МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ І НАУКИ УКРАЇНИ

ХАРКІВСЬКИЙ НАЦІОНАЛЬНИЙ УНІВЕРСИТЕТ МІСЬКОГО ГОСПОДАРСТВА імені О. М. БЕКЕТОВА

В. М. Гаряжа,
І. Т. Карпалюк

ВСТУП ДО СПЕЦІАЛЬНОСТІ

КОНСПЕКТ ЛЕКЦІЙ

(для студентів 2 курсу денної, заочної і прискореної форм навчання освітньо-кваліфікаційного рівня «бакалавр» за спеціальністю 141 – Електроенергетика, електротехніка та електромеханіка)

Харків
ХНУМГ ім. О. М. Бекетова
2021

Гаряжа В. М. Вступ до спеціальності: конспект лекцій (для студентів 2 курсу денної, заочної і прискореної форм навчання освітньо-кваліфікаційного рівня «бакалавр» за спеціальністю 141 – Електроенергетика, електротехніка та електромеханіка) / В. М. Гаряжа, І. Т. Карпалюк ; Харків. нац. ун-т міськ. госп-ва ім. О. М. Бекетова. – Харків : ХНУМГ ім. О. М. Бекетова, 2021. – 150 с.

Автори:
доц. В. М. Гаряжа,
канд. техн. наук, доц. І. Т. Карпалюк

Рецензент
В. М. Охріменко, кандидат технічних наук, доцент Харківського національного університету міського господарства імені О. М. Бекетова

Рекомендовано кафедрою систем електропостачання та електроспоживання міст протокол № 1 від 08. 2018.

Конспект лекцій складений з метою допомоги студентам електромеханічних спеціальностей під час підготовки до занять, проходження модульного контролю та здачі заліку з дисципліни «Вступ до спеціальності».

ЗМІСТ

ВСТУП 7
1 ІСТОРІЯ ЕЛЕКТРОТЕХНІКИ 8
Запитання для перевірки 12
2 ЕЛЕКТРИЧНІ СТАНЦІЇ 13
2.1 Теплові електричні станції 13
2.2 Теплоелектроцентралі 15
2.3 Атомна електростанція 15
2.4 Гідроелектростанції 17
Запитання для перевірки 20
3 АЛЬТЕРНАТИВНІ ДЖЕРЕЛА 21
3.1 Сонячна електростанція з технолгією прямого використання сонячної енергії 21
3.2 Сонячна електростанція, біоконверсія сонячної енергії 23
3.3 Приливна електростанція 23
3.4 Хвильова електростанція 24
3.5 Вітроелектростанція 26
3.6 Геотермальна електростанція 27
Запитання для перевірки 29
4 СТРУКТУРА СПОЖИВАЧІВ ЕЛЕКТРИЧНОЇ ЕНЕРГІЇ. ПОКРИТТЯ ГРАФІКА НАВАНТАЖЕНЬ ЕНЕРГОСИСТЕМИ ЕЛЕКТРОСТАНЦІЯМИ 30
4.1 Структура споживачів електричної енергії……30
4.2 Покриття графіка навантажень енергосистеми електростанціями…..34
Запитання для перевірки……36
5 ЕЛЕКТРИЧНІ МЕРЕЖІ, КЛАСИФІКАЦІЯ. ЛІНІЇ ЕЛЕКТРОПЕРЕДАВАННЯ. ПІДСТАНЦІЇ ТА РОЗПОДІЛЬЧІ ПРИСТРОЇ 37
5.1 Будова і призначення електричних мереж 37
5.2 Підстанції і розподільні установки 41
Запитання для перевірки 43

6 ЕКОЛОГІЧНИЙ АСПЕКТ ВИРОБНИЦТВА І СПОЖИВАННЯ ЕЛЕКТРИЧНОЇ ЕНЕРГІЇ 44
6.1 Проблеми росту споживання енергії 44
6.2 Сучасні тенденції розвитку енергетики 45
6.3 Криза паливних ресурсів 46
6.4 Екологічна криза енергетики 49
6.5 Екологічні проблеми традиційної енергетики 49
6.6 Економія електричної енергії 53
Запитання для перевірки 54
7 ЕЛЕКТРИЧНІ КОЛА ПОСТІЙНОГО СТРУМУ. ПРОСТІ І СКЛАДНІ ЕЛЕКТРИЧНІ КОЛА 55
7.1 Електричні кола 55
7.2 Електричні кола постійного струму 56
Запитання для перевірки 61
8 МАГНІТНЕ ПОЛЕ, МАГНІТНІ КОЛА 62
8.1 Електромагнетизм 62
8.2 Магнітні кола 68
Запитання для перевірки: 72
9 ЕЛЕКТРИЧНІ КОЛА ЗМІННОГО СТРУМУ 72
9.1 Графічне зображення синусоїдального струму, його миттєве значення 73
9.2 Діючі значення струму 73
9.3 Векторні діаграми 75
9.4 Найпростіші кола змінного струму 75
9.5 Розрахунок кіл змінного струму 77
9.6 Потужності кіл змінного струму 80
Запитання для перевірки 81
10 ТРИФАЗНИЙ СТРУМ 82
10.1 Основны поняття трифазного струму 82
10.2 Електричні машини і трансформатори 85

10.3 Трансформатори 86
Запитання для перевірки 93
11 АСИНХРОННІ ТА СИНХРОННІ МАШИНИ 94
11.1 Асинхронні машини 94
11.2 Синхронні машини 101
Запитання для перевірки 107
12 МАШИНИ ПОСТІЙНОГО СТРУМУ 108
12.1 Будова та принцип дії машин постійного струму 108
12.2 Особливості роботи машин постійного струму 109
12.3 Генератори 111
12.4 Двигуни 113
12.5 Мікродвигуни постійного струму 116
Запитання для перевірки 118
13 ВИСОКОВОЛЬТНІ ТА НИЗЬКОВОЛЬТНІ ЕЛЕКТРИЧНІ АПАРАТИ 119
13.1 Електричні апарати 119
13.2 Високовольтні апарати 119
13.3 Низьковольтні апарати 121
Запитання для перевірки 130
14 ЗАХИСТ ЕЛЕКТРИЧНИХ СИСТЕМ ТА МЕРЕЖ. РЕЗЕРВУВАННЯ В ЕЛЕКТРИЧНИХ МЕРЕЖАХ 131
14.1 Основи захисту електричних мереж 131
14.2 Захист електричних мереж від пошкоджень ізоляції 131
14.3 Захист електричних мереж від замикання на землю 132
14.4 Захист електричних мереж від коротких замикань 133
14.5 Захист електричних мереж від перенапруги 134
14.6 Захист електричних мереж від механічних пошкоджень 134
Запитання для перевірки 135

16 БЕЗПЕКА ПІД ЧАС ЕКСПЛУАТАЦІЇ ЕЛЕКТРИЧНИХ СИСТЕМ ТА ПРИЛАДІВ 136
16.1 Деякі історичні факти…… 136
16.2 Удар струмом: перша допомога, наслідки після ураження 136
16.3 Фактори, які впливають на характер і тяжкість електротравми 139
16.4 Надання першої допомоги при ураженні електричним струмом..... 140
16.4 1 Способи надання першої допомоги постраждалому…… 143
16.4.2 Способи виконання штучного дихання і зовнішнього масажу серця……..……... 145
Запитання для перевірки..... 148
СПИСОК ДЖЕРЕЛ……..... 149

ВСТУП

Розвиток суспільства, його успіхи на шляху цивілізації безпосередньо пов'язані з підвищенням продуктивності праці та поліпшенням матеріальних умов життя людей. Необхідною умовою науково-технічного і соціального прогресу є збільшення споживання енергії та освоєння нових, більш ефективних її видів. Бурхливий прогрес техніки і той рівень, якого вона досягла сьогодні, був би неможливим без використання якісно нових видів енергії, в першу чергу електричної. Її потоки, народжуючись на електростанціях, розтікаються містами і заводами, розбиваючись на струмки, проникають в кожен будинок, досягаючи найвіддаленіших споживачів. Електричну енергію по праву слід вважати основою сучасної цивілізації. Без неї не можна уявити розвиток виробництва, електроніки, радіотехніки, обчислювальної техніки, сучасних технологій зв'язку. Для електричної енергії характерна висока зручність у користуванні та екологічна чистота. Розподіл електричної енергії здійснюється електричними мережами електроенергетичної системи, яка являє собою сукупність електричних станцій, мереж і споживачів енергії, зв'язаних спільністю режиму й безперервністю процесу виробництва, розподілу й споживання електроенергії.

На жаль, останні роки все більше вказують на тісний взаємозв'язок енергетики й навколишнього середовища. Це відбувається тому, що потужності, які людство навчилося добувати штучним шляхом, стали співрозмірними з потужністю природних процесів.

Штучні енергетичні процеси впливають на біосферу, як правило, негативно. Велику тривогу викликають забруднення атмосфери, зміна її газового складу, затоплення великих ділянок землі при спорудженні гідростанцій, можливість радіоактивного забруднення, зміна теплового балансу планети.

Безперервними процесами виробництва і розподілу електроенергії керують енергетики, які забезпечують сталу роботу енергосистем, їх надійність і безаварійність, виконання екологічних вимог.

Курс «Вступ до спеціальності» є першим кроком до формування спеціаліста – енергетика і, в загальному вигляді об'єднує такі курси, як «Теоретичні основи електротехніки», «Електричні матеріали», «Електричні машини», «Електричні апарати», «Електропривод» та ряд інших.

ІСТОРІЯ ЕЛЕКТРОТЕХНІКИ

Питання що розглядаються в лекції:

1. Історія електротехніки.

2. Властивості електричного струму.

3. Розвиток використання електричної енергії.

4. Способи генерації електричного струму.

5. Потреба в значних потужностях енергетики.

Практичне використання електричної енергії почалося наприкінці 19 сторіччя. Сьогодні електроенергія так глибоко ввійшла в промисловість і побут людей, що життя без неї просто немислиме. Це результат тих переваг, які електроенергія має в порівнянні з іншими видами енергії.

Перелічимо найбільш важливі з них:

– електроенергію легко одержати з інших видів енергії і перетворити з високим ККД в інші види енергії;

– місця одержання і споживання електроенергії можуть бути віддалені одне від одного. Це дозволяє споруджувати електричні станції поблизу енергетичних джерел та концентрувати великі виробничі потужності вдалині від них;

– легко і з невеликими втратами електроенергію можна передавати на великі відстані, причому ця передача відбувається практично миттєво;

– застосування електроенергії поліпшує і полегшує умови праці, дозволяє автоматизувати виробничі процеси;

– з використанням електроенергії поліпшуються побутові умови населення, тому що вона екологічно чиста, гігієнічна і зручна.

Процеси виробництва, передачі, розподілу і споживання електричної енергії відбуваються одночасно.

Власне електроенергію досить складно запасати і зберігати на складі. Її необхідно виробляти в той момент і в такій кількості, як потрібно споживачеві. Тому виробництво електроенергії повинне зростати або зменшуватися пропорційно її споживанню. Для збереження електричної енергії необхідні спеціальні методи її перетворення в інші види енергії (наприклад, у хімічну в акумуляторі). В останній час створені напівпровідникові індуктивні та ємнісні накопичувачі електроенергії, але вони ще не набули розповсюдження.

Енергетичні ресурси. Електричну енергію одержують на електричних станціях шляхом перетворення з іншого виду енергії. Як енергетичні ресурси використовують переважно енергію води, що рухається, хімічну енергію палива

(твердого, рідкого і газоподібного) і атомну енергію. Експлуатація таких традиційних джерел енергії породжує екологічні проблеми, крім того, слід пам'ятати, що запаси викопних палив обмежені.

Останнім часом посилився інтерес до так званих нетрадиційних джерел енергії: сонця, вітру, припливів і відпливів океанської води, геотермальних джерел, біомаси та ін. Як енергетичні ресурси вони давно відомі. Новою є технологія їхнього використання. Нетрадиційні джерела енергії практично невичерпні й екологічно чисті. Однак існують труднощі перетворення їхньої енергії в електричну. На сьогоднішній день слід зазначити низький коефіцієнт корисної дії таких пристроїв для перетворення енергії і, як наслідок, дорожнечу одержуваної електроенергії. Тому частка нетрадиційних джерел електроенергії в загальному балансі світової електроенергії на сьогодні незначна.

Найбільш перспективним новим джерелом енергії вважають термоядерний синтез – використання теплової енергії, що виділяється при з'єднанні (синтезі) ядер деяких легких елементів. Як термоядерне паливо можна використовувати ізотопи водню: дейтерій і тритій, запаси яких на земній кулі практично невичерпні. На сучасному етапі головні труднощі в здійсненні термоядерного синтезу – це реалізація керованої термоядерної реакції. У цьому напрямку ведеться велика дослідницька робота. Незважаючи на великі труднощі, кінцеві результати досить обнадійливі.

Електроенергетична система. Перші електричні станції мали невелику потужність і забезпечували споживачів, які знаходились від них у безпосередній близькості. Досвід показав, що такий спосіб електропостачання економічно невигідний і технічно недоцільний, особливо зі збільшенням числа і потужності споживачів. Це змусило споруджувати більш потужні електростанції і більш протяжні мережі електропередавання.

Треба було зв'язувати паралельно роботу двох і більше електростанцій. Таким чином, прийшли до створення електроенергетичних систем.

Електроенергетичні системи (енергетичні системи) – це сукупність споруд для виробництва, перетворення, передачі, розподілу і споживання електричної енергії, що зв'язані загальним технологічним процесом і загальним централізованим керуванням.

На рисунку 1, а приведений спрощений вид енергетичної системи (ЕС), а на рисунку 1, б – її електрична схема.

У країнах з невеликою територією створюють одну ЕС, а у великих країнах може бути і більше. Окремі енергосистеми в одній або декількох країнах поєднують між собою лініями електропередавання і створюють об'єднані енер-

госистеми (ОЕС) для обміну електроенергією. В Україні утворена єдина енергетична система України, яка сьогодні з'єднана з енергосистемою Росії.

Структура потужностей енергетики України на сьогодні приблизно така:

– теплові електростанції – 67 %;

– атомні електростанції – 24 %;

– гідроелектростанції – 9 %.

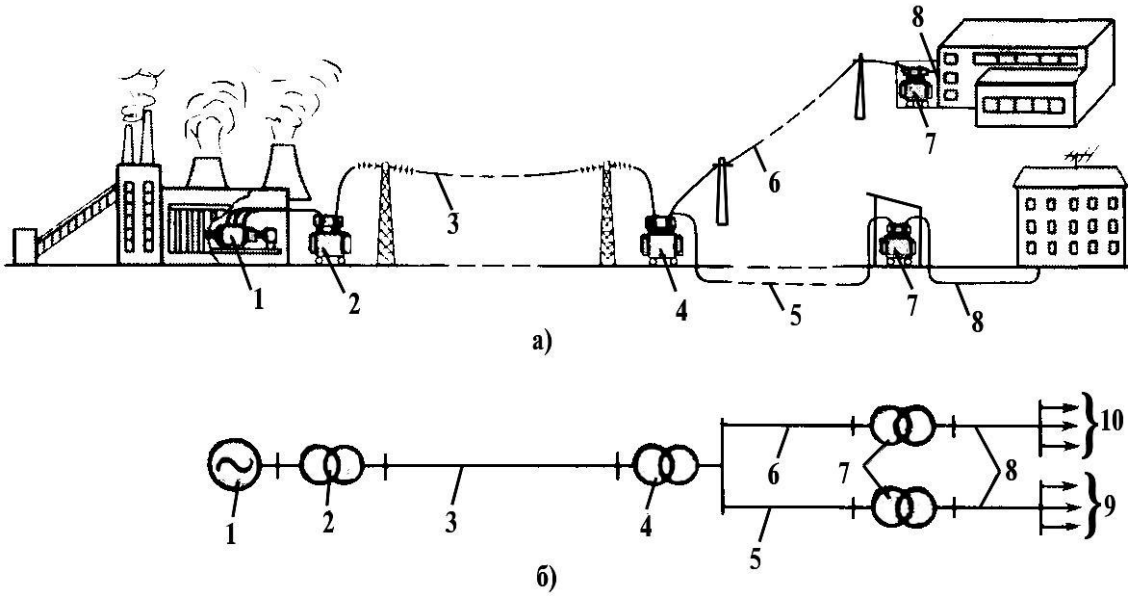

Рисунок 1 – Електроенергетична система (а) та її зображення (б) за допомогою умовних позначень:

1 – генератор електроенергії; 2 – підвищувальний трансформатор; 3 – лінія електропередавання високої напруги; 4, 7 – понижувальні трансформатори; 5, 6 – лінії середньої напруги; 8 – лінії низької напруги; 9, 10 – споживачі

Сумарна потужність електростанцій складає близько 54 ГВт. Виробництво електроенергії за видами енергоносіїв не зовсім відповідає структурі встановлених потужностей: ядерне паливо дає 43 %; вугілля – 27 %; газ – 22 %; гідроенергія – 5 %; нафта – 3 % від загальної кількості електроенергії.

Більше 40 % українських електростанцій на сьогодні відпрацювали свій ресурс – необхідна їх модернізація. Устаткування більшості теплових електростанцій не відповідає сучасним технічним і екологічним вимогам. Існують проблеми в мережному господарстві – потужності Рівненської і Хмельницької АЕС неможливо передати на схід країни, де знаходяться основні споживачі. Магістральна мережа 750 кВ, яка б могла це забезпечити, складається з двох одноколових петель. Одна з них розташована в західній частині країни і включає в себе Хмельницьку атомну, Чорнобильську атомну електростанцію, Вінницьку і Західноукраїнську підстанцію. Друга розташована на сході країни і включає

Запорізьку АЕС, Дніпровську і Запорізьку підстанції. Ці дві петлі з'єднані між собою одноколовою ЛЕП 750 кВ між Вінницькою і Дніпровською підстанціями, що проходить через Південноукраїнську АЕС. Усі ЛЕП 750 кВ в Україні є одноколовими. При цьому пропускна здатність на одне коло складає більше 2 000 МВт. Шість з одинадцяти підстанцій 750 кВ працюють тільки з одним головним трансформатором масляного типу потужністю 1 000 МВт або 1 250 МВт. Магістральна мережа 750 кВ формувалася з початку 70-х до 1990 року. На сьогодні близько третини ЛЕП 750 кВ вичерпали свій термін служби.

Магістральні ЛЕП 330 кВ створюють своєрідні решітки навколо кожної підстанції 750 кВ, яка живить розподільні системи і доповнюють з'єднання між підстанціями 750 кВ. Магістральні мережі 220 кВ доповнюють системи 330 кВ. Магістральна мережа 400 кВ знаходиться в західній частині країни й експортує електроенергію Бурштинської ТЕС в Угорщину і Словаччину. Магістральна мережа 500 кВ знаходиться в східній частині і з'єднує Донбаську підстанцію з Нововоронезькою АЕС і Шахтинською підстанцією, розташованою в Північно-кавказькій енергосистемі Росії.

Магістральні мережі 330, 400, і 500 кВ в основному були побудовані в 60–70- і роки минулого сторіччя і 60% їх вже вичерпали свій ресурс. Всього в Україні експлуатується близько 1 млн. км ліній усіх класів напруги.

В електричних установках ЕС використовують різні значення напруги. Для зменшення втрат при перетворенні і для забезпечення оптимальної роботи електричних установок ці напруги стандартизовані. На змінному струмі:

– однофазні до 1000 В: 6, 12, 24, 36, 42, 220, 380 В;

– трифазні до 1000 В: 42, 380, 660 В;

– трифазні понад 1000 В: 3, 6, 10, (20), 35, 110, (150), 220, 330, (400), (500), 750 кВ.

На постійному струмі: 6, 12, 24, 48, 60, 110, 220 В, 800 кВ.

Напруги, вказані в дужках, в Україні мають обмежене застосування.

Використовують і нестандартні напруги, головним чином в електричному транспорті (постійна напруга 550 і 1 500 В і однофазна змінна напруга 25 кВ). Напругу для електричної установки вибирають, виходячи з мінімуму капітальних, експлуатаційних витрат, втрат електроенергії і вимог безпеки. У ряді країн поширені напруги, що відрізняються від наведених вище.

Запитання для перевірки

1. Які переваги електричної енергії у порівнянні до інших видів енергії – теплової, механічної?

2. Чи можна відтермінувати процес споживання від процесу виробництва електроенергії?

3. Яким чином запасають електричну енергію?

4. З яких енергетичних ресурсів отримують електричну енергію?

5. Що відносять до нетрадиційних джерел електричної енергії?

6. Яке джерело вважають найбільш перспективним новим джерелом енергії?

7. Що таке електроенергетична система?

8. Наведіть структуру потужностей України;

9. Яка сумарна потужність електростанцій України?

10. Наведіть розподіл виробництва електроенергії за видами енергоносіїв: ядерне паливо; вугілля; газ; гідроенергія; нафта;

11. Назвіть стандартизовані напруги змінного і постійного струмів.

ЕЛЕКТРИЧНІ СТАНЦІЇ

Питання що розглядаються в лекції:

1. Типи електричних станцій.

2. Загальні характеристики електростанцій, технологічні схеми.

Електричні станції. Класичним є метод одержання електричної енергії на електростанціях за допомогою генератора з ротором, що обертається і приводиться в обертання від джерела механічної енергії. Використовують трифазні синхронні електрогенератори через переваги трифазного струму і можливості створювати такі генератори на великі потужності.

Електрична станція – сукупність установок, обладнання і апаратури, що використовуються безпосередньо для виробництва електричної енергії, а також необхідні для цього споруди та будівлі, розташовані на певній території.

Залежно від джерела енергії розрізняють:

– *Теплові електростанції* (ТЕС), які використовують природне паливо;

– *Гідроелектростанції* (ГЕС), що використовують енергію падаючої води загачених річок;

– *Атомні електростанції* (АЕС), які використовують ядерну енергію;

– *Інші електростанції,* які використовують вітрову, сонячну, геотермальну і інші види енергій.

