	0,70	0,09	20,8	11,8	0,68	1,07	255	19,8	0,44	0,88	1,38	0,115	120
MTB311-6	11,0	945	2,8	0,73	0,09	28,6	16,7	0,54	0,57	172	42,5	0,11	0,225	2,1	0,225	170
MTB311-8	7,5	695	2,5	0,71	0,09	21,0	14,0	0,88	0,965	251	20,5	0,47	0,72	1,41	0,275	210
MTB312-6	16	955	2,8	0,77	0,08	37,6	20,6	0,33	0,41	208	49,5	0,001	0,25	1,75	0,313	210
MTB312-8	11	710	2,8	0,66	0,10	33,0	22,1	0,53	0,56	182	41,0	0,13	0,23	1,96	0,387	210
MTB411-6	22	965	2,8	0,71	0,07	55,0	33,2	0,19	0,31	225	61,0	0,066	0,23	1,6	0,5	280
MTB411-8	16	715	2,8	0,65	0,08	45,7	30,2	0,285	0,43	207	49,5	0,103	0,25	1,73	0,538	280
MTB412-6	30	970	2,8	0,73	0,06	70,5	42,0	0,125	0,23	259	72,0	0,055	0,225	1,4	0,675	345
MTB412-8	22	720	2,8	0,69	0,07	58,0	37,1	0,207	0,32	234	59,0	0,09	0,24	1,53	0,75	345
MTB511-6	30	720	2,8	0,68	0,06	77,0	46,0	0,123	0,245	280	67,5	0,082	0,28	1,28	1,025	410
MTB512-8	40	730	2,8	0,69	0,06	101	60	0,08	0,17	322	76,5	0,072	0,24	1,12	1,4	500

## ДОДАТОК Е

## Кранові асинхронні двигуни з короткозамкненим ротором: 380 В, 50 Гц, ПВ = 25 %

Тип	$P_n$ , кВт	$n_n$ , об/хв	$M_M/M_n$	$M_n/M_n$	Статор							
					$I_{сн}/I_{сн}$	$\cos\varphi$			$I_{с.н.}$ , А	$I_{с.хх.}$ , А	$R_c$ , Ом	$X_c$ , Ом
						пусковий	номіналь- ний	холодного ходу				
МТК011-6	1,4	870	2,8	2,8	3,0	0,86	0,69	0,15	4,8	3,2	5,98	3,93
МТК012-6	2,2	875	2,8	2,8	3,1	0,85	0,7	0,13	7,2	4,6	3,6	2,58
МТК111-6	3,5	870	2,8	2,8	3,5	0,85	0,74	0,11	10,1	6,1	2,16	2,03
МТК112-6	5,0	890	3,0	3,0	3,9	0,80	0,75	0,12	13,5	8,4	1,32	1,39
МТК211-6	7,5	905	2,9	2,8	4,3	0,72	0,79	0,09	18,4	11,0	0,68	1,07
МТКВ311-6	11,0	910	3,1	2,8	4,9	0,72	0,8	0,09	26	15,7	0,54	0,575
МТКВ311-8	7,5	680	3,1	2,9	4,4	0,76	0,74	0,09	20	13,2	0,88	0,965
МТКВ312-6	16	905	3,1	2,8	4,9	0,70	0,79	0,08	37,8	19,8	0,33	0,41
МТКВ312-8	11	690	3,1	3,1	4,6	0,77	0,71	0,10	30,4	21,3	0,53	0,56
МТКВ411-6	22	935	3,0	2,8	5,2	0,61	0,78	0,07	50	29,7	0,19	0,31
МТКВ411-8	16	695	3,3	3,0	4,8	0,66	0,73	0,08	41	28,2	0,285	0,43
МТКВ412-6	28	945	3,3	2,8	5,6	0,60	0,81	0,06	62	35,1	0,125	0,23
МТКВ412-8	22	695	3,3	3,0	5,0	0,65	0,76	0,07	53,2	35,8	0,207	0,32
МТКВ511-6	28	700	3,4	3,1	5,4	0,61	0,75	0,06	68	40	0,123	0,245
МТКВ512-8	37	705	3,6	3,3	5,8	0,61	0,72	0,06	91	55	0,08	0,17