2.1 Теплові електричні станції

Теплові електричні станції (ТЕС). Хімічну енергію горіння палива перетворюють в електричну на ТЕС. Розрізняють конденсаційні (КЕС), які виробляють тільки електричну енергію, і теплофікаційні (теплоелектроцентралі) електростанції (ТЕЦ). На ТЕЦ виробляється електрична і теплова енергія.

На рисунку 2 показана технологічна схема КЕС, що працює на твердому паливі. Вугілля транспортером 1 подають у бункер 2. Розмелене млином 3 до пилоподібного стану вугілля вентилятором 4 разом з необхідним для згоряння попередньо підігрітим у повітронагрівачі 12 повітрям подається через пальники 5 у топкову камеру 6 парового котла 7. Теплота, що виділилася при згорянні суміші, йде на нагрівання води, і в паровому котлі 7, а також барабанах 8 і 9 одержують пару високої температури і тиску. Пара проходить через паропідігрівач 10 і надходить у парову турбіну 15, приводить її в обертання, після чого

направляється в конденсатор 19, де конденсується у воду. Конденсат пари знову подається насосом 18 через пароводяний підігрівник 11 у паровий котел.

Відпрацьовані гази вентилятором 13 після фільтрування викидаються через трубу 14.

Крім основного (пароводяного) є ще охолоджуючий контур. Він складається із змійовика 20, циркуляційного водяного насоса 21 і градирні 22, в якій вода охолоджується навколишнім повітрям.

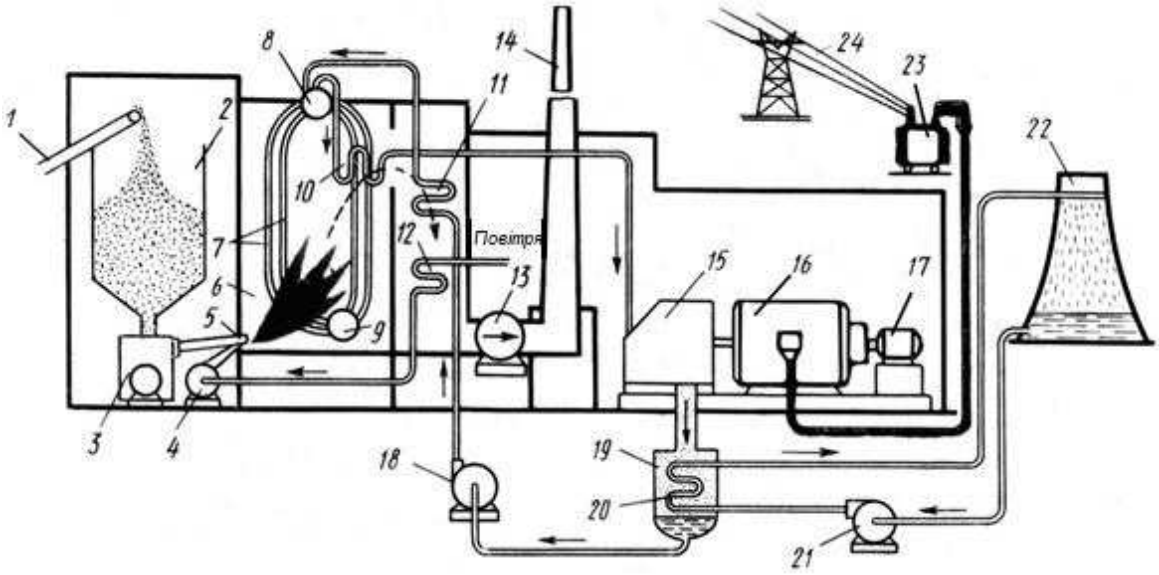

Рисунок 2 – Спрощена технологічна схема КЕС

1 – транспортер вугілля; 2 – бункер вугілля; 3 – млин для розмелювання вугілля; 4 – вентилятор; 5 – пиловугільна горілка; 6– топка; 7 – паровий котел; 8, 9 – барабани нижньої системи циркуляції води і пари; 10 – пароперегрівач; 11 – водонагрівач (економайзер) котла; 112 – підігрівач повітря; 13 – газовий вентилятор (димосос); 14 – димова труба; 15 – парова турбіна; 16 – електрогенератор; 17 – збуджував генератора; 18, 21 – водяні насоси; 19 – конденсатор; 20 – змійовик; 22 – водоохолоджувач (градирня); 23 – силовий трансформатор; 24 – лінія електропередавання

Вироблену електрогенератором 16 електричну енергію після підвищення її напруги в трансформаторі 23 подають до ліній електропередавання 24. Збуджувач 17 призначений для створення струму збудження в генераторі 16.

Теплові електростанції використовують широко поширені паливні ресурси, відносно вільно розміщуються і здатні виробляти електроенергію без сезонних коливань. Їх будівництво ведеться швидко і пов’язане з меншими витратами праці та коштів. Але у ТЕС є істотні недоліки. Вони використовують невідновних ресурси, володіють низьким ККД (30–35 %), роблять украй негативний

вплив на екологічну обстановку. ТЕС усього світу щорічно викидають в атмосферу 20–50 млн т золи і близько 60 млн т сірчистого ангідриду, а також поглинають величезну кількість кисню. Встановлено, що вугілля в мікродозах майже завжди містить $U^{238,}$ Th^{232} і радіоактивний ізотоп вуглецю. Більшість ТЕС не оснащені ефективними системами очищення димових газів від оксидів сірки та азоту. Хоча установки, що працюють на природному газі екологічно істотно чистіше вугільних, сланцевих і мазутних, шкоду природі завдає прокладка газопроводів (особливо в північних районах).

2.2 Теплоелектроцентралі

ТЕЦ (теплоелектроцентралі) це установки з комбінованого виробництва електроенергії та теплоти. Їх ККД доходить до 70 % проти 30–35 % на КЕС. ТЕЦ прив'язані до споживачів, тому що радіус передачі теплоти (пари, гарячої води) складає 15–20 км. Максимальна потужність ТЕЦ менша, ніж КЕС.

Останнім часом з'явилися принципово нові установки:

– газотурбінні установки (ГТ), в яких замість парових застосовуються газові турбіни, що знімає проблему водопостачання;

– парогазотурбінні (ПГУ), де тепло відпрацьованих газів використовується для підігріву води та отримання пара низького тиску;

– магнітогідродинамічні генератори (МГД-генератори), які перетворюють тепло безпосередньо в електричну енергію.

2.3 Атомна електростанція

Атомна електростанція (АЕС), електростанція, в якій атомна (ядерна) енергія перетворюється в електричну. Генератором енергії на АЕС є атомний реактор. Тепло, яке виділяється в реакторі в результаті ланцюгової реакції розпаду ядер деяких важких елементів, потім, як і на звичайних ТЕС, перетворюється в електроенергію. На відміну від ТЕС, що працюють на органічному паливі, виділення теплової енергії на АЕС відбувається при роз-щепленні ядер деяких важких елементів (ізотопи урану-235, урану-233, плутонію-239 і ін.) внаслідок впливу на них повільних нейтронів. При розпаді 1 г ізотопів урану або плутонію вивільняється 22 500 кВт/год, що еквівалентно енергії, яка міститься в 2 800 кг умовного палива.

Набуває поширення нове покоління ядерних реакторів на швидких нейтронах. Крім теплоти для виробництва електроенергії вони відтворюють і ядерне

паливо. У даний час робота таких реакторів багато в чому має експериментальний характер.

На рисунку 1 наведена спрощена технологічна схема одержання пари на АЕС за двоконтурним циклом. Перший контур, що складається з ядерного реактора 2 з кришкою 3 і парогенераторів 9 з їхнім устаткуванням, радіоактивний і забезпечується радіаційним захистом 1. Як теплоносій і одночасно сповільнювач нейтронів використовується звичайна вода (рідше – важка вода).

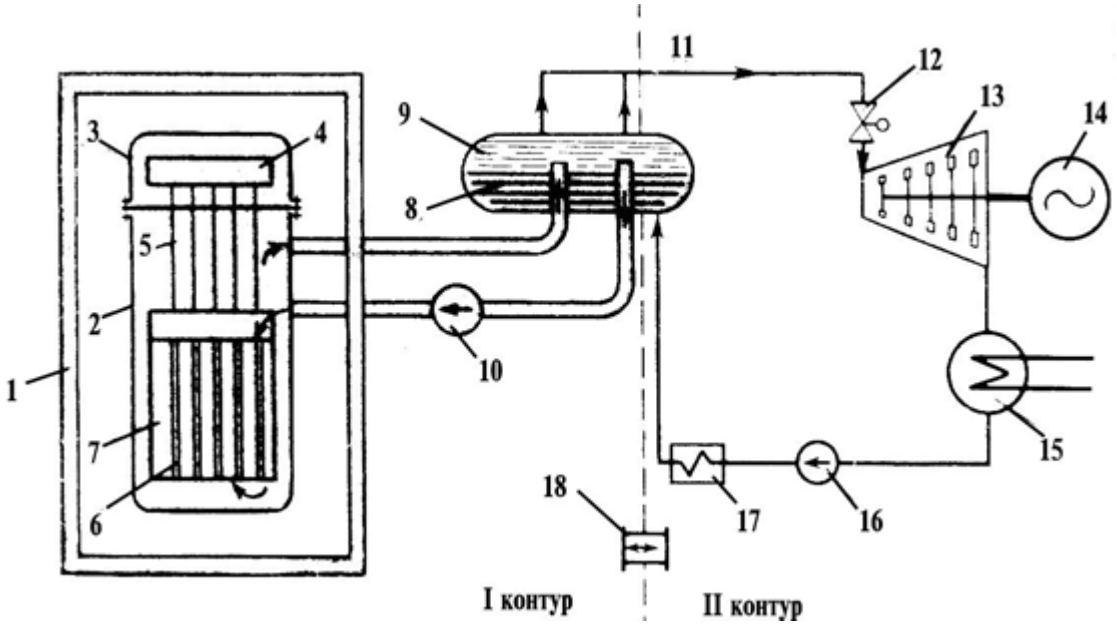

Рисунок 1 – Спрощена технологічна схема АЕС:
1 – біологічний захист ядерної установки; 2 – ядерний реактор; 3 – кришка реактора; 4 – система управління і захисту реактора; 5 – стрижні управління і захисту; 6 – паливні збірки (канали з ядерним збагаченим паливом); 7 – активна зона реактора; 8 – трубна система парогенератора; 9 – парогенератор; 10 – головний циркуляційний насос; 11 – паропровід; 12 – пристрої регулювання подачі пару; 13 – парова турбіна; 14 – електричний генератор; 15 – конденсатор; 16 – насос; 17 – підігрівач води; 18 – санітарний пропускник, який з'єднує перший (радіоактивний) і другий (безпечний)контури АЕС

Другий контур, в який входять також парогенератор 9, парова турбіна 13 і їхнє устаткування, не радіоактивний. Теплота, що виділяється в реакторі при ядерній реакції, нагріває теплоносій (воду в каналах паливних збірок 6). Теплоносієм (робочим тілом) у ньому служать вода і водяна пара. Нагріта до високої температури вода надходить по трубопроводу з реактора в U-подібні трубки 8 парогенератора 9. Тут вона нагріває і випаровує воду другого контуру, перетворюючи її в пару. Охолоджена в парогенераторі радіоактивна вода за допомогою

головного циркуляційного насоса 10 повертається в активну зону 7 реактора, де й розміщені паливні збірки.

З парогенератора чиста нерадіоактивна пара по паропроводу 11 через клапани 12 надходить у турбіну 13, яка обертає електрогенератор 14 для виробництва електроенергії. Відпрацьована пара конденсується в конденсаторі 15 і насосом 16 через підігрівник 17 направляється назад у парогенератор 9. Перший і другий контури АЕС надійно відгороджені і з'єднуються один з одним через санітарний пропускник 18.

Ланцюговою ядерною реакцією в реакторі керують за допомогою керуючих стрижнів 5 системи керування і захисту 4.

Експлуатація АЕС дозволяє заощаджувати значну кількість органічно-го палива, зменшувати забруднення атмосфери вуглекислим газом і оксидами азоту і сірки.

До недоліків АЕС можна віднести труднощі, пов'язані з похованням ядерних відходів, катастрофічні наслідки аварій і теплове забруднення використовуваних водойм.

2.4 Гідроелектростанції

Гідроелектростанції є досить ефективними джерелами енергії. Вони використовують відновлювані ресурси – механічну енергію падаючої води. Необхідний для цього підпір води створюється греблями, які споруджують на річках і каналах. Гідравлічні установки дозволяють скорочувати перевезення і економити мінеральне паливо (на 1 кВт-год витрачається приблизно 0,4 т вугілля). Вони досить прості в управлінні і мають дуже високим коефіцієнтом корисної дії (понад 80 %). Собівартість цього типу установок в 5-6 разів нижче, ніж ТЕС, і вони потребують набагато менше обслуговуючого персоналу.

Гідравлічні установки представлені гідроелектростанціями (ГЕС), гідроакумулюючими електростанціями (ГАЕС) і приливними електростанціями (ПЕС). Їх розміщення багато в чому залежить від природних умов, наприклад, характеру та режиму річки. У гірських районах звичайно зводяться високонапірні ГЕС, на рівнинних річках діють установки з меншим напором, але великою витратою води. Гідробудівництво в умовах рівнин складніше через переважання м'яких основ під греблями і необхідності мати великі водосховища для регулювання стоку. Спорудження ГЕС на рівнинах викликає затоплення прилеглих територій, що приносить значний матеріальний збиток.

ГЕС складається з послідовного ланцюга гідротехнічних споруд, що забезпечують необхідну концентрацію потоку води та створення напору, та енергетичного обладнання, що перетворює енергію рухається під напором води в механічну енергію обертання, яка, у свою чергу, перетворюється в електричну енергію.

Гідравлічні електричні станції (ГЕС). Для одержання електричної енергії використовують енергію води, що рухається. Залежно від джерела використовуваних вод розрізняють ГЕС на проточній воді і з греблями.

На рисунку 2 наведений поперечний розріз ГЕС із греблею.

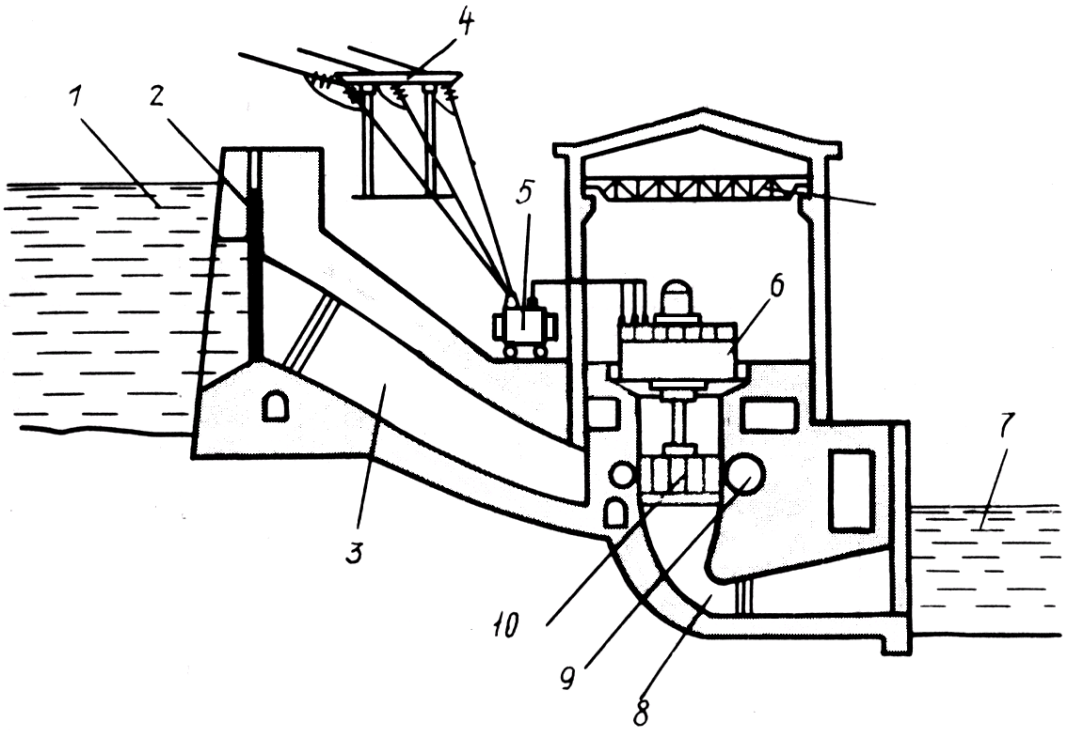

Рисунок 2 – Будова ГЕС:
1 – водойма; 2 – жалюзі греблі; 3 – напірний трубопровід; 4 – лінія електропередавання; 5 – підвищувальний трансформатор; 6 – електричний генератор; 7 – нижня водойма; 8 – нижній трубопровід; 9 – спіральна камера; 10 – гідравлічна турбіна

При відкритому шибері 2 вода з водоймища 1 надходить напірним водоводом 3 до спіральної камери 9, де її направляють до лопаток водяної (гідравлічної) турбіни 10. Турбіна приводить в обертання ротор генератора 6, який виробляє електричну енергію. Після підвищення напруги трансформатором 5 за допомогою лінії передачі 4 електроенергія подається до споживачів.

Особливим видом ГЕС є насосно-акумулюючі гідравлічні (гідроакумулюючі) електростанції (ГАЕС). Їх розташовують між нижньою і верхньою водоймами 1, 7. При великому споживанні електроенергії в енергосистемі ГАЕС

працюють у генераторному режимі: вода з верхньої водойми скидається до гідротурбін, які виробляють електроенергію, і надходить у нижню водойму. Уночі (при мінімальному споживанні електроенергії) воду насосами перекачують з нижньої водойми у верхню.

За встановленою потужністю (у МВт) розрізняють ГЕС потужні (понад 250 МВт), середні (до 25 МВт) і малі (до 5 МВт). Потужність ГЕС залежить від напору $H_б$ (різниці рівнів верхнього та нижнього б'єфу), витрати води Q ($м^3$/сек), використовуваного в гідротурбінах, і ККД гідроагрегату $h_г$. З ряду причин (внаслідок, наприклад, сезонних змін рівня води у водоймах, непостійності навантаження енергосистеми, ремонту гідроагрегатів або гідротехнічних споруд тощо) натиск і витрату води безперервно змінюються, а крім того, змінюється витрата при регулюванні потужності ГЕС. Розрізняють річний, тижневий і добовий цикли режиму роботи ГЕС.

За максимально використовуваному натиску ГЕС діляться на високонапірні (більше 60 м), середньонапірні (від 25 до 60 м) і низьконапірні (від 3 до 25 м). На рівнинних річках напори рідко перевищують 100 м, в гірських умовах за допомогою греблі можна створювати напори до 300 м і більше, а за допомогою деривації – до 1500 м. Класифікація за натиску приблизно відповідає типами застосовуваного енергетичного обладнання: на високонапірних ГЕС застосовують ковшові і радіально– осьові турбіни з металевими спіральними камерами; на середньонапірних – поворотнолопастні і радіально-осьові турбіни з залізобетонними та металевими спіральними камерами, на низьконапірних – поворотнолопастні турбіни в залізобетонних спіральних камерах, іноді горизонтальні турбіни в капсулах або у відкритих камерах. Поділ ГЕС за використовуваним напором має приблизний, умовний характер.

За схемою використання водних ресурсів і концентрації напорів ГЕС зазвичай підрозділяють на руслові, пригреблеві, деривaційні з напірною і безнапірною деривацією, змішані, гідроакумулюючі і приливні. У руслових і схилових ГЕС напір води створюється греблею, що перегороджує річку і піднімає рівень води у верхньому б'єфі. При цьому неминуче деяке затоплення долини річки. У разі спорудження двох гребель на тій же ділянці річки площа затоплення зменшується. На рівнинних річках найбільша економічно допустима площа затоплення обмежує висоту греблі. Руслові та пригреблеві ГЕС будують і на рівнинних багатоводних річках і на гірських річках, у вузьких стислих долинах.

До складу споруд руслової ГЕС, крім греблі, входять будівля ГЕС і водоскидні споруди. Склад гідротехнічних споруд залежить від висоти напору і

встановленої потужності. У руслової ГЕС будівля з розміщеними в ньому гідроагрегатами служить продовженням греблі і разом з нею створює напірний фронт. При цьому з одного боку до будівлі ГЕС примикає верхній б'єф, а з іншого – нижній б'єф. Підвідні спіральні камери гідротурбін своїми вхідними перерізами закладаються під рівнем верхнього б'єфа, вихідні ж перерізи відсмоктуючих труб занурені під рівнем нижнього б'єфу.

Функціонування теплових, атомних і гідравлічних електростанції негативно впливає на стан навколишнього середовища. Тому в даний час велика увага приділяється вивченню можливостей використання нетрадиційних, альтернативних джерел енергії.

Запитання для перевірки

1. Наведіть класифікацію електричних станцій.
2. Що таке електрична станція?
3. Наведіть схему теплової станції і опишіть її.
4. Опишіть принципи роботи теплової станції.
5. Наведіть схему теплоелектроцентралі і опишіть її.
6. Опишіть принципи роботи теплоелектроцентралі.
7. Наведіть схему атомної станції і опишіть її.
8. Опишіть принципи роботи атомної станції.
9. Наведіть схему гідроелектростанції і опишіть її.
10. Опишіть принципи роботи гідроелектростанції.

АЛЬТЕРНАТИВНІ ДЖЕРЕЛА

Питання що розглядаються в лекції:

1. Альтернативні джерела електричної енергії.

2. Енергія навколишнього простору.

3. Вітроенергетика і мала гідроенергетика.

4. Біоенергетика. Геліоенергетика. Інші нетрадиційні джерела енергії.

3.1 Сонячна електростанція з технологією прямого використання сонячної енергії

Потужність сонячної радіації, поглинутої атмосферою і земною поверхнею, складають 105 ТВт (10^12 Вт). Ця величина здається величезною в порівнянні з сучасним світовим енергоспоживанням, рівним 10 ТВт. Тому її вважають найбільш перспективним видом нетрадиційної (альтернативної) енергетики.

До основних методів перетворення сонячної енергії відносяться, перш за все, методи прямого використання сонячної енергії – фотоелектричне перетворення і термодинамічний цикл, а також біоконверсія.

Фотоелектричний метод перетворення сонячної енергії заснований на особливостях взаємодії напівпровідникових матеріалів зі світловим випромінюванням. У фотоелектричному перетворювачі вільні носії утворюються в результаті поглинання світлового кванта напівпровідником, поділ зарядів проводиться під дією електричного поля, що виникає всередині напівпровідника. Теоретично ККД перетворювача може досягати 28 %.

Низька щільність сонячного випромінювання є однією з перешкод його широкого використання. Для усунення цього недоліку при конструюванні фотоелектричних перетворювачів використовуються різного роду концентратори випромінювання. Головні переваги фотоелектричних установок полягають в тому, що вони не мають рухомих частин, їх конструкція дуже проста, виробництво – технологічне. До їх недоліків можна віднести руйнування напівпровідникового матеріалу в плині часу, залежність ефективності роботи системи від її запиленості, необхідність розробки складних методів очищення батарей від забруднення. Все це обмежує термін служби фотоелектричних перетворювачів.

Гібридні станції, що складаються з фотоелектричних перетворювачів і дизельних генераторів, вже широко використовуються для електропостачання на територіях, де відсутні розподільні електричні мережі. Енергію отримують з

сонячної енергії методом термодинамічного перетворення практично так само як з інших джерел. Однак такі особливості сонячного випромінювання як низька потужність, добова і сезонна мінливість, залежність від погодних умов, накладають певні обмеження на конструкцію термодинамічних перетворювачів.

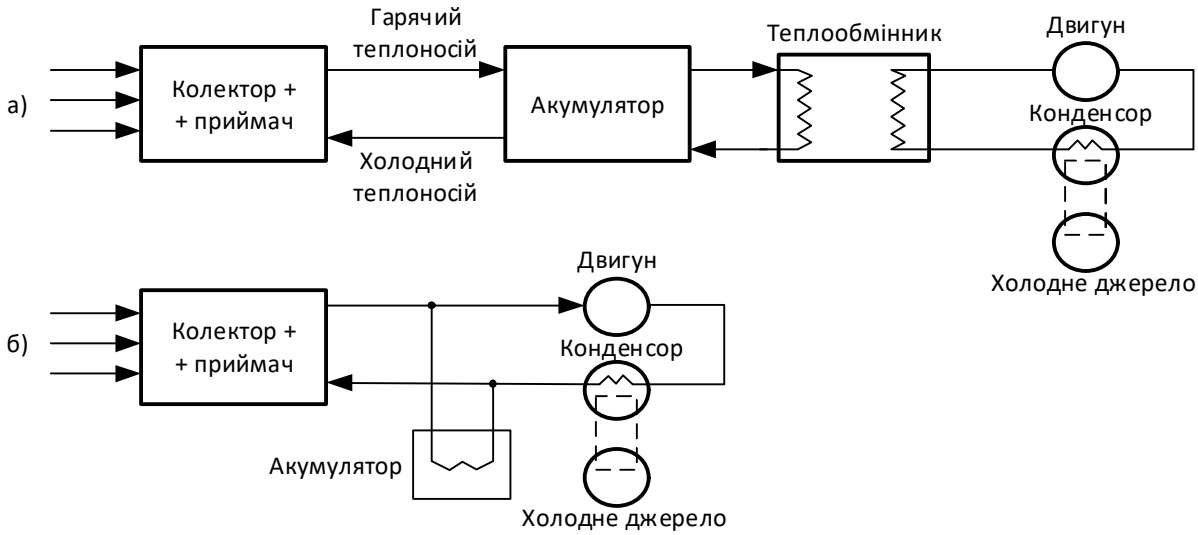

Рисунок 1 – Схема термодинамічного перетворювача сонячної енергії:
а – схема з теплообмінником, б – схема без теплообмінника

Звичайний термодинамічний перетворювач сонячної енергії містить (рис. 1) систему уловлювання сонячної радіації, яка призначена частково компенсувати низьку щільність сонячного випромінювання; приймальну систему, яка перетворює сонячну енергію в енергію теплоносія; систему перенесення теплоносія від приймача до акумулятора або до теплообмінника; тепловий акумулятор, який забезпечує пом'якшення залежності від добової мінливості і погодних умов; теплообмінники, що утворюють нагрівальний і охолоджувальний джерела теплової машини.

Для середньотемпературного акумулювання (від 100^0 до 550^0 С) використовуються гідрати оксидів лужноземельних металів. Високотемпературне акумулювання (температура вище 550^0 С) здійснюється за допомогою оборотних екзо- ендотермічних реакцій.

В даний час ідеї термодинамічного перетворення реалізуються в схемах двох типів: геліостати баштового типу і станції з розподіленим приймачем енергії.

Ширшому запровадженню сонячної енергетики перешкоджає вища вартість виробництва на сонячних електростанціях у порівнянні з традиційними джерелами енергії.

3.2 Сонячна електростанція, біоконверсія сонячної енергії

Найдавніший, і нині широко застосовуваний спосіб отримання енергії з біомаси полягає в її спалюванні. У сільській місцевості до 85 % енергії отримують цим способом. Як паливо, біомаса має ряд переваг перед викопними видами. Перш за все – це відновлюване джерело енергії. При спалюванні біомаси виділяється в 10–20 разів менше сірки та в 3–5 разів менше золи, ніж при спалюванні вугілля. Кількість вуглекислого газу, що виділився при спалюванні біомаси, дорівнює кількості вуглекислого газу, витраченого в процесі фотосинтезу.

Енергію біомаси можна отримувати зі спеціальних сільськогосподарських культур. До перспективних видів відносяться швидкозростаючі дерева, рослини, багаті вуглеводами, які застосовуються для отримання етилового спирту (наприклад, цукрова тростина, кукурудза, сорго, амарант та інші).

Широко поширений спосіб отримання енергії з біомаси полягає в отриманні біогазу шляхом анаеробного бродіння. Цей газ містить близько 70 % метану. Біометаногенез був відкритий ще в 1776 році Вольта, який виявив вміст метану в болотному газі. Біогаз дозволяє використовувати газові турбіни, які є найсучаснішими засобами теплоенергетики. Для його виробництва використовуються органічні відходи сільського господарства і промисловості. Цей напрямок є одним з перспективних способів вирішення проблеми енергозабезпечення сільських районів. Наприклад, з 300 т сухого гною, перетвореного в біогаз, вихід енергії становить близько 30 т нафтового еквівалента.

Біомасу для подальшого отримання біогазу, можна вирощувати в водному середовищі, культивуючи водорості і мікроводорості.

3.3 Припливна електростанція

Припливна електростанція (ПЕС), електростанція, що перетворює енергію морських припливів в електричну. ПЕС використовує перепад рівнів «повної» та «малої» води під час припливу і відливу. Перекривши греблею затоку моря, або гирло річки, що впадає в море (океан) і утворивши водойму, (називають басейном ПЕС), можливо при достатньо високій амплітуді припливу (> 4 м) створити напір, достатній для обертання гідротурбін і з'єднаних з ними гідрогенераторів, розміщених у тілі греблі.

При одному басейні і правильному півдобовому циклі припливів ПЕС може виробляти електроенергію безперервно протягом 4–5 год з перервами

відповідно 1–2 год чотири рази за добу (така ПЕМ називається одно басейновою двосторонньої дії). Для усунення нерівномірності вироблення електроенергії басейн ПЕС можна розділити греблею на два чи три менших басейну, в одному з яких підтримується рівень «малої», а в іншому – «повної» води, третій басейн – резервний; гідроагрегати встановлюються в тілі розділової греблі. Але і цей захід повністю не виключає пульсації енергії, зумовленої циклічністю припливів протягом півмісячного періоду. При спільній роботі в одній енергосистемі з потужними тепловими (в т. ч. і атомними) електростанціями енергія, що виробляється ПЕС, може використовуватися для участі в покритті піків навантаження енергосистеми, а якщо входять в цю ж систему ГЕС, що мають водосховища сезонного регулювання, можуть компенсувати коливання енергії припливів.

На ПЕС встановлюють капсульні гідроагрегати, які можуть використовуватися з відносно високим коефіцієнтом корисної дії в генераторному (прямому і зворотному) і насосному (прямому і зворотному) режимах, а також як водопропускні отвори. У години, коли мале навантаження енергосистеми збігається за часом з «малою» або «повною» водою в морі, гідроагрегати ПЕС або відключені, або працюють в насосному режимі – підкачують воду в басейн вище рівня припливу (або відкачують нижче рівня відливу) і таким чином акумулюють енергію до того моменту, коли в енергосистемі настане пік навантаження. У випадку, якщо приплив чи відплив збігається за часом з максимумом навантаження енергосистеми, ПЕМ працює в генераторному режимі.

Використання припливної енергії обмежене головним чином високою вартістю спорудження ПЕМ (приблизно в 2,5 рази більше, ніж звичайної річкової ГЕС такої ж потужності).

3.4 Хвильова електростанція

Хвильова електростанція – установка, розташована в водному середовищі, метою якої є отримання електроенергії з кінетичної енергії хвиль.

Останнім часом багато вчених і конструкторів звертають увагу на використання різних видів енергії Світового океану. Побудовано перші приливні електростанції, розробляються методи використання теплової енергії океану, пов’язаної, наприклад, зі значною різницею температур поверхневого і глибинного шарів океану, що досягає в тропічних областях 20 ° С і більше. На сьогодні накопичений значний обсяг вимірювань вітрового хвилювання в Світовому

океані на основі яких хвильова кліматологія визначає райони з найбільш інтенсивним і постійним хвилюванням.

Перша заявка на патент хвильової електростанції була подана в Парижі в 1799 р Уже в 1890 р була зроблена перша спроба практичного використання енергії хвиль, але перша хвильова електростанція потужністю 2,25 МВт увійшла в комерційну експлуатацію тільки в 2008 р в Португалії.

У більшості проектів хвильових електростанцій передбачається використовувати двоступеневу схему перетворення. На першому етапі енергія передається від хвилі до тіла-поглинача і таким чином концентрується хвильова енергії. На другому етапі ця енергія перетворюється в вид, зручний для споживання. Існує три основних типи проектів по вилученню хвильової енергії. У першому використовується метод підвищення концентрації хвильової енергії та перетворення її в потенційну енергію води. У другому – тіло з декількома ступенями свободи знаходиться біля поверхні води. Хвильові сили, які діють на тіло, передають йому частину хвильової енергії. Основним недоліком такого проекту є вразливість тіла, що знаходиться під дією хвиль. У третьому типі проектів, система, що поглинає енергію, знаходиться під водою. Передача хвильової енергії відбувається під дією хвильового тиску або швидкості.

У ряді хвильових установок для підвищення ефективності щільність хвильової енергії штучно підвищується. Змінюючи рельєф дна в прибережній зоні, можна сконцентрувати морські хвилі подібно лінзі, котра фокусує світлові хвилі. Якщо сфокусувати хвилі з побережжя завдовжки в кілька кілометрів на фронті в 500 м, то висота хвилі може досягти 30 м. Потрапляючи в спеціальні споруди, вода піднімається на висоту в 100 м. Енергія піднятої води може бути використана для роботи гідроелектростанції, розташованої на рівні океану. Хвильова електростанція подібного типу використовується для забезпечення електроенергією острова Маврикій, що не має традиційних джерел енергії.

Ряд пристроїв з перетворення хвильової енергії використовує різні властивості хвильових рухів: періодичні зміни рівня водної поверхні, хвильового тиску або швидкості хвиль. Коефіцієнт використання хвильової енергії досягає 40%. Електроенергія передається на берег кабелем. В Японії створено промисловий зразок такої системи, яка має 9 турбін загальною потужністю в 2 МВт.

Хвильова енергетика не використовує викопне паливо, перед нею не стоїть в гострій формі проблема впливу на навколишнє середовище. Однак в даний час виробництво 1 кВт електроенергії на хвильових електростанціях в 5–10 разів вище, ніж на АЕС або ТЕС. Крім того, якщо значна частина акваторії буде покрита хвильовими перетворювачами, це може привести до неприємних еко-

логічних наслідків, оскільки хвилі відіграють важливу роль в газообміні атмосфери і океану, в очищенні поверхні моря і приводного шару повітряного потоку від забруднення.

Тому хвильову енергетику слід розглядати тільки як додаткове до традиційних джерело енергії, яке може мати значення тільки в окремих районах світу.

3.5 Вітроелектростанція

Вітроелектростанція виробляє електроенергію в результаті перетворення енергії вітру. Основне обладнання станції – вітродвигун і електричний генератор. Споруджують переважно в районах з стійким вітровим режимом.

Людство давно використовує енергію вітру. Вітрильні судна – основний вид транспорту, який протягом століть забезпечував зв'язок людей різних континентів є найбільш яскравий приклад використання вітрової енергії.

Інший, добре відомий приклад – вітряні млини. Вітряки широко використовувалися для відкачування води з колодязів. В кінці минулого століття настав новий етап використання вітрових установок – вони почали застосовуватися для виробництва електроенергії. У тридцяті роки минулого століття мільйони вітрових електрогенераторів потужністю близько 1 кВт використовувалися в сільській місцевості Європи, Америки, Азії. В міру розвитку центрального електропостачання поширення вітрових електрогенераторів різко впало. З ростом вартості викопного палива і усвідомлення екологічних наслідків його застосування надії багатьох дослідників знову стали зв'язуватися з вітровою енергетикою.

Дійсно вітровий потенціал величезний – близько 2 000 ТВт становить потужність вітрового потоку в атмосфері. Використання навіть невеликої частини цієї потужності призвело б до вирішення енергетичних проблем людства.

В той же час вітрові електрогенератори створюють широкий спектр негативних екологічних наслідків.

Головні недоліки вітрової енергетики – низька енергетична щільність, сильна мінливість залежно від погодних умов, яскраво виражена географічна нерівномірність розподілу. Зазвичай робочий діапазон швидкостей вітру великих вітрових установок становить від 5 до 15 м / с. При швидкості вітру меншій 5 м/с ефективність роботи установки падає, при швидкостях вітру більших 15 м/с велика ймовірність поломки конструкції, перш за все лопатей. Розміщення генераторів на великих висотах (де більше швидкість вітру) вимагає підвищеної

міцності конструкції висотних щогл, які повинні забезпечувати утримання при потужному вітровому навантаженні ротора, коробки передач і генератора. Розробка і створення більш надійних конструкцій значно здорожує вартість вітрових установок, хоча собівартість вітрової електроенергії приблизно в 1,5–2 рази нижча собівартості електроенергії, отриманої в фотоелектричних перетворювачах.

Ще однією важливою проблемою використання вітрових генераторів є сильні вібрації їх несучих частин, які передаються в ґрунт. Значна частина звукової енергії припадає на інфразвуковий діапазон, для якого характерний негативний вплив на організм людей і багатьох тварин.

Швидкість обертання лопатей вітрових генераторів близька до частоти синхронізації телебачення ряду країн, тому робота вітрових генераторів може порушувати прийом телепередач в радіусі 1–2 км від генератора. Вітрові генератори є також джерелами радіоперешкод. Обертання лопатей вітрових генераторів губить птахів. Зазвичай вітрові установки розташовуються у великих кількостях в районах сильних вітрів (хребти, морське узбережжя), тому вони можуть призводити до порушення міграції перелітних птахів. Модуляція вітрового потоку лопатями створює деяку подібність регулярних структур в повітрі, які заважають орієнтації комах. У Бельгії встановили, що це призводить до порушення стійкості екосистем полів, розташованих в зоні вітрових установок, зокрема спостерігається падіння врожайності.

Нарешті, вітрова енергетика вимагає великих площ для розміщення установок. Тому системи вітрових установок намагаються розміщати в безлюдній місцевості, що в свою чергу здорожує вартість передачі енергії.

На сьогодні в світі почався перехід від дослідницьких робіт в галузі вітрової енергетики до їх широкого впровадження. Темпи розвитку вітрової енергетики в таких країнах як США, Бельгія, Великобританія, Норвегія, які мають високий вітроенергетичний потенціал, залишаються дуже високими.

3.6 Геотермальна електростанція

Геотермальна електростанція – паротурбінна електростанція, яка використовує глибинне тепло Землі. У вулканічних районах термальні глибинні води нагріваються до температури понад 100 ° С на порівняно невеликій глибині, звідки вони тріщинками земної кори виходять на поверхню. На геотермічних електростанціях пароводяна суміш виводиться з бурових свердловин і прямує в

сепаратор, де пара відокремлюється від води; пара надходить у турбіни, а гаряча вода після хімічного очищення використовується для потреб теплофікації.

Схеми отримання енергії за рахунок геотермальних ресурсів показані на рисунку 2.

Геотермальні станції успішно функціонують в ряді країн – Італії, Ісландії, США. Перша в світі геотермальна електростанція була побудована в 1904 г. в Італії. Геотермальна енергія в Ісландії почала використовуватися в 1944 г. Однак інтерес до використання геотермальної енергії різко виріс в 60-70 роки минулого століття.

Рисунок 2 – Схеми отримання енергії за рахунок геотермальних ресурсів: А – використання сухої пари, Б – використання гарячої води, В – використання гарячої води шляхом нагрівання робочої рідини

У США в Каліфорнії на початку 90 років минулого століття діяло близько 30 станцій загальною потужністю 2400 МВт. Пара для цих станцій використовувалася з глибин від 300 до 3000 м. У цьому штаті США за 30 років потужність геотермальних станцій зросла майже в 200 разів. Найбільш доступна геотермальна енергетика в зонах підвищеної вулканічної діяльності і землетрусів. Така прив'язка до певних районів є одним з недоліків геотермальної енергетики. Гейзери – це добре відома форма надходження на поверхню Землі гарячої води і пари. За оцінкою Геологічного управління США розвідані джерела геотермальної енергії могли б дати 5–6 % сучасного споживання електроенергії в країні. Оцінка перспективних джерел дає величину приблизно в 10 разів більшу. Однак експлуатація деяких цих джерел поки що нерентабельна. Поряд з цими ресурсами, які можуть бути використані для вироблення електроенергії, в ще більшій кількості є вода з температурою 90–150^0 С, яка придатна для обігріву. У перспективі для добування енергії з надр Землі можливе використання не тільки запасів гарячої води й пари, а й тепла сухих гірських порід (такі сухі гірські породи з температурою близько 300^0 С зустрічаються значно частіше, ніж

водоносні гарячі породи), а також енергії магматичних вогнищ, які в деяких районах розташовані на глибинах в кілька кілометрів.

Оскільки геотермальна пара і вода мають порівняно низьку температуру і тиск, ККД геотермальних станцій не перевищує 20 %, що значно нижче атомних (30 %) і теплових, які працюють на викопному паливі (40 %).

Використання геотермальної енергії має деякі негативні екологічні наслідки. Будівництво геотермальних станцій порушує «роботу» гейзерів. Для конденсації пари на геотермальних станціях використовується велика кількість води для охолодження, тому геотермальні станції є джерелом теплового забруднення. За однакової потужності з ТЕС або АЕС геотермальна електростанція споживає для охолодження значно більшу кількість води, тому що її ККД нижчий. Скидання сильно мінералізованої геотермальної води в поверхневі водойми може призвести до порушення їх екосистем. В геотермальних водах у великих кількостях міститься сірководень і радон, який викликає радіоактивні забруднення навколишнього середовища.

Запитання для перевірки

1. Які джерела енергії називають альтернативними?
2. Охарактеризуйте переваги альтернативних джерел енергії.
3. Поясніть принципи роботи фотоелектричних перетворювачів.
4. Назвіть основні переваги і недоліки фотоелектричних перетворювачів.
5. Наведіть схему сонячної електростанції з термодинамічним перетворювачем сонячної енергії в електричну і опишіть її.
6. Наведіть схему електростанції на біомасі і охарактеризуйте її.
7. Наведіть схему приливної електростанції і її характеристики.
8. Опишіть хвильову електростанції і наведіть її схему.
9. Наведіть схему вітроелектростанції і опишіть її.

СТРУКТУРА СПОЖИВАЧІВ ЕЛЕКТРИЧНОЇ ЕНЕРГІЇ. ПОКРИТТЯ ГРАФІКА НАВАНТАЖЕНЬ ЕНЕРГОСИСТЕМИ ЕЛЕКТРОСТАНЦІЯМИ

4.1 Структура споживачів електричної енергії

Залежно від виконуваних функцій, можливостей забезпечення живлення від енергосистеми, величини потужності та режимів споживання електроенергії, особливостей користування електроенергією споживачі електроенергії поділяють на такі основні групи: промислові та прирівняні до них; виробничі сільськогосподарські; побутові; суспільно-комунальні (установи, організації, підприємства торгівлі та громадського харчування та ін.).

До промислових споживачів відносяться такі підприємства: будівельні, транспорту, шахти, рудники, кар'єри, нафтові, газові та інші промисли, зв'язку, комунального господарства та побутового обслуговування. Найбільш енергоємною групою споживачів електричної енергії є промислові споживачі. Кожна з груп споживачів має певний режим роботи. Так, наприклад, електричне навантаження комунально-побутових споживачів з переважно освітлювальним навантаженням відрізняється великою нерівномірністю в різний час доби. Вдень навантаження невелике, ввечері воно зростає до максимуму, вночі різко падає і до ранку знову зростає.

Наочне уявлення про характер зміни електричних навантажень в часі дають графіки навантажень. За тривалістю вони можуть бути добовими і річними. Якщо відкладати по осі абсцис години доби, а по осі ординат споживану в кожен момент часу потужність у відсотках від максимальної потужності, то отримаємо добовий графік навантаження.

На рисунку 1 зображені добові графіки освітлювального навантаження міста для зимового (жовтень – березень) і літнього (квітень – вересень) періодів. Максимальне навантаження для зимових діб настає між 17 і 20 годинами (крива а), а для літніх – між 22 і 23 годинами (крива б). Таким чином, влітку максимум (потужність в години пік) наступає пізніше і значно менший за величиною, ніж взимку. Денний мінімум також зменшується.

На рисунку 2 зображені характерний добовий графік активної потужності (у відсотках від максимальної потужності) великого міста.

На графіку чітко видно два піки навантаження – денний та вечірній

Електричне навантаження промислових підприємств більш рівномірне протягом дня і залежить від виду виробництва, режиму робочого дня і кількості змін. Графіки навантаження підприємств більш різноманітні.

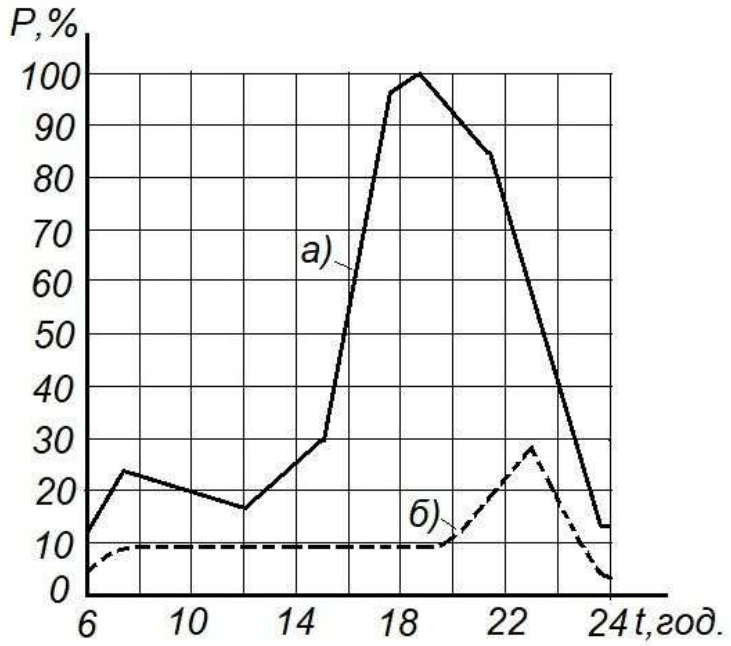

Рисунок 1 – Добові графіки освітлювального навантаження міста: а) – взимку; б) – влітку

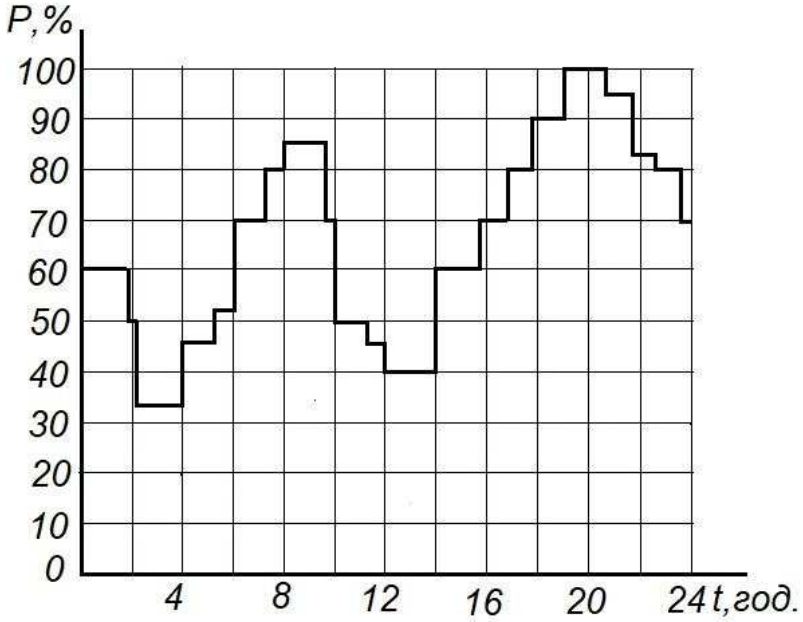

Рисунок 2 – Зимовий добовий графік електричного навантаження великого міста

Головним у формуванні графіка навантаження електричної системи є навантаження споживачів.

Необхідно розрізняти поняття споживач і приймач електричної енергії.

Споживач електричної енергії – це електроприймач або група електроприймачів, об’єднаних технологічним процесом, які розміщуються на певній території [ПУЕ].

Приймач електричної енергії – це апарат, агрегат, механізм призначений для перетворення електричної енергії в інший вид енергії [ПУЕ].

Найчастіше приймачі входять до складу споживачів, одночасно вони самі можуть бути в статусі споживачів.

Залежно від експлуатаційно-технічних ознак усі приймачі поділяються:

за режимом роботи:

– з тривало незмінним або малозмінним навантаженням, за якого вони можуть працювати тривалий час без підвищення температури окремих своїх частин понад допустиму;

– з короткочасним навантаженням, при якому за час роботи температура їхніх окремих частин не досягає усталеного значення, а в період відключення вони практично встигають охолодитися до температури довкілля;

– з повторно-короткочасним навантаженням, за якого робочі періоди чергуються з періодами відключення; при цьому за час роботи нагрів окремих частин приймачів не перевищує допустимого, а за час відключення вони не встигають охолодитися до температури довкілля;

за потужністю та напругою:

– великої потужності (80–100 кВт і вище) напругою 6–10 кВ;

– малої та середньої потужності (нижче 80 кВт) напругою 0,38–0,66 кВ;

за родом струму:

– змінного струму частотою 50 Гц;

– змінного струму підвищеної або зниженої частоти;

– постійного струму.

за необхідним ступенем надійності живлення залежно від наслідків, які можуть мати місце при раптовому припиненні подачі електроенергії, поділяються на три категорії [ПУЕ]:

– *електроприймачі I категорії* – це електроприймачі, переривання електропостачання яких може спричинити: небезпеку для життя людей, значний матеріальний збиток споживачам електричної енергії з(пошкодження дорогого основного обладнання, масовий брак продукції), розлад складного технологічного процесу, порушення функціонування особливо важливих елементів комунального господарства. До цієї категорії належать приймачі операційних лікарень, шахт, залізниць, доменних і електролізних цехів, телевізійних центрів, радіостанцій, центральних вузлів радіозв'язку і телеграфу, телефонних станцій, водопроводу та каналізації, метро, споруд і об'єктів із масовим скупченням людей, що діють при штучному освітленні (театри, центральні універмаги, стадіони тощо.), а також сукупність міських споживачів із загальним навантаженням

більше 10 МВА і тваринницькі комплекси, які виробляють продукцію на промисловій основі.

У складі приймачів І категорії виділяється особлива група електроприймачів, безперебійна робота яких є необхідною для безаварійної зупинки виробництва з метою запобігання загрозі життю людей, вибухам, пожежам і пошкодженням високовартісного основного обладнання, втраті важливої інформації.

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

До цієї категорії належать приймачі цехів масового потокового виробництва машинобудівної промисловості, підприємства легкої промисловості, водопровідні й каналізаційні підкачування, крупні магазини, фабрики-пральні, будівлі висотою більше п’яти поверхів, багатоквартирні будинки з електроплитами, адміністративно-суспільні, лікувальні, дитячі установи, школи та навчальні заклади, групи міських споживачів із загальним навантаженням від 300 до 1000 кВА.

– *електроприймачі ІІІ категорії* – решта електроприймачів, що не підпадають визначенням І і ІІ категорій.

Остаточно категорії надійності узгоджуються замовником проекту електропостачання споживача від зовнішніх джерел електроенергії.

Електроприймачі І категорії необхідно забезпечувати електроенергією від двох незалежних взаєморезервуючих джерел живлення, і перерву в їх електропостачання в разі порушення електропостачання від одного з джерел живлення можна допускати лише на час автоматичного відновлення живлення.

Перемикання джерел живлення потрібно здійснювати за мінімально короткий час і по можливості не змінювати режим роботи обладнання споживачів.

Для електропостачання особливої групи електроприймачів І категорії має передбачатися живлення від третього незалежного взаєморезервуючого джерела живлення.

Як третє незалежне джерело живлення для особливої групи електроприймачів і як друге незалежне джерело живлення для решти електроприймачів І категорії може бути використано місцеві електростанції, електростанції енергосистем (зокрема, шини генераторної напруги), спеціальні агрегати безперебійного живлення, акумуляторні батареї тощо.

Електроприймачі ІІ категорії необхідно забезпечувати електроенергією від двох взаєморезервуючих джерел живлення.

Для електроприймачів ІІ категорії в разі порушення електропостачання від одного з джерел живлення переривання електропостачання є допустимим на час, необхідний для увімкнення резервного джерела живлення діями чергового персоналу або виїзної бригади.

Допускається живлення електроприймачів ІІ категорії однією повітряною лінією, у тому числі з кабельною вставкою, якщо забезпечена можливість проведення аварійного ремонту цієї лінії за час не більше 1 доби. Допускається також живлення однією кабельною лінією, яка складається не менш ніж із двох кабелів, приєднаних до одного загального апарата. За наявності централізованого резерву трансформаторів і можливості заміни трансформатора, що пошкодився, за час не більше 1 доби допускається живлення електроприймачів ІІ категорії від одного трансформатора.

Для електроприймачів ІІІ категорії електропостачання може здійснюватися від одного джерела живлення за умови, що час переривання електропостачання, необхідний для ремонту або заміни пошкодженого елемента системи електропостачання, не перевищує однієї доби.

Незалежним називається джерело живлення, на якому зберігається напруга у разі її зникненні на іншому або інших джерелах живлення.

До незалежних джерел живлення належать дві секції або системи шин однієї чи двох електростанцій та підстанцій за одночасного виконання таких умов:

1) кожна з секцій або систем шин, у свою чергу, має живлення від незалежного джерела живлення;

2) секції або системи шин не пов’язані між собою або мають зв’язок, що автоматично вимикається в разі порушення нормальної роботи однієї з секцій (систем) шин.

До незалежних джерел живлення належать також агрегати безперебійного живлення, акумуляторні батареї та інші джерела електричної енергії, які здатні в автономному режимі забезпечувати електроприймачі електричною енергією.

4.2 Покриття графіка навантажень енергосистеми електростанціями

Навантаження електричної системи складається з:

1. Навантаження споживачів, приєднаних до системи.

2. Потужності обміну із сусідніми системами (залежно від умов може змінювати напрямок).

3. Потужності власних потреб електростанцій.

4. Втрат потужності в мережах.

Навантаження електричної системи (рис. 4.3) розподіляється між електростанціями.

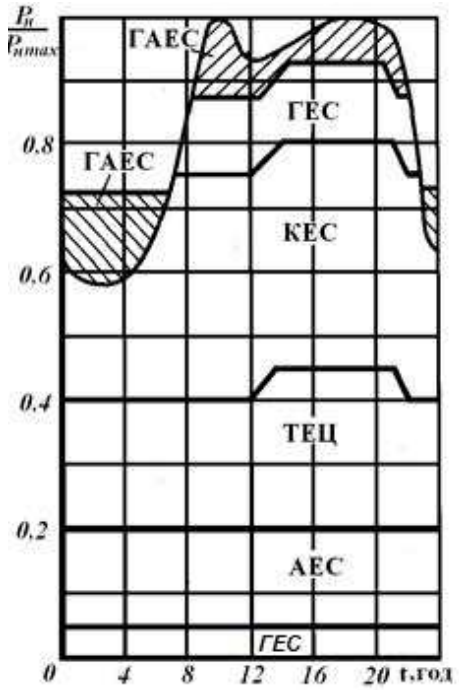

Рисунок 3 – Добовий графік навантаження системи і заповнення його електростанціями

Покриття базової частини добового графіка покладають:

1. На АЕС, регулювання потужності яких важке.

2. На ТЕЦ, максимальна економічність яких має місце, коли електрична потужність відповідає тепловому споживанню (мінімальний пропуск пари на ступені низького тиску й у конденсатор).

3. На ГЕС у розмірі, що відповідає мінімальному пропуску води, необхідному по санітарним нормам й умовам судноплавства. Під час водопілля також доцільна робота ГЕС у базовому режимі, щоб не скидати надлишок води даремно.

Покриття пікової частини графіка покладають на ГЕС і ГАЕС. Інша частина графіка, частково вирівняна навантаженням ГАЕС при роботі їх у насосному режимі, може бути покрита КЕС, робота яких найбільш економічна при даному навантаженні. Чим більш нерівномірний графік навантаження, тим більша потужність ГЕС і ГАЕС необхідна.

Режими роботи електростанцій, об’єднаних в електричну систему, визначаються диспетчерським управлінням системи з тим, щоб отримати найбільший економічний результат по системі в цілому.

Запитання для перевірки

1. Дайте визначення споживача електроенергії.
2. Дайте визначення приймача електроенергії.
3. Які споживачі відносяться до промислових?
4. Як поділяються приймачі за напругою та потужністю?
5. На які категорії поділяються приймачі електроенергії за надійністю електропостачання?
6. Дайте визначення приймачів першої категорії.
7. Дайте визначення приймачів другої та третьої категорій.
8. Яке джерело живлення називається незалежним?
9. З чого складається навантаження електричної системи?
10. Які електростанції покривають базову частину графіка навантаження?

ЕЛЕКТРИЧНІ МЕРЕЖІ, КЛАСИФІКАЦІЯ. ЛІНІЇ ЕЛЕКТРОПЕРЕДАВАННЯ. ПІДСТАНЦІЇ ТА РОЗПОДІЛЬЧІ ПРИСТРОЇ

5.1 Будова і призначення електричних мереж

Електричну енергію від джерел до споживачів передають за допомогою електричних мереж. До їхнього складу входять всі споруди з передачі, перетворення і розподілу електричної енергії: трансформаторні підстанції, відкриті й закриті розподільчі установки, лінії електропередавання.

Електричні мережі класифікують за:

– видом струму – постійного і змінного струму;

– значенням напруги – низької (до 1 кВ), середньої (від 1 до 35 кВ), високої (від 35 до 400 кВ) і надвисокої (понад 400 кВ) напруги;

– призначенням – міжсистемні, магістральні і розподільні;

– конструктивним виконанням – повітряні, кабельні, внутрішні.

Для передачі й розподілу електричної енергії використовують переважно мережі змінного струму з частотою 50 Гц, а в деяких країнах Азії й Америки – 60 Гц.

Міжсистемні електричні мережі (лінії електропередавання – ЛЕП) служать для зв'язку між окремими електроенергетичними системами, магістральні мережі – для транспортування енергії від електростанцій до районних підстанцій, розподільні мережі – для розподілу електроенергії між споживачами.

Спорудження високовольтних електричних мереж дозволяє передавати електричну енергію на великі відстані при порівняно невеликих її втратах. Втрати потужності збільшуються пропорційно квадрату сили струму $\Delta P = I^2R$. Передача великих потужностей при низькій напрузі струму технічно недоцільна і економічно невигідна (необхідно збільшувати переріз проводів).

Приклад. Визначити втрати потужності в однофазній лінії електропередавання (фаза і нуль) довжиною l = 150 км і cosφ = 1 з перерізом проводів S = 35 мм^2, при передачі потужності P = 100 кВт при напрузі 10 і 100 кВ, питомий опір алюмінієвих проводів ρ = 0,028 Ом мм^2/м.

1. Визначимо опір проводів лінії електропередавання:

$$R = \rho\frac{2l}{S} = 0{,}028 \times \frac{2 \times 150000}{35} = 240 \text{ Ом}.$$

2. Сила струму при напрузі 10 кВ і 100 кВ відповідно:

$$I_{10} = \frac{P}{U} = \frac{100000}{10000} = 10 \text{ А};$$

$$I_{100} = \frac{P}{U} = \frac{100000}{100000} = 1 \text{ А}.$$

3. Втрати потужності при передачі енергії залежно від напруги:

$$\Delta P_{10} = I^2R = 10^2 \cdot 240 = 24000\text{Вт} = 24\text{кВт};$$
$$\Delta P_1 = I^2R = 1^2 \cdot 240 = 240\text{Вт} = 0{,}24\text{кВт}.$$

З отриманих результатів видно, що передача потужності при напрузі 10 кВ приводить до великих втрат, які дорівнюють 1/4 переданої електричної енергії. При напрузі 100 кВ ці втрати незначні.

Електричні мережі для середньої, високої і надвисокої напруг виконують трифазними. Для мереж низької напруги найбільше поширення отримала схема з чотирма проводами і з заземленою нейтраллю (рис. 1).

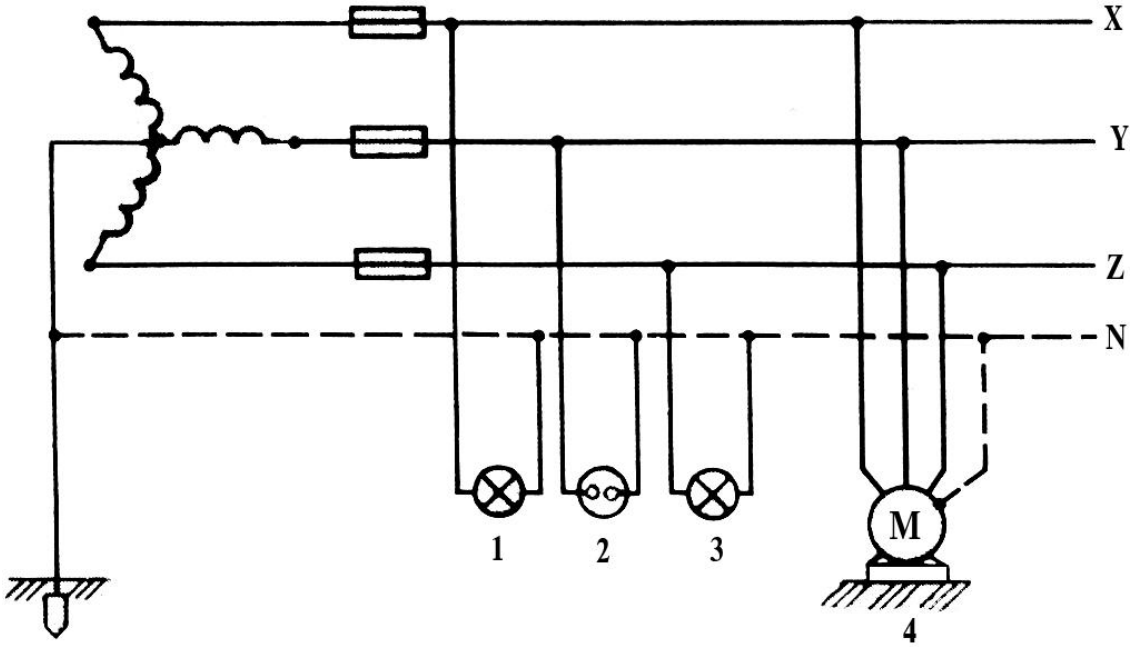

Рисунок 1 – Схема з чотирма провідниками і з заземленою нейтраллю

Таким чином, є можливість одержувати дві напруги: фазну 220 В для освітлення і живлення однофазних споживачів (1–3) і лінійну (міжфазну) 380 В для силових споживачів (4). Крім того, наявність нульового провідника забезпечує електричну безпеку споживачів.

Повітряні лінії електропередавання. Такі лінії виконують неізольованими проводами, закріпленими на опорах за допомогою ізоляторів. Упродовж лінії електропередавання ізолятором служить повітря. Проводи бувають одножильними, багатожильними і з спеціальним профілем. Найчастіше використовуються багатожильні провідники. Вони гнучкіші і мають більшу механічну міцність. Проводи спеціального профілю використовують при спорудженні контактних мереж електричного транспорту. Проводи для електропередавання можуть бути виготовлені з міді, алюмінію, сталі, а також із сталі й алюмінію. Мідь – дефіци-

тний матеріал, тому для проводів її використовують мало. Найчастіше застосовують багатожильні проводи зі сталі й алюмінію. Серцевина такого проводу сталева, а на неї навиті алюмінієві жили. За рахунок цього одержують гарну електричну провідність (алюміній) і механічну міцність (сталь).

Сталеві проводи (троси) використовують переважно для захисту від блискавок і монтують над фазними проводами в лініях електропередавання високої і надвисокої напруги.

У лініях електропередавання напругою понад 220 кВ застосовують пучки провідників: кожний фазний провідник складається з декількох паралельних багатожильних проводів, розташованих на певній відстані один від одного (40 – 60 см) і з'єднаних між собою спеціальними тримачами (розпірками).

У населених пунктах повітряні мережі низької напруги виконують з таким розташуванням проводів (рис. 2): зверху встановлюють три фазних проводи 1, під ними нульовий провід 2, а знизу – провід 3 для вуличного освітлення. У багатьох випадках на тім же стовпі, але нижче, розташовують ще два провода 4 для радіотрансляційної мережі.

Опори 5 (стовпи) залежно від матеріалу, з якого вони виготовлені, бувають дерев'яними, залізобетонними і металевими. Дерев'яні опори використовують рідко. Залізобетонні опори дешевші й служать довше. Їх застосовують для ліній електропередавання напругою до 330 кВ. Металеві опори виконують ґратчастими зі сталевих профілів і найчастіше використовуються для ліній електропередавання високих і надвисоких напруг.

Ізолятори виготовляють з порцеляни або скла. Залежно від конструктивного виконання вони бувають штировими і підвісними. Штирові ізолятори використовують для напруг до 35 кВ включно. Для більш високої напруги застосовують підвісні ізолятори, з яких збирають ізоляторні гірлянди. Число ізоляторних елементів в одній гірлянді визначається напругою лінії електропередавання (наприклад, для напруги 110 кВ – 68 штук).

Останнім часом все більше набувають поширення самоутримні ізольовані проводи, які за конструкцією нагадують кабель. Для їх кріплення на опорах застосовується спеціальна арматура.

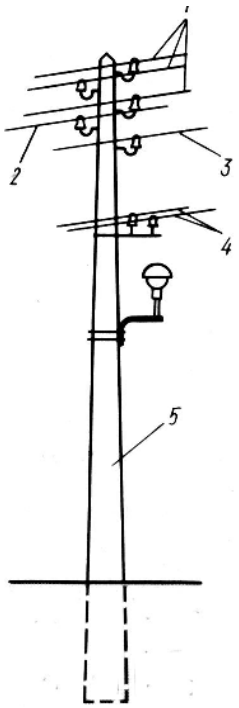

Рисунок 2 – Розташування проводів повітряної мережі низької напруги

Кабельні лінії електропередавання. Лінії електропередавання можна виконувати шляхом укладання кабелів у землю. Конструкція використовуваних кабелів визначається напругою, числом і перерізом жил, умовами роботи. Струмопровідні жили виготовляють з міді або алюмінію. Кабелі бувають одно і багатожильними. Залежно від числа жил розрізняють одно, дво, три і чотирижильні кабелі. Чотирижильні кабелі використовують у мережах низької напруги, причому одна з жил є нульовим проводом.

В останні роки проводять інтенсивні науково-дослідні роботи зі створення і впровадження надпровідних кабелів. Жили цих кабелів, охолоджені рідким гелієм, воднем, тощо знаходяться у стані надпровідності. Використовують також матеріали, які мають високотемпературну надпровідність.

Для кабельних ліній електропередавання не потрібні широкі траси, вони не піддаються впливові атмосферних явищ, зручні для міських умов та ін. Однак вони досить дорогі, а місце їхнього ушкодження важче знайти.

Коротке замикання в електричних мережах. Кожне непередбачене металеве з’єднання між фазними провідниками (рис. 3, а), а при з’єднанні в зірку із заземленою нейтраллю – між фазним провідником і землею або між фазним і нульовим провідниками (рис. 3, б) називають коротким замиканням. Причинами короткого замикання можуть бути порушена ізоляція, порвані провідники, неправильні дії персоналу тощо. Струм, що протікає в цьому випадку, багаторазово перевищує номінальний і приводить до перегрівів і механічних пошко-

джень електричних споруд. Для швидкого відключення лінії при замиканні і для запобігання ушкоджень електричних установок на початку кожної лінії обов'язково встановлюють захист від максимального струму за допомогою плавкого запобіжника, автоматичних вимикачів або реле максимального струму (залежно від конкретних вимог).

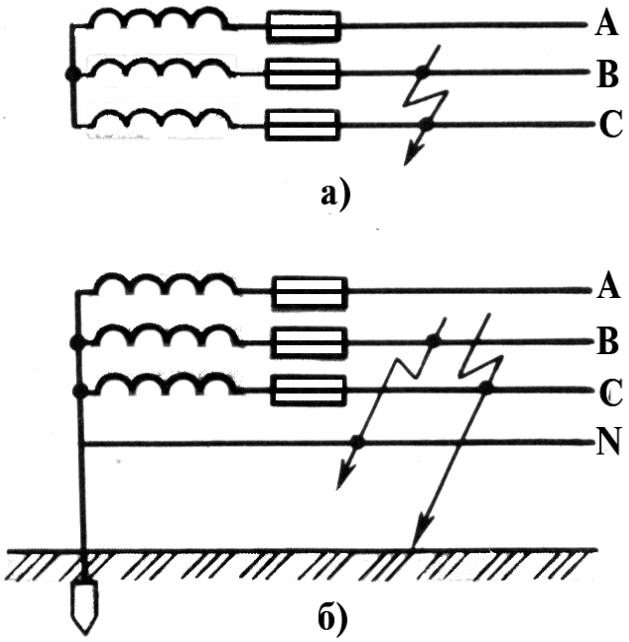

Рисунок 3 – Коротке замикання в електричних мережах з ізольованою (а) і заземленою (б) нейтраллю

5.2 Підстанції і розподільні установки

Перетворення (трансформацію) електричної енергії з більш низької на більш високу напругу і навпаки, а також її розподіл здійснюють на підстанціях.

Види підстанцій. Залежно від призначення і місця в електроенергетичній системі підстанції бувають:

– міжсистемні – призначені для зв'язку між окремими енергосистемами. Через них передають і на них перетворюють великі потужності електроенергії надвисокої і високої напруги;

– районні – на них перетворюють надвисокі напруги у високі або високі та середні напруги для живлення районних розподільних мереж;

– місцеві – для живлення міських районів, міст або сіл. На них перетворюють високі або середні напруги в більш низькі (6 кВ, 10 кВ, 20 кВ);

– трансформаторні – для перетворення середніх напруг у більш низькі (380/220 В);

– перетворювальні – для перетворення змінного струму в постійний або з іншим значенням напруги (переважно для електричного транспорту). Їх споруджують і як кінцеві підстанції при переході до ліній електропередавання постійного струму.

За способом будівництва розрізняють закриті й відкриті підстанції. При напрузі до 35 кВ їх роблять закритими, при напрузі понад 35 кВ – найчастіше відкритими. Закриті підстанції дорожчі і споруджуються повільніше, але експлуатаційні умови в них кращі.

Основне обладнання. Основним обладнанням в підстанціях є перетворювальні й розподільні пристрої.

Перетворювальними пристроями є трансформатори, випрямлячі струму, інвертори (пристрої, що перетворюють постійний струм у змінний – процес, зворотний випрямленню струму) і перетворювачі частоти.

Розподільні установки – це сукупність обладнання, призначеного для прийому і розподілу електроенергії: шини, вимикачі, роз'єднувачі тощо.

Для різних за значенням напруги споруджують окремі розподільні установки (РУ), (рис. 4).

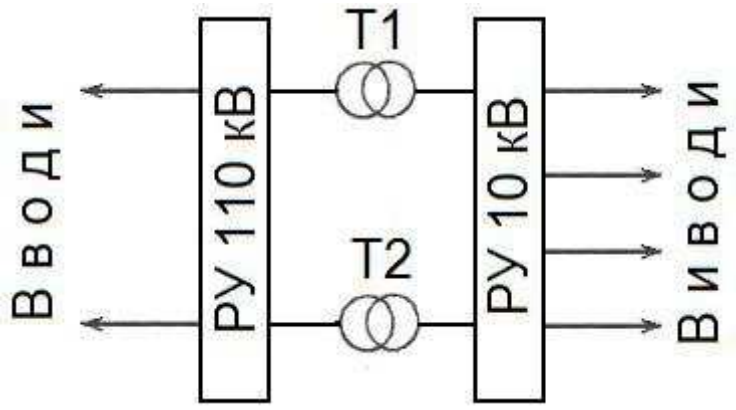

Рисунок 4 – Структурна схема розподільної установки

Кількість і потужність трансформаторів на підстанції залежать від електричних навантажень і вимог безпечної експлуатації. Часто підстанції споруджують з двома і більше трансформаторами , які можуть працювати паралельно.

Невеликі трансформаторні підстанції для живлення споживачів третьої категорії виконують з одним трансформатором, (рис. 5). Зі схеми видно послідовність з'єднання електричних пристроїв. Живлення здійснюється повітряною лінією електропередавання через прохідний ізолятор ПІ.

Вентильні розрядники ВР (останнім часом частіше використовуються обмежувачі перенапруги) служать для захисту обладнання трансформаторної підстанції від перенапруг.

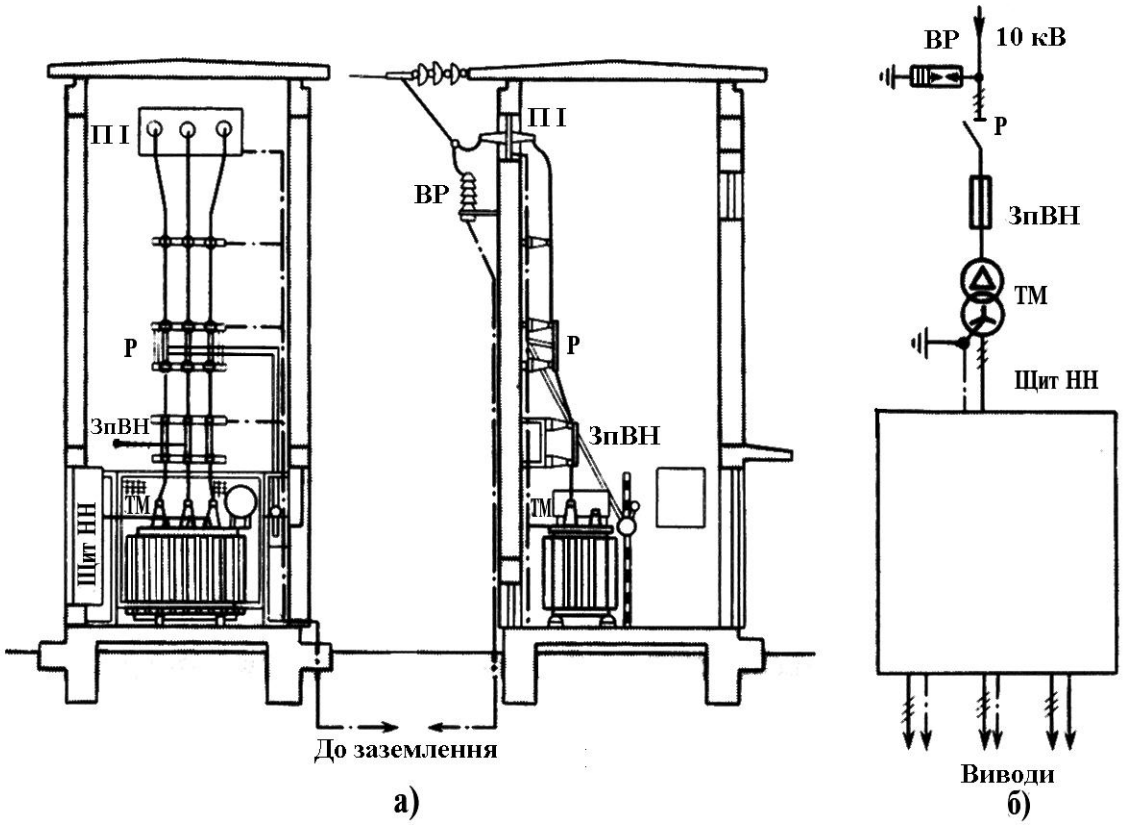

Рисунок 5 – Будова (а) і принципова схема (б) трансформаторної підстанції

оз'єднувачем (Р) трансформатор можна відключити з боку високої напруги. Захист від перевантажень і коротких замикань здійснюється за допомогою плавких запобіжників ЗпВН. У розподільному щиті низької напруги змонтована комутаційна і вимірювальна апаратура. Від щита відводять виводи для живлення споживачів.

Запитання для перевірки

1. Яким чином передають електричну енергію від джерел до споживачів?
2. Наведіть класифікацію електричних мереж.
3. Які напруги використовують в електричних мережах?
4. Як визначити втрати потужності в електричній мережі?
5. Яку напругу відносять до високої, яку до низької?
6. Для чого потрібна підстанція? Наведіть види підстанцій.
7. Що розуміють під поняттям трансформація електричної енергії?
8. Які прилади на підстанціях називають перетворювальними?
9. Що таке розподільна установка та що до неї входить?

ЕКОЛОГІЧНИЙ АСПЕКТ ВИРОБНИЦТВА І СПОЖИВАННЯ ЕЛЕКТРИЧНОЇ ЕНЕРГІЇ

6.1 – Проблеми росту споживання енергії

Енергетична криза – явище, яке виникає, коли попит на енергоносії значно вищий їх пропозиції. Причини цього можуть перебувати в області логістики, політики або фізичного дефіциту.

Споживання енергії є обов'язковою умовою існування людства. Наявність доступної для споживання енергії завжди була необхідною для задоволення потреб людини.

Історія цивілізації – історія винаходу все нових і нових методів перетворення енергії, освоєння її нових джерел і в кінцевому підсумку збільшення енергоспоживання.

Перший стрибок у зростанні енергоспоживання стався, коли людина навчилася добувати вогонь і використовувати його для приготування їжі та обігріву своїх осель. Джерелами енергії в цей період служили дрова і м'язова сила людини. Наступний важливий етап пов'язаний з винаходом колеса, створенням різноманітних знарядь праці, розвитком ковальського виробництва. До XV століття середньовічна людина, використовуючи робочу худобу, енергію води і вітру, дрова і невелику кількість вугілля, вже споживала приблизно в 10 разів більше, ніж первісна людина. Особливо помітне збільшення світового споживання енергії відбулося за останні 200 років, що минули з початку індустріальної епохи, – воно зросло в 30 разів. Людина індустріального суспільства споживає в 100 разів більше енергії, ніж первісна людина.

У сучасному світі енергетика є основою розвитку базових галузей промисловості, що визначають прогрес суспільного виробництва. В усіх промислово розвинених країнах темпи розвитку енергетики випереджали темпи розвитку інших галузей.

У той же час енергетика – один з джерел несприятливого впливу на навколишнє середовище і людину. Вона впливає на атмосферу (споживання кисню, викиди газів, вологи і твердих частинок), гідросферу (споживання води, створення штучних водоймищ, скиди забруднених і нагрітих вод, рідких відходів) і на літосферу (споживання викопних палив, зміна ландшафту, викиди токсичних речовин).

До середини 70-х років минулого століття зазначені фактори негативного впливу енергетики не викликали занепокоєння, доки не з'явилися численні да-

ні, які свідчили про сильний антропогенний тиск на кліматичну систему, що таїть загрозу глобальної катастрофи при неконтрольованому зростанні енергоспоживання. З тих пір жодна інша наукова проблема не привертає такої пильної уваги, як проблема справжніх, а особливо майбутніх змін клімату.

Вважається, що однією з головних причин цієї зміни є енергетика. Значна частина енергетики забезпечується споживанням енергії, що звільняється при спалюванні органічного викопного палива (нафти, вугілля і газу), що, в свою чергу, призводить до викиду в атмосферу величезної кількості забруднюючих речовин.

Крім парникового ефекту, відповідальність за який, частково лежить на енергетиці, на клімат планети впливає ряд природних причин, до числа найважливіших з яких відносяться сонячна активність, вулканічна діяльність, параметри орбіти Землі, автоколивання в системі атмосфера-океан. Коректний аналіз проблеми можливий лише з урахуванням усіх чинників, при цьому, зрозуміло, необхідна ясність в питанні, як буде вести себе світове енергоспоживання в найближчому майбутньому, чи дійсно людству слід встановити жорсткі обмеження в споживанні енергії з тим, щоб уникнути катастрофи глобального потепління.

6.2 Сучасні тенденції розвитку енергетики

Різного роду прогнози споживання енергії, що базуються на даних за останні 50-60 років, припускають, що приблизно до 2025 р очікується збереження сучасного помірного темпу зростання світового споживання енергії – близько 1,5% в рік. Після 2030 р. передбачається повільне зниження середньосвітового рівня споживання енергії на одну людину. При цьому загальне споживання енергії виявляє явну тенденцію до стабілізації після 2050 року і навіть слабкого зменшення до кінця століття.

Зменшення енергоспоживання пов’язане, перш за все, з переходом від екстенсивних шляхів розвитку енергетики до енергетичної політики, заснованої на підвищенні ефективності використання енергії та всілякої її економії.

Приводом для цих змін стали енергетичні кризи 1973 та 1979 років, стабілізація запасів викопних палив і подорожчання їх видобутку, бажання зменшити обумовлену експортом енергоресурсів залежність економіки від політичної нестабільності в світі.

Разом з тим, говорячи про споживання енергії, слід зазначити, що в постіндустріальному суспільстві повинна бути вирішена ще одне засадниче завдання – стабілізація чисельності населення.

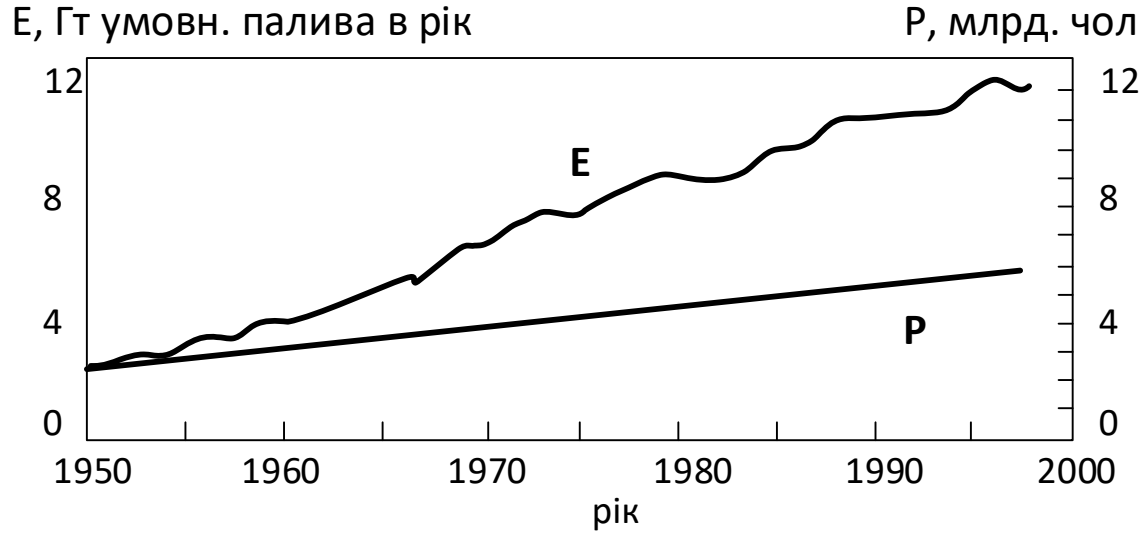

Рисунок 1 – Світове споживання електричної енергії E і чисельність населення P в другій половині XX століття

Отже, споживання енергії на душу населення в світі виявляє явну тенденцію до стабілізації. Слід зазначити, що цей процес почався ще близько 25 років тому, тобто задовго до нинішніх спекуляцій на глобальну зміну клімату. Таке явище в мирний час спостерігається вперше з початку індустріальної епохи і пов'язане з масовим переходом країн світу в нову, постіндустріальну стадію розвитку, в якій споживання енергії на душу населення залишається постійним. Зазначений факт має дуже важливе значення, оскільки в результаті і величина загального споживання енергії в світі зростає набагато більш повільними темпами.

6.3 Криза паливних ресурсів

На початку 70-х років минулого століття з'явилось поняття «Енергетична криза». Підстави для цього є, бо людство вступило в складний і досить довгий період потужного розвитку своєї енергетичної бази.

Чому ж люди заговорили про енергетичну кризу, якщо запасів тільки органічного палива вистачить на сотні років, а в резерві ще ядерне?

Все питання в його вартості. І саме з цього боку потрібно розглядати енергетичну проблему. В надрах землі ще багато енергоносіїв, але видобуток нафти, газу та вугілля коштує все дорожче, оскільки доводиться добувати з бідні-

ших і глибших шарів, з небагатих родовищ, відкритих в необжитих, важкодоступних районах. Набагато більше доводиться і доведеться вкладати коштів для того, щоб звести до мінімуму екологічні наслідки використання органічного палива.

Атомна енергетика розвивається зараз не тому, що вона забезпечена паливом на століття і тисячоліття, а, скоріше через економію газу й збереження на майбутнє нафти і газу, а також через можливість зменшення екологічного навантаження на біосферу.

Існує поширена думка, що вартість електроенергії АЕС значно нижча вартості енергії, яка виробляється на традиційних електростанціях. Якщо детально розглянути весь цикл атомної енергетики (від видобутку сировини до утилізації радіоактивних відходів, включаючи витрати на будівництво самої АЕС), то експлуатація АЕС і забезпечення її безпечної роботи виявляються дорожчими, ніж будівництво та робота станції такої ж потужності на традиційних джерелах енергії.

Тому останнім часом все більше уваги приділяється енергозберігаючим технологіям і поновлюваним джерелам, таким як сонце, вітер, вода. Багато хто вважає, що майбутнє належить використанню енергії Сонця. Однак, виявляється і тут все не так просто. Поки що вартість отримання електроенергії із застосуванням сучасних сонячних фотоелектричних елементів в 100 разів вища, ніж на звичайних електростанціях. Однак фахівці, які займаються фотоелементами, сповнені оптимізму, і вважають, що незабаром вдасться істотно знизити їх вартість.

Точки зору фахівців на перспективи використання відновлюваних джерел енергії дуже різняться. Аналіз перспективи освоєння таких джерел енергії комітетом з науки і техніки в Англії, показав, що їх використання на базі сучасних технологій мінімум в два-чотири рази дорожчий будівництва АЕС. Інші фахівці виражають впевненість в здешевленні цих джерел енергії вже в недалекому майбутньому. Скоріше за все, джерела відновлюваної енергії будуть застосовуватися в окремих районах світу, сприятливих для їх ефективного та економічного використання, але в обмежених масштабах. Основну частину енергетичних потреб людства забезпечать вугілля і атомна енергетика.

Найбільш екологічним джерелом енергії представляються ядерні, а потім, можливо, і термоядерні редактори. З їх допомогою людина і буде рухатися східцями технічного прогресу. Рухатиметься до тих пір, поки не відкриє і не освоїть будь-якого іншого, більш зручного джерела енергії.

На рисунку 2 наведений графік зростання потужності АЕС в світі і виробництва електроенергії за 1971–2006 роки, і прогнози розвитку на 2020–30 рр. (рис. 3). Крім тих країн у яких традиційно розвивається атомна енергетика, про можливість використання АЕС заявили і зробили перші кроки в цьому напрямку ряд нових.

Рисунок 2 – Зростання потужності АЕС і виробництва електроенергії за 1971–2006 рр. за даними МАГАТЕ

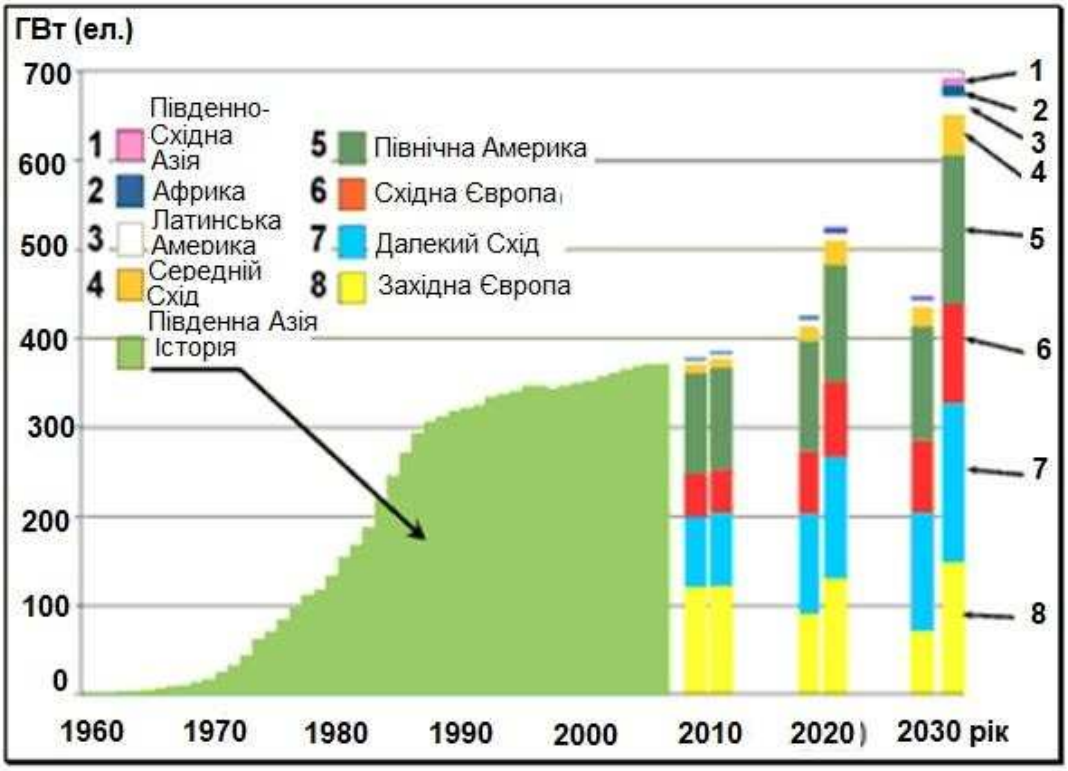

Рисунок 3 –Прогнози потужності АЕС в Світі на 2020-2030 рр.

6.4 Екологічна криза енергетики

Енергетика впливає на навколишнє середовище наступним чином:

1. Скорочуються невідновлювані ресурсів, оскільки основний обсяг енергії людство отримує за рахунок використання.

2. Забруднюється атмосфера: парниковий ефект, виділення в атмосферу газів і пилу.

3. Забруднюється гідросфера: теплове забруднення водойм, викиди забруднюючих речовин.

4. Забруднюється літосфера при транспортуванні енергоносіїв та захоронення відходів, при виробництві енергії.

5. Забруднюється радіоактивними і токсичними відходами навколишнє середовище.

6. Змінюється гідрологічний режим річок гідроелектростанціями та як наслідок забруднюється територія водотоку.

7. Створюються електромагнітні поля навколо ліній електропередавання.

Узгодити постійне зростання енергоспоживання з ростом негативних наслідків енергетики, можливо, мабуть, двома способами

Перший спосіб: Економія енергії. Ступінь впливу прогресу на економію енергії можна продемонструвати на прикладі парових машин. Як відомо, ККД парових машин 100 років тому складав 3–5 %, а зараз досягає 40 %. Розвиток світової економіки після енергетичної кризи 70 років також показав, що на цьому шляху у людства є значні резерви. Застосування ресурсозберігаючих і енергозберігаючих технологій забезпечило значне скорочення споживання палива і матеріалів в розвинених країнах.

Другий спосіб: Розвиток екологічно чистіших видів виробництва енергії. Вирішити проблему, ймовірно, здатний розвиток альтернативних видів енергетики, особливо тих, що базуються на використанні поновлюваних джерел. Однак шляхи реалізації даного напрямку поки не очевидні. На сьогодні відновлювані джерела забезпечують не більше 20 % загальносвітового споживання енергії.

6.5 Екологічні проблеми традиційної енергетики

Основна частина електроенергії в Україні сьогодні виробляється на теплових електростанціях (ТЕС). Далі зазвичай йдуть атомні електростанції (АЕС) та гідроелектростанції (ГЕС).

1. Теплові електростанції. У більшості країн світу частка електроенергії, що виробляється на ТЕС складає більше 50 %. Як паливо на ТЕС зазвичай використовуються вугілля, мазут, газ, сланці. Викопне паливо відноситься до невідновлюваних ресурсів. Згідно з багатьма оцінками вугілля на планеті вистачить на 100–300 років, нафти на 40–80 років, природного газу на 50–120 років.

Коефіцієнт корисної дії ТЕС становить в середньому 36–39 %. Поряд з паливом ТЕС споживає значну кількість води. Типова ТЕС потужністю 2 млн. кВт щодоби споживає 18 000 т вугілля, 2500 т мазуту, 150 000 $м^3$ води. На охолодження відпрацьованої пари на ТЕС використовуються щодоби 7 млн. $м^3$ води, що призводить до теплового забруднення водойми-охолоджувача.

Для ТЕС характерне високе радіаційне і токсичне забруднення навколишнього середовища. Це зумовлено тим, що звичайне вугілля, його зола містять мікродомішки урану і ряду токсичних елементів в значно більших концентраціях, ніж земна кора.

З викопних джерел палива найбільш перспективним є вугілля (його запаси величезні в порівнянні з запасами нафти і газу). При цьому основна кількість енергії в даний час виробляється на ТЕС за рахунок використання нафтопродуктів. Таким чином, структура запасів викопного палива не відповідає структурі його сучасного споживання при виробництві енергії. З метою зменшення значних екологічних проблем і матеріальних витрат необхідні структурні зміни не тільки в енергетичній галузі, але і в усій промисловості.

2. Гідроелектростанції. Основні переваги ГЕС – низька собівартість виробленої електроенергії, швидка окупність (собівартість приблизно в 4 рази нижче, а окупність в 3–4 рази швидше, ніж на ТЕС), висока маневреність, що дуже важливо в періоди пікових навантажень, можливість акумуляції енергії.

Але навіть при повному використанні потенціалу всіх річок Землі сучасні потреби людства можуть бути забезпеченими не більше чверті. Однак спорудження ГЕС (особливо на рівнинних річках) призводить до багатьох екологічних проблем. Водосховища, необхідні для забезпечення рівномірної роботи ГЕС, викликають зміни клімату на прилеглих територіях на відстанях до сотень кілометрів, є природними накопичувачами забруднень.

У водосховищах розвиваються синьо-зелені водорості, що приводить до погіршення якості води, порушує функціонування екосистем. При будівництві водосховищ порушуються природні нерестовища, відбувається затоплення родючих земель, змінюється рівень підземних вод.

Більш перспективним є спорудження ГЕС на гірських річках. Це пояснюється більш високим гідроенергетичним потенціалом гірських річок в порів-

нянні з рівнинними. При спорудженні водосховищ в гірських районах не вилучаються із землекористування великі площі родючих земель.

3. Атомні електростанції. АЕС не виробляють вуглекислого газу, об'єм інших забруднень атмосфери в порівнянні з ТЕС також малий. Кількість радіоактивних речовин, що утворюються в період експлуатації АЕС, порівняно невелика. Протягом тривалого часу АЕС уявлялися як найбільш екологічно чистий вид електростанцій і як перспективна заміна ТЕС. Однак процес безпеки АЕС ще не вирішений. З іншого боку, заміна основної маси ТЕС на АЕС для усунення їх вкладу до забруднення атмосфери в масштабі планети не здійсненна через величезні економічних витрат.

Рисунок 4 – Південно українська АЕС

Чорнобильська катастрофа призвела до корінної зміни ставлення населення до АЕС в регіонах розміщення станцій або можливого їх будівництва. Тому перспектива розвитку атомної енергетики в найближчі роки неясна. Серед основних проблем використання АЕС можна виділити наступні.

1. Безпека реакторів. Всі сучасні типи реакторів ставлять людство під загрозу ризику глобальної аварії, подібної до Чорнобильської. Така аварія може статися з вини конструкторів, через помилки оператора або в результаті терористичного акту. Принцип внутрішньої самозахищеності активної зони реактора в разі розвитку аварії за найгіршим сценарієм з розплавленням активної зони

повинен бути непорушною вимогою при проектуванні реакторів. Ядерна технологія складна. Потрібні роки аналізу і накопиченого досвіду, щоб просто усвідомити можливість виникнення деяких типів аварій.

2. Невизначеності стосовно безпеки ніколи не будуть повністю вирішені заздалегідь. Велика їх кількість буде виявлена тільки під час експлуатації нових реакторів.

3. Зниження емісії діоксиду вуглецю. Вважається, що витіснення теплових електростанцій атомними допоможе вирішити проблему зниження викидів діоксиду вуглецю, одного з головних парникових газів, які сприяють потеплінню клімату на планеті. Однак, насправді, електростанції з комбінованим циклом на природному газі не тільки набагато економніші, ніж АЕС, але і при одних і тих же витратах досягається значно більше зниження викидів діоксиду вуглецю, ніж при використанні атомної енергії з урахуванням усього паливного циклу (споживання енергії при видобутку та збагаченні урану, виготовлення ядерного палива та інших витрат на «вході» і «виході»).

4. Зняття з експлуатації реакторів на АЕС. До 2010 р половина з працюючих в світі АЕС мала вік 25 років і більше. Після цього починається процедура зняття з експлуатації реакторів. За даними Всесвітньої ядерної асоціації (WNA), понад 130 промислових ядерних установок уже виведені з експлуатації, або очікують цього. І у всіх випадках виникає проблема утилізації радіоактивних відходів, які треба надійно ізолювати і зберігати тривалий термін в спеціальних сховищах. Багато експертів вважають, що ці витрати можуть зрівнятися з витратами на будівництво АЕС.

5. Небезпека використання АЕС для розповсюдження ядерної зброї. Кожен реактор виробляє щорічно плутоній в кількості, достатній для створення декількох атомних бомб. У відпрацьованому ядерному паливі, яке регулярно вивантажується з реакторів, міститься не тільки плутоній, а й цілий набір небезпечних радіаційних елементів. Тому МАГАТЕ намагається тримати під контролем весь цикл поводження з відпрацьованим ядерним паливом у всіх країнах, де працюють АЕС.

Примітивна атомна бомбу може бути виготовленою з відпрацьованого ядерного палива будь-якої АЕС. Якщо для створення бомби необхідні складне виробництво, спеціальне обладнання та підготовлені фахівці, то для створення так званих брудних ядерних вибухових пристроїв – все набагато простіше, і тут небезпека дуже велика. При використанні такої «саморобки» ядерного вибуху, звичайно, не буде, але буде сильне радіоактивне зараження. Такі пристрої терористи і екстремісти можуть виготовити самостійно, придбавши на ядерному

чорному ринку необхідні розщеплюють матеріали. Такий ринок, як це не прикро, існує, і атомна промисловість є потенційним постачальником таких матеріалів.

6.6 Економія електричної енергії

Збільшення витрати електроенергії створює труднощі в електропостачанні у визначені години доби й в окремі сезони року. Найбільші труднощі виникають в осінньо-зимовий час, а також у ранкові й вечірні години. Крім того, для виробництва енергії використовують невідновлювані енергетичні джерела – вугілля, нафту, природний газ, які в перспективі будуть вичерпані. Усе це змушує вживати заходи щодо економії електричної енергії і ефективного використання енергетичних ресурсів. Економія означає не обмеження і позбавлення електроенергії, а розумну й ощадливу її витрату.

Показовим є те, що в різних країнах для виробництва того самого виду і кількості продукції витрачається різна кількість електроенергії.

Економія електроенергії в побуті може бути реалізована застосуванням електропобутових приладів і освітлювальних пристроїв з більш високим коефіцієнтом корисної дії, шляхом недопущення роботи споживачів вхолосту (зайві включені лампи, нагрівальні електроприлади, телевізори та ін.).

У промисловості електроенергію заощаджують за рахунок обмеження часу роботи електродвигунів і освітлювальних пристроїв в неробочому режимі, збільшення навантаження механізмів і машин до номінального, заміни недовантажених двигунів іншими, які підходять за потужністю, вибору найбільш економічного режиму роботи трансформаторів, зменшення їхнього числа при паралельній роботі, використання джерел світла й освітлювальних пристроїв з кращими енергетичними показниками. Економію електроенергії (до 2…5%) можна отримати за рахунок точного зведення балансів, знаходження втрат і виявлення неврахованих споживачів. Для цього необхідно встановити сучасні лічильники електроенергії, що є першим етапом створення автоматизованих систем контролю і обліку електроенергії (АСКОЕ). Такі системи дозволяють за допомогою комп’ютера зібрати дані з усіх лічильників, провести аналіз споживання, зробити прогноз і підготовити звіти. Економія електроенергії зв’язана і з перебудовою економіки. Необхідно вчасно заміняти застарілі енергоємні технології на нові, більш прогресивні, які забезпечують мінімальне споживання електроенергії на одиницю продукції. Необхідні прогресивні норми витрати енергії, що відповідають оптимальним технологічним процесам.

Економія електроенергії приводить до зниження собівартості продукції і дає можливість виробити додаткову продукцію.

Втрати електроенергії – це даремно і безповоротно загублені енергетичні ресурси. Сьогодні на відміну від минулих років про ступінь розвитку і про стандарт життя в будь-якій країні судять не за кількістю виробленої електроенергії на душу населення, а за кількістю виробленої продукції на одиницю витраченої електроенергії або за кількістю електроенергії, що витрачається на одиницю національного доходу.

Якість електроенергії. Електрична енергія, вироблена на електростанціях, повинна мати строго визначені параметри.

Про якість електроенергії судять в основному за рівнем напруги і частоти електричного струму. Тільки при живленні номінальною напругою і частотою споживачі електроенергії працюють в оптимальному режимі. Для одержання електричної енергії з номінальними параметрами на електростанціях і розподільних пристроях вводять автоматичне регулювання напруги і частоти.

Крім вищезазначених державний стандарт передбачає контроль ще цілого ряду параметрів.

Запитання для перевірки

1. Поясніть зв’язок між кількістю населення і споживанням електричної енергії.
2. З чим пов’язана криза паливних ресурсів?
3. Навіщо потрібно розвивати нетрадиційні джерела електроенергетики?
4. В чому полягають основні впливи виробництва енергії на навколишнє середовище?
5. Наведіть екологічні проблеми теплових електростанцій.
6. Наведіть екологічні проблеми гідроелектростанцій.
7. Наведіть екологічні проблеми атомних електростанції.
8. Охарактеризуйте тенденції світового виробництва енергії.
9. Які види палива в світі використовують для виробництво електричної енергії і яка їх пропорція?
10. Які технології виробництв електричної енергії є найбільш забруднюючими з точки зору CO_2?
11. Охарактеризуйте динаміку зростання виробництва електричної енергії в порівнянні традиційних і нетрадиційних джерел.
12. Які заходи призводять до економі електричної енергії?

ЕЛЕКТРИЧНІ КОЛА ПОСТІЙНОГО СТРУМУ. ПРОСТІ І СКЛАДНІ ЕЛЕКТРИЧНІ КОЛА

7.1 Електричні кола

Електричний струм являє собою спрямований рух електричних зарядів. Позитивним напрямком струму історично прийнято вважати напрямок руху позитивного заряду.

Сила струму I характеризується зарядом **q**, що проходить через поперечний переріз провідника за одиницю часу t:

$$I = \frac{q}{t} \tag{7.1}$$

Одиниці струму: ампер [А], міліампер – [мА], мікроампер – [мкА] і кілоампер [кА].

Один ампер – це такий струм, коли за одну секунду через переріз провідника проходить заряд в 1 кулон [К].

У замкнутому колі струм протікає під дією електрорушійної сили (ЕРС) джерела енергії. ЕРС Е підтримує різницю потенціалів на затискачах джерела енергії. Вона дорівнює енергії, яку одержує всередині джерела одиничний електричний заряд.

Напруга на затискачах приймача показує, яка енергія витрачається в ньому одиничним електричним зарядом. Напругу і ЕРС виражають у вольтах [В], мілівольтах [мВ], кіловольтах [кВ]. Одному вольту відповідає робота в один джоуль, що приходиться на заряд в один кулон.

Електричне коло створює протидію проходженню електричного струму, оскільки спрямованому рухові електричних зарядів у будь-якому провіднику перешкоджають молекули й атоми. Цю протидію називають електричним опором, його виражають в омах [Ом]. Опір в 1 Ом має провідник, в якому напруга в 1 В створює струм величиною 1 А. Більш великими одиницями опору є кілоом [кОм], мегом [МОм].

Опір R провідника залежить від його питомого опору ρ, довжини l і площі поперечного перерізу S:

$$R = \rho \frac{l}{S}. \tag{7.2}$$

Величина, зворотна опору R, називається провідністю g:

$$g = \frac{1}{R}. \tag{7.3}$$

Електричне коло – сукупність пристроїв, що створюють шлях для електричного струму. Основними елементами електричних кіл є джерела й приймачі (споживачі) електроенергії. Джерела й приймачі електроенергії з'єднують проводами, зазвичай мідними або алюмінієвими. У такий спосіб створюють замкнутий шлях для електричного струму.

Крім джерел і приймачів електроенергії в електричних колах можуть бути комутаційні апарати (вимикачі, рубильники, тумблери та ін.), апарати захисту і вимірювальні прилади.

7.2 Електричні кола постійного струму

У колах постійного струму розглядають електрорушійні сили (ЕРС), струми і напруги, що не змінюються з часом. У цих колах джерелами електроенергії можуть бути випрямлячі, генератори постійного струму, акумулятори і гальванічні елементи. У них відбувається перетворення інших видів енергії в електричну енергію постійного струму. У приймачах (електродвигунах, нагрівачах, електролітичних ваннах, лампах розжарення та інших пристроях) електрична енергія постійного струму перетворюється в механічну, теплову, хімічну, світлову та інші види енергії.

Як приклад на рисунку 1, а наведене найпростіше електричне коло, що складається з батареї акумуляторів 1, лампи розжарення 2, вимикача 3, амперметра 4 і з'єднувальних проводів 5. Такому колу відповідають електрична і розрахункова схеми, представлені відповідно на рисунку 1, б, в.

Закон Ома. Закон Ома встановлює залежність між напругою і струмом.

Стосовно до ділянки кола (в якому відсутні джерела струму) він формулюється таким чином: струм на ділянці електричного кола дорівнює напрузі на затискачах цієї ділянки, поділеній на її опір:

$$I = \frac{U}{R}. \tag{7.4}$$

Співвідношення між ЕРС, опором і струмом у замкнутому колі відповідно до закону Ома виражається формулою:

$$I = \frac{E}{R + R_0} \tag{7.5}$$

де R – опір зовнішньої частини кола;

R_0 – внутрішній опір джерела.

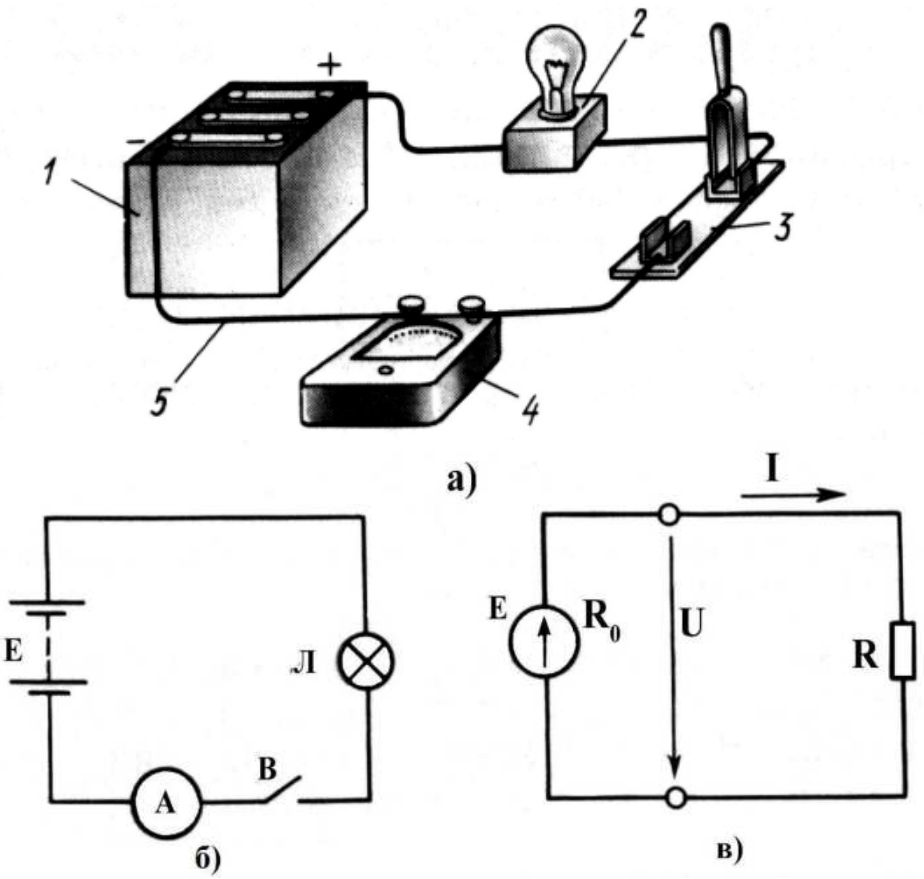

Рисунок 1 – Найпростіше електричне коло

Складні електричні кола. Складні електричні кола характеризуються наявністю гілок, вузлів, контурів.

Гілка – ділянка кола, уздовж якої проходить один і той самий струм і яка складається з послідовно з'єднаних елементів.

Вузол – місце з'єднання трьох і більш гілок.

Контур – будь-який замкнутий шлях кола, яким його можна обійти, рухаючись гілками.

Наприклад, коло на рисунку 2 складається з п'яти гілок, трьох вузлів, шести контурів.

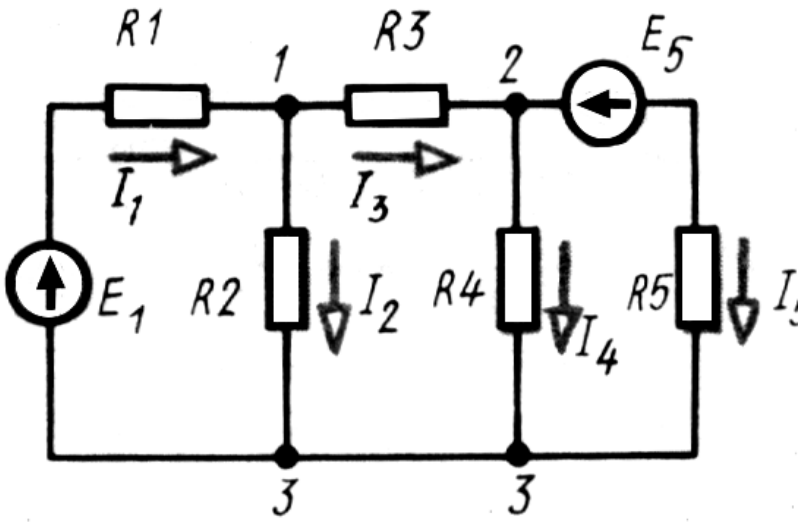

Рисунок 2 – Складне електричне коло

Розрахунки електричних кіл виконують за допомогою законів Кірхгофа. При цьому в більшості випадків приймачі електроенергії, ввімкнені в коло постійного струму, можна розглядати як резистори, що мають ті ж опори, що і реальні приймачі. У схемах резистори позначаються R1, R2, R3,....

Відповідно до першого закону Кірхгофа сума струмів, спрямованих до вузла електричного кола, дорівнює сумі струмів, спрямованих від нього. Причому напрямок струмів до вузла вважається позитивним, від вузла – негативним. Наприклад, для вузла 2 на рисунку 2 можна записати:

$I_3 = I_4 + I_5$; для вузла 3: $I_2 + I_4 + I_5 = I_1$.

Відповідно до другого закону Кірхгофа у будь-якому замкнутому електричному контурі алгебраїчна сума ЕРС дорівнює алгебраїчній сумі напруг на опорах, що входять у цей контур. При цьому значення ЕРС і напруг вважають позитивними, якщо напрямок ЕРС і струмів збігається з обраним напрямком обходу контуру.

Наприклад, для зовнішнього контуру схеми на рисунку 2 можна записати:

$E_1 – E_5 = I_1R_1 + I_5R_5 + I_3R_3$;

для внутрішнього контура:

$0 = I_3R_3 + I_4R_4 – I_2R_2$.

З’єднання приймачів електроенергії. В електричних схемах часто мають справу з послідовним, паралельним і змішаним з’єднанням резисторів.

Струм I і сумарний еквівалентний опір R при різних способах з'єднання резисторів визначають в такий спосіб:

при послідовному з'єднанні (рис. 3, а)

$$I = \frac{U}{R_1+R_2+R_3} = \frac{U}{R}; \quad (7.6)$$

$$R = R_1 + R_2 + R_3; \quad (7.7)$$

$$U = U_1 + U_2 + U_3. \quad (7.8)$$

при паралельному з'єднанні (рис. 3, б)

$$I = I_1 + I_2 + I_3 = U(\frac{1}{R_1} + \frac{1}{R_2} + \frac{1}{R_3}) = \frac{U}{R}; \quad (7.9)$$

$$\frac{1}{R} = \frac{1}{R_1} + \frac{1}{R_2} + \frac{1}{R_3}, \quad (7.10)$$

або $g = g_1 + g_2 + g_3$. (7.11)

В окремому випадку паралельного з'єднання двох резисторів R_1 і R_2:

$$R = \frac{R_1R_2}{R_1+R_2}. \quad (7.12)$$

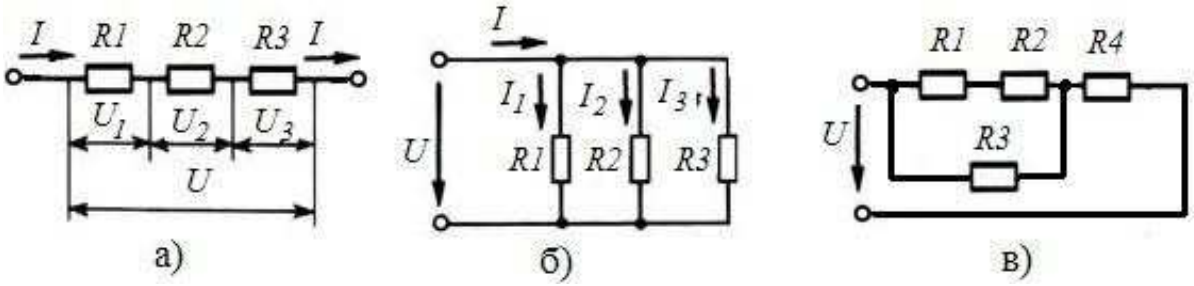

Рисунок 3 – З'єднання резисторів: а) – послідовне; б) – паралельне; в) – змішане

При змішаному з'єднанні визначення еквівалентного опору кола виконують поетапно. Наприклад, у схемі (на рисунку 3,в) спочатку визначають опір R12 послідовно включених резисторів R_1 і R_2:

$$R_{12} = R_1 + R_2.$$

Потім еквівалентний опір паралельно з'єднаних резисторів з о порами R_{12} і R_3:

$$R_{123} = \frac{R_{12}R_3}{R_{12}+R_3}.$$

Нарешті, знаходять загальний опір усього кола:

$$R = R_{123} + R_4.$$

Аналогічно поступають і при розрахунку більш складних схем зі змішаним з'єднанням резисторів.

Розрахунок складних електричних кіл. Складні електричні кола з декількома контурами і різним розміщенням у них джерел і споживачів енергії в загальному випадку не можна звести до сполучення паралельно і послідовно з'єднаних резисторів.

Для розрахунку складних кіл використовують різні методи. Найбільш загальним є метод складання і розв'язання рівнянь за законами Кірхгофа.

Перед складанням рівнянь довільно задають напрямок струмів у гілках, показавши їх на схемі стрілками.

Число необхідних рівнянь дорівнює числу невідомих струмів, причому число рівнянь за першим законом Кірхгофа повинне бути на одне менше числа вузлів кола. Інші рівняння складають за другим законом Кірхгофа, причому слід вибирати контури найбільш прості і такі, щоб у кожному з них була хоча б одна гілка, що не входить у раніше складені рівняння.

Розглянемо для прикладу схему, показану на рисунку 4.

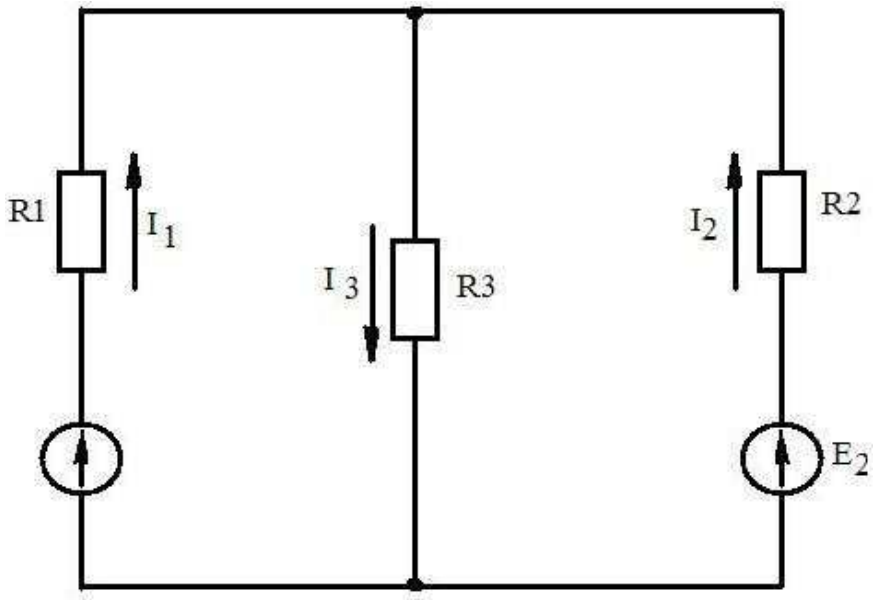

Рисунок 4 – До розрахунку складного кола

Для неї може бути складена система рівнянь:

$$I_3 = I_1 + I_2;$$
$$E_1 = I_1R_1 + I_3R_3;$$
$$E_2 = I_2R_2 + I_3R_3.$$

Вирішуючи цю систему рівнянь, можна, наприклад, визначити струми I_1, I_2, I_3, якщо відомі E_1, E_2, R_1, R_2, R_3.

Електрична енергія і потужність. Для переносу заряду q ділянкою кола з напругою U на його кінцях витрачається енергія W:

$$W = qU. \tag{7.13}$$

Потужність P– це витрата енергії в одиницю часу:

$$P = \frac{W}{t} = \frac{q}{t}U = IU. \tag{7.14}$$

З огляду на закон Ома можна одержати інші вирази для потужності електричного струму на ділянці кола з опором R:

$$P = I^2R = \frac{U^2}{R}. \tag{7.15}$$

При використанні основних одиниць (кулон, ампер, вольт, Ом, секунда) потужність виражається у ватах, енергія – у джоулях. В енергетиці користуються значно більшими величинами – кіловатами [кВт], мегаватами [МВт], кіловат – годинами [кВт –год.], мегават – годинами [МВт – год].

Запитання для перевірки

1. Що таке електричний струм?
2. Яке співвідношення сили струму, напруги і опору?
3. Наведіть одиниці виміру сили струму.
4. Наведіть одиниці виміру сили напруги.
5. Наведіть одиниці виміру сили опору.
6. Що таке електричне коло?
7. Який струм називають постійним?
8. Чим відрізняються прості і складні кола?
9. Що таке гілка, вузол, контур?
10. Поясніть розподіл струму при послідовному з’єднанні елементів.
11. Поясніть розподіл струму при паралельному з’єднанні елементів.

МАГНІТНЕ ПОЛЕ, МАГНІТНІ КОЛА

8.1 Електромагнетизм

Магнітне поле. Магнітне поле виникає у просторі, що оточує електричні заряди, які рухаються, і постійні магніти. Воно впливає тільки на заряди, що рухаються. Загальновідома дія постійних магнітів і електромагнітів на феромагнітні тіла, існування і нерозривну єдність полюсів магнітів і їхня взаємодія (різнойменні полюси притягаються, однойменні відштовхуються). За аналогією з магнітними полюсами Землі полюси магнітів називають північним і південним.

Магнітне поле наочно зображується магнітними силовими лініями, що задають напрямок магнітного поля у просторі (рис. 1). Ці лінії не мають ні початку, ні кінця, тобто є замкнутими.

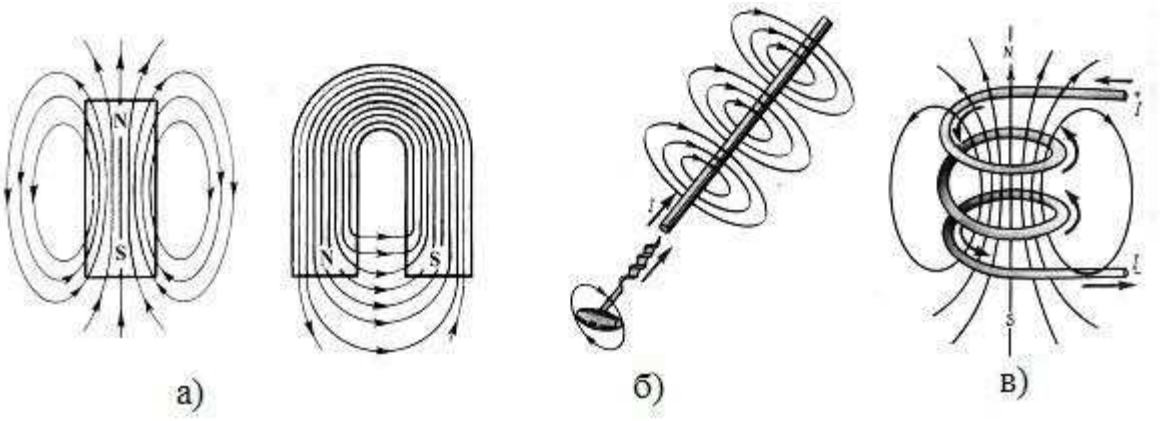

Рисунок 1 – Магнітне поле прямого і підковоподібного магніту (а), прямого проводу (б) і котушки (в)

У просторі, який оточує магніт або електромагніт, за позитивний напрямок магнітних силових ліній умовно прийнятий напрямок від північного полюсу до південного. Чим інтенсивніше магнітне поле, тим вища щільність силових ліній. Силові лінії магнітного поля прямолінійного провідника є концентричними окружностями, що охоплюють провід. Чим сильніший струм, тим сильніше магнітне поле навколо проводу. При віддаленні від проводу зі струмом магнітне поле слабшає.

Напрямок магнітних силових ліній визначається правилом гвинта: якщо загвинчувати гвинт за напрямком струму, то магнітні силові лінії будуть спрямовані по ходу гвинта (рис. 1, б).

Для одержання більш сильного магнітного поля застосовують котушки з обмоткою з дроту. У цьому разі магнітні поля окремих витків котушки складаються і їхні силові лінії зливаються в загальний магнітний потік. Магнітні си-

лові лінії виходять з котушки на тому кінці, де струм спрямований проти ходу годинникової стрілки, тобто цей кінець є північним магнітним полюсом (рис. 1, в). При зміні напрямку струму в котушці зміниться і напрямок магнітного поля.

Магнітна індукція. Розглянемо провідник із струмом I, розташований перпендикулярно напрямкові магнітних силових ліній однорідного магнітного поля.

Напрямок дії електромагнітної сили F на провідник визначається «правилом лівої руки»: якщо розташувати ліву руку так, щоб магнітні лінії пронизували долоню, а витягнуті чотири пальці вказували напрямок струму в провіднику, то відігнутий великий палець вказує напрямок дії електромагнітної сили. За цією силою можна судити про інтенсивність магнітного поля, тобто про його магнітну індукцію B. Якщо на провідник довжиною один метр зі струмом 1 А, розташований перпендикулярно до магнітних ліній у рівномірному магнітному полі, діє сила в один ньютон, то магнітна індукція такого поля дорівнює одній теслі [Тл].

Магнітна індукція – векторна величина: в кожній точці поля вектор магнітної індукції спрямований по дотичній до магнітних силових ліній.

Магнітний потік. Величина, вимірювана добутком магнітної індукції B на площу S, перпендикулярну до вектору магнітної індукції, називається магнітним потоком, Ф:

$$\Phi = BS. \tag{8.1}$$

Якщо магнітну індукцію виражають у теслах, а площу в квадратних метрах, то потік виражається у веберах [Вб]: 1 Вб = 1 Тл × 1 м^2.

Магніторушійна сила (МРС). Здатність струму збуджувати магнітне поле характеризується магніторушійною силою, що діє уздовж замкнутої магнітної силової лінії. МРС дорівнює струму, що створює магнітне поле, і виражається в амперах.

Для провідника зі струмом I МРС дорівнює струму I. У загальному випадку, коли замкнутий контур магнітної силової лінії охоплює кілька струмів, сумарна МРС дорівнює сумі струмів.

Наприклад, для випадку, показаного на рисунку 2, а МРС

$$\Sigma I = I_1 - I_2 + I_3.$$

Для котушки з числом витків ω і струмом I (рис. 2, б) МРС.

$$\Sigma I = I\omega.$$

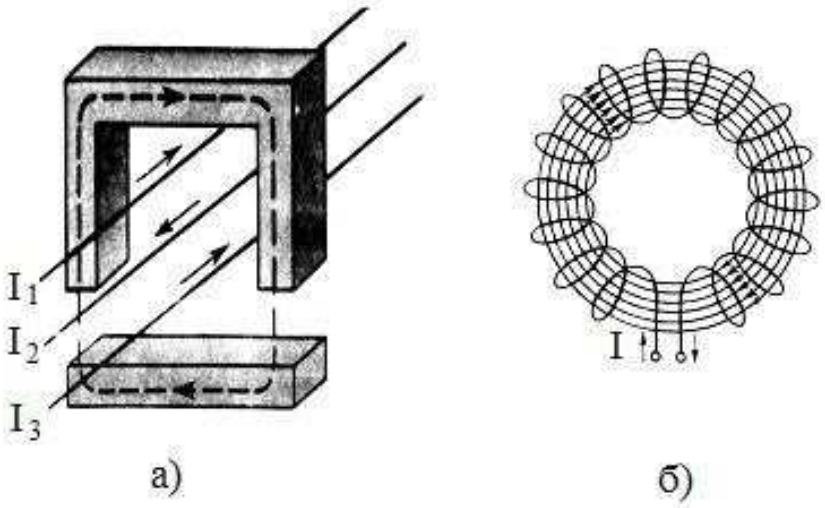

Рисунок 2 – До поняття МРС

Напруженість магнітного поля. МРС, яка припадає на одиницю довжини магнітної силової лінії, називається напруженістю магнітного поля H і виражається в амперах на метр.

Якщо фізичні умови уздовж усієї довжини l магнітної лінії однакові, то

$$H = \Sigma I / l. \tag{8.2}$$

Наприклад, навколо прямолінійного провідника зі струмом I лінії магнітного поля є концентричними окружностями змінного радіуса x, довжина кожної з яких l = 2πx. У цьому разі напруженість H = I/(2πx), тобто в міру віддалення від провідника напруженість поля знижується.

Провідник із струмом у магнітному полі. Відомо, що на провідник із струмом у магнітному полі відповідно до правила лівої руки діє електромагнітна сила F, яка прагне змістити його в площині, перпендикулярній до напрямку вектору B магнітної індукції поля. Ця сила тим більша, чим більший струм I у провіднику й індукція магнітного поля B, чим довша активна (та що знаходиться в магнітному полі) частина провідника l. Електромагнітна сила визначається за формулою

$$F = B \times I \times l \times \sin\alpha, \tag{8.3}$$

де α – кут, під яким прямолінійний провідник розташований відносно магнітних силових ліній поля.

У результаті впливу таких сил при однаковому напрямку струму провідники, які лежать поруч, будуть притягуватися один до одного (рис. 3, а), при різному напрямку – відштовхуватися (рис. 3, б).

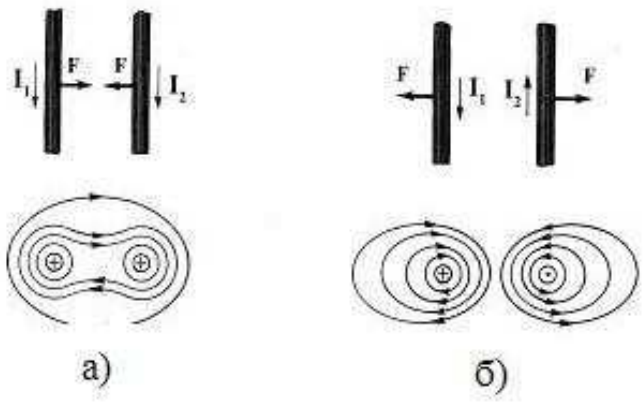

Рисунок 3 – Взаємодія двох провідників із струмом

Особливо великі сили між провідниками виникають в електричних колах при коротких замиканнях.

Явище електромагнітної індукції полягає в тому, що зміна магнітного поля навколо провідника, зв'язана з перетинанням провідника магнітними силовими лініями, викликає появу ЕРС у цьому провіднику. При цьому байдуже, чи буде змінюватися магнітне поле відносно провідника чи провідник буде переміщуватися в магнітному полі. Індукована ЕРС прямо пропорційна індукції B, активній довжині провідника l і швидкості його переміщення в напрямку, перпендикулярному до ліній магнітного поля:

$$e = Blv\sin\alpha, \tag{8.4}$$

де α – кут між напрямками швидкості υ і поля. Якщо α = 90°, то e = BLυ.

Напрямок ЕРС визначають згідно з «правилом правої руки»: Якщо поставити праву руку так, щоб магнітні силові лінії входили в долоню, а відставлений великий палець вказував напрямок руху провідника, то витягнуті чотири пальці вкажуть напрямок індукованої ЕРС.

При зміні магнітного потоку, охоплюваного замкнутим контуром, у ньому індукується ЕРС:

$$e = -\frac{\Delta\Phi}{\Delta t}, \tag{8.5}$$

де Δt – проміжок часу, протягом якого потік змінюється на ΔФ.

У котушці з w витками

$$e = -\omega\frac{\Delta\Phi}{\Delta t}. \tag{8.6}$$

Знак мінус відображає правило Ленца: індукована ЕРС прагне протидіяти причині, що її викликає.

Вихрові струми. У магнітопроводах електротехнічних пристроїв при проходженні змінних магнітних потоків наводяться ЕРС і виникають так звані вихрові струми. Ці струми, нагріваючи магнітопровід, створюють додаткові втрати та розмагнічувальну дію.

*Самоіндукція***.** При зміні струму в провіднику, витку або котушці змінюється магнітний потік, створюваний цим струмом. Зміна магнітного потоку індукує у провіднику (витку, котушці) ЕРС, дія якої за правилом Ленца спрямована на підтримку попереднього стану поля. Таке явище називається самоіндукцією. Явище самоіндукції в тих або інших провідниках характеризується індуктивністю L.

Індуктивність – це розмірний коефіцієнт пропорційності між швидкістю зміни струму в часі і індукованою при цьому ЕРС:

$$e = -L\frac{\Delta i}{\Delta t}. \tag{8.7}$$

Знак мінус у формулі відбиває правило Ленца.

Одиницею індуктивності є генрі [Гн], таку індуктивність має провідник, в якому виникає ЕРС самоіндукції, рівна 1 В, при зміні струму на 1 А за 1 с.

Значення індуктивності L залежить від конструкції елементів кола. Так, для котушки з числом витків ω, з магнітопроводом довжиною l, перерізом S і магнітною проникністю μ_a

$$L = \frac{\omega^2 S}{l} + \mu_a. \tag{8.8}$$

Якщо котушки своїми полями не впливають одна на одну, то при послідовному з'єднанні котушок з індуктивностями L_1, L2, L_3, … загальна індуктивність

$$L = L_1 + L_2 + L_3 + \dots . \tag{8.9}$$

При паралельному з'єднанні

$$\frac{1}{L} = \frac{1}{L_1} + \frac{1}{L_2} + \frac{1}{L_3} + \dots . \tag{8.10}$$

У багатьох випадках явищем самоіндукції можна знехтувати, вважаючи, що коло не має індуктивності. На рисунку 4, а показано, як змінюється струм I при подачі і знятті напруги в колі без індуктивності. У колі з індуктивністю (рис. 4, б*)* струм не миттєво досягає значення, зумовленого опором кола і прикладеною напругою. Внаслідок самоіндукції відбувається уповільнення наростання струму і. При відключенні кола виникаюча при зменшенні струму ЕРС самоіндукції прагне підтримувати струм і в колишнього напрямку.

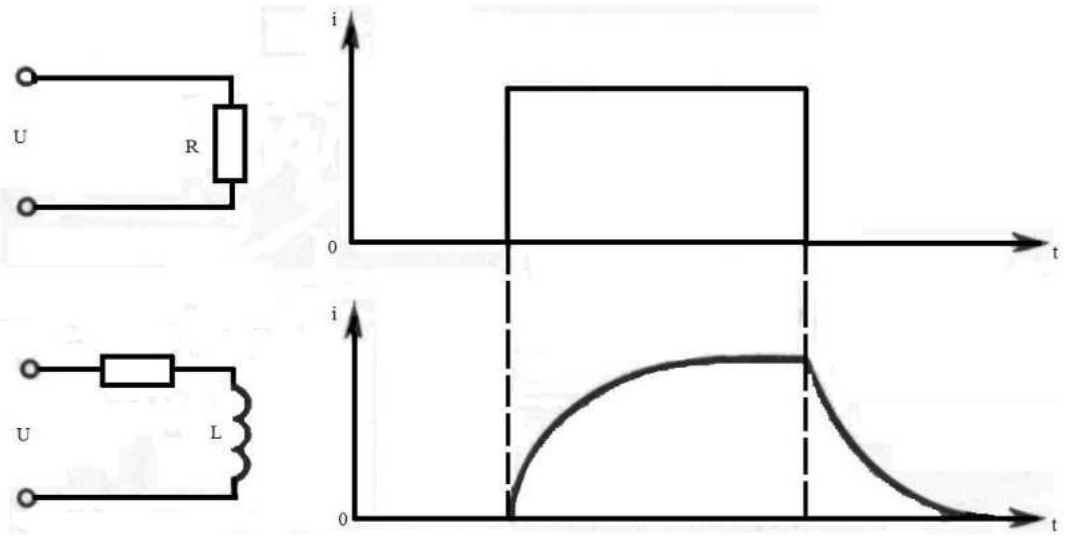

Рисунок 4 – Наростання і спад струму при відсутності самоіндукції (а) та при її наявності (б)

Енергія магнітного поля. Магнітне поле, що оточує провідник зі струмом, має енергію. Вона накопичується при наростанні струму в колі і підтримує струм при відключенні кола від джерела електроенергії.

У котушці зі струмом *I*, що має індуктивність *L*, ця енергія дорівнює

$$A = \frac{LI^2}{2}. \qquad (8.11)$$

Енергія магнітного поля визначається роботою, яку витрачає струм на створення цього поля.

Взаємна індукція. Якщо дві котушки зі струмом розташувати поруч, то магнітне поле кожної з них буде пронизувати контур іншої.

Взаємною індукцією називається явище наведення ЕРС в одному колі (контурі, котушці) при зміні струму в іншому колі.

Для оцінки ступеня магнітного зв’язку контурів вводиться поняття взаємної індуктивності М.

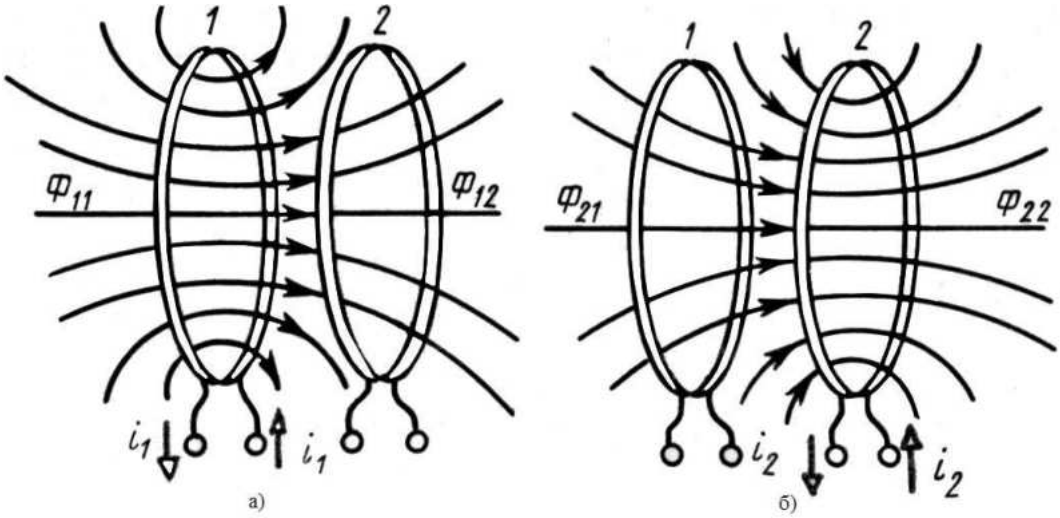

Рисунок 8.5 – Магнітний зв’язок двох котушок

Розглянемо магнітний зв’язок двох котушок, розташованих досить близько одна від одної (рис. 8.5). При проходженні по котушці 1 змінного струму i_1 частина загального магнітного потоку Φ_{11}, створювана цим струмом і рівна Φ_{12}, пронизує котушку 2 і наводить у ній ЕРС (рис. 8.5, а). Потік Φ_{12} так само як і Φ_{11}, пропорційний струмові i_1:

$$\Phi_{12} = Mi_1. \tag{8.12}$$

Аналогічно при проходженні струму i_2 в котушці 2 наводиться ЕРС у котушці 1 (рис. 8.5, б) змінним магнітним потоком:

$$\Phi_{21} = Mi_2. \tag{8.13}$$

Взаємна індуктивність може бути виражена через індуктивність L1 і L2:

$$M = k\sqrt{L_1 L_2}, \tag{8.14}$$

де коефіцієнт $k < 1$ і показує, що не весь магнітний потік є загальним для обох котушок.

8.2 Магнітні кола

Магнітне коло. Магнітне поле електротехнічних пристроїв звичайно прагнуть підсилити і зосередити, застосовуючи магнітопроводи з феромагнітних матеріалів, якими замикається магнітний потік магніту або електромагніту.

Сукупність магнітопроводів і повітряних зазорів, у яких поширюється магнітний потік, складає магнітне коло електричної машини, апарата або приладу.

Закон повного струму. У більшості електротехнічних пристроїв магнітний потік замикається по колу, що складається з декількох ділянок, наприклад k. У межах кожної з цих ділянок напруженість магнітного поля можна вважати постійною. У цьому випадку магніторушійна сила (МРС) дорівнює сумі добутків напруженості поля на довжину відповідної ділянки магнітного кола:

$$\Sigma I = \omega I = H_1 l_1 + H_2 l_2 + \ldots + H_k l_k = \sum_{i=1}^{k} H_i l_i. \qquad (8.15)$$

Це рівняння виражає закон повного струму для магнітного кола.

Розрахунок магнітного кола. Метою розрахунків магнітних кіл електротехнічних пристроїв найчастіше є визначення МРС, потрібної для одержання необхідної магнітної індукції (наприклад, магнітної індукції в повітряному зазорі електричної машини). Основою для розрахунку є закон повного струму для магнітного кола:

$$\sum Hl = I\omega. \qquad (8.16)$$

Розглянемо послідовність розрахунку на прикладі магнітного кола, зображеного на рисунку 8.6, а.

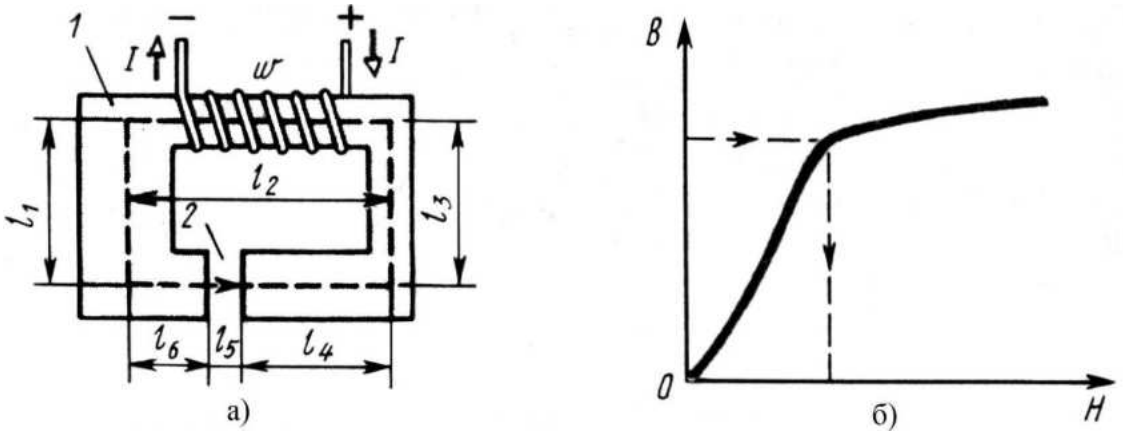

Рисунок 8.6 – Розрахунок магнітного кола

Коло утворене магнітопроводом 1 з листової електротехнічної сталі з повітряним зазором 2 довжиною l_5. Магнітопровід можна розділити на ділянки довжиною l_1, l_2 і т. д., на кожній з яких переріз магнітопроводу постійний і відповідно дорівнює S_1 , S_2 і т. д. Якщо задано індукцію в повітряному зазорі B_5,

то можна визначити магнітний потік, вважаючи переріз потоку в зазорі рівним площі перерізу прилягаючої ділянки S_4:

$$\Phi = B_5 S_4.$$

Індукція на ділянках магнітопроводу визначається за формулами: $B_1 = \Phi/S_1 = B_5$; $B_2 = \Phi/S_2$ і т. д.

Потім з графіка залежності B(H) (рис. 8.6, б) за знайденим значенням B знаходять напруженості H_1, H_2 і т. д. для різних ділянок магнітопроводу. Напруженість поля в повітряному зазорі $H_5 = B_5/\mu_0$ (тому що для повітря $\mu_r = 1$, а $\mu_a = \mu_0\mu_r = \mu_0$).

Довжину кожної з ділянок магнітопроводу з різними перерізами вираховують за середньою магнітній лінії, як показано пунктиром на рисунку 8.6, а. Знайшовши значення H, розраховують значення МРС за законом повного струму:

$$I\omega = H_1 l_1 + H_2 l_2 + H_3 l_3 + H_4 l_4 + H_5 l_5.$$

Знаючи Iω, можна визначити I, якщо задано ω, або, навпаки, знайти ω, якщо задано значення I.

*Використання магнітного поля***.** Магнітні поля використовують в електричних машинах і трансформаторах, електричних апаратах, вимірювальних приладах та інших електротехнічних пристроях. Магніти є в магнітофонах і радіоприймачах, телевізорах і телефонах та в багатьох інших пристроях і приладах.

Потужні магнітні поля необхідні для сучасних енергетичних і фізичних установок, наприклад, для формування потоку заряджених часток у прискорювачах, для утримання плазми в камерах магнітних пасток у фізичних установках. Сильне магнітне поле створюють у магнітогідродинамічних генераторах, з якими пов'язаний прогресивний напрямок у розвитку електроенергетики.

Електромагніти є елементами конструкцій багатьох технологічних установок і механізмів. Так, для підйому і транспортування феромагнітних матеріалів застосовують піднімальні електромагніти; для пуску, гальмування і перемикання швидкостей у кінематичних вузлах верстатів велике поширення одержали електромагнітні муфти; для утримання деталей на плоскошліфувальних верстатах – електромагнітні плити; для видалення сталевих і чавунних тіл з маси

сипучого оброблюваного матеріалу – магнітні сепаратори; для керування потоками газів і рідин – електромагнітні крани і клапани.

Електромагнітне поле використовують і безпосередньо в технологічних процесах. Так, для термічної обробки деталей, нагрівання і розплавлювання металів широко застосовують індукційні установки, в яких виділення теплоти відбувається за рахунок вихрових струмів, що наводяться в металі змінним магнітним потоком.

Запитання для перевірки

1. Дайте визначення магнітного поля.
2. Опишіть пристрій – постійний магніт.
3. Поясніть будову електричного магніту.
4. Дайте пояснення терміну магнітна індукція.
5. Що таке магніторушійна сила?
6. Наведіть схему взаємодії двох провідників із струмом.
7. Що таке вихрові струми?
8. В чому полягає явище самоіндукції?
9. Що таке енергія магнітного поля?
10. В чому полягає явище взаємоіндукції?

ЕЛЕКТРИЧНІ КОЛА ЗМІННОГО СТРУМУ

9.1 Графічне зображення синусоїдального струму, його миттєве значення

Майже вся електроенергія виробляється у вигляді енергії змінного струму. Можливість одержувати змінний струм різної напруги – високої для передачі енергії на великі відстані, низької – для живлення різних споживачів, простота влаштування генераторів і двигунів змінного струму, надійність їхньої роботи, зручність експлуатації і високі техніко – економічні показники забезпечили змінному струмові повсюдне широке застосування.

У колах змінного струму розглядають струми, ЕРС і напруги, які періодично змінюють напрямок і значення. Зміни повторюються через деякий проміжок часу T, який називається періодом. Число періодів у секунду називається частотою f. Широко використовується і дуже зручний для використання синусоїдальний струм.

На рисунку 1 наведене графічне зображення (часова діаграма) синусоїдального струму. Його миттєве значення описується формулою:

$$i = I_m sin(\omega t + \psi), \tag{9.1}$$

де I_m – максимальне значення (амплітуда) струму;

$\omega = 2\pi/T = 2\pi/f$ – кутова частота;

ψ – початкова фаза (значення аргументу в початковий момент часу, тобто при $t = 0$).

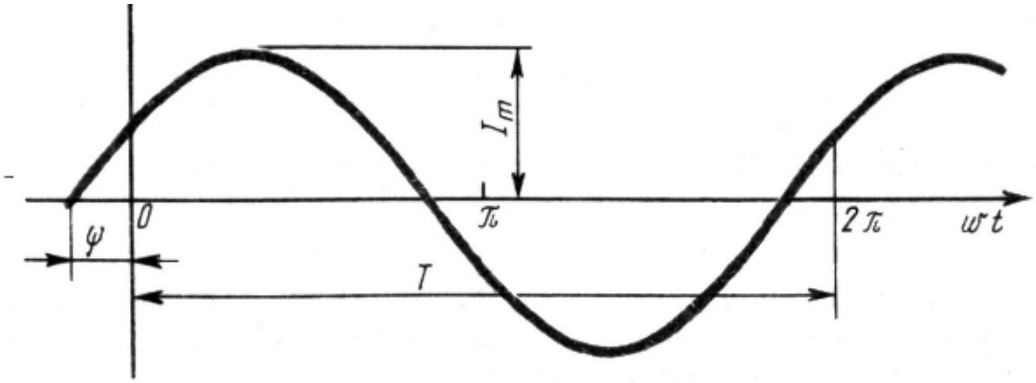

Рисунок 1 – Часова діаграма змінного струму

Період виражають у секундах [с], частоту – у герцах [Гц], фазу – у радіанах [рад] або градусах [град], кутову частоту – у радіанах на секунду [рад/с].

Усе сказане про синусоїдальний струм стосується також синусоїдальних ЕРС і напруги.

9.2 Діючі значення струму

Діюче значення струму. Енергетична дія струму (теплова і здатність виконувати механічну роботу) характеризується його діючим значенням.

Між діючими й амплітудними значеннями синусоїдальних величин існують співвідношення:

$$I = I_m/\sqrt{2}; U = U_m/\sqrt{2}; E = E_m/\sqrt{2}. \quad (9.2)$$

На шкалах амперметрів і вольтметрів змінного струму звичайно наносять діючі значення струму і напруги.

9.3 Векторні діаграми

Векторні діаграми. При розгляді багатьох питань, пов'язаних з колами синусоїдального струму, зокрема при їхніх розрахунках, зручно користуватися векторними діаграмами. Вони дозволяють зображувати синусоїдальні величини простіше, ніж за допомогою часових діаграм. Метод векторних діаграм полягає в наступному. Змінні струми, напруги, ЕРС зображують у вигляді векторів, які позначають відповідною прописною буквою з крапкою: İ, Ů, Ė. Вектори зображують нерухомими, з урахуванням зсуву по фазі і мають на увазі, що вони рівномірно обертаються проти годинникової стрілки з кутовою швидкістю (ω). При такому обертанні вектору його проекція на вертикальну вісь змінюється в часі за законом синуса з урахуванням початкової фази.

На рисунку 9.2, а – г для прикладу показані векторні діаграми двох струмів, зсунутих на 0, 30, 90 і 180°.

Додавання синусоїдальних величин можна замінити додаванням векторів, що їх зображують. Наприклад, на рисунку 9.3 наведене додавання двох синусоїдальних ЕРС: $e_1 = E_{m1}\sin(\omega t + \psi_1)$ і $e_2 = E_{m2}\sin(\omega t + \psi_2)$, представлених векторами $\overrightarrow{OA}$ і $\overrightarrow{OБ}$.

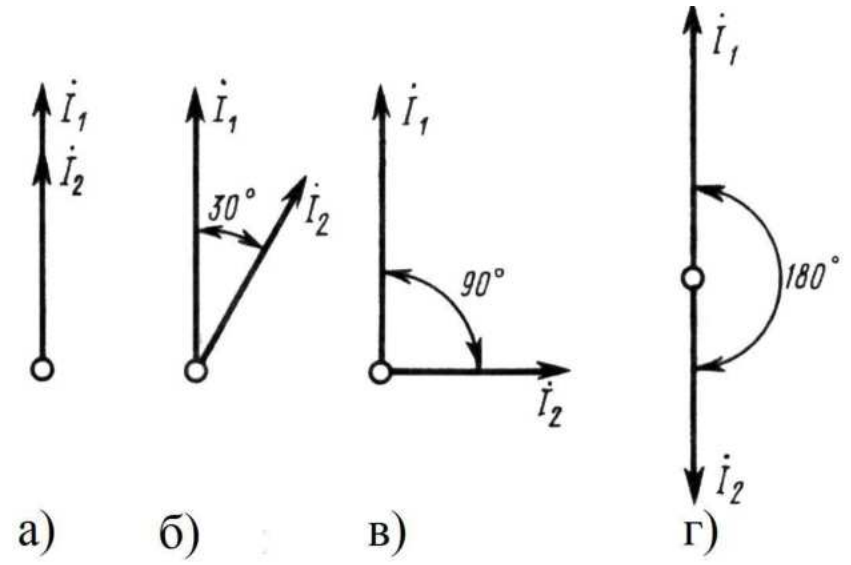

Рисунок 9.2 – Векторні діаграми струмів з різним зсувом фаз

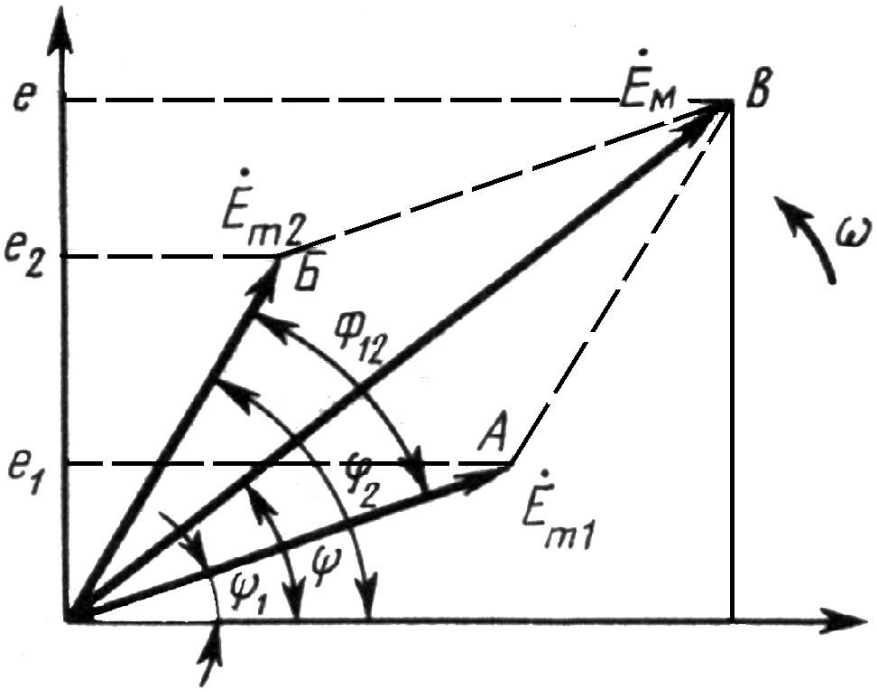

Рисунок 9.3 – Додавання векторів двох ЕРС

Результат додавання – вектор $\overrightarrow{OB}$, якому відповідає $e = E_m \sin(\omega t + \psi)$. Зазвичай на векторних діаграмах зображають діючі значення струмів, напруг, ЕРС.

9.4 Найпростіші кола змінного струму

Найпростішим колом є коло з одним опором R (рис. 4, I, а). При синусоїдальній напрузі на затискачах $u = E_m \sin\omega t$ струм у колі з опором R за законом Ома дорівнює:

$$i = \frac{u}{R} = \frac{E_m}{R} sin\omega t, \tag{9.3}$$

Струм є синусоїдальним і збігається за фазою з прикладеною напругою. На рисунку 4 це показано за допомогою часової (I, б) і векторної (I, г) діаграм. Амплітуді струму $I_m = U_m/R$ відповідає і діюче значення $I = U/R$. Опір R називається активним опором кола. Провідність кола $g = 1/R$.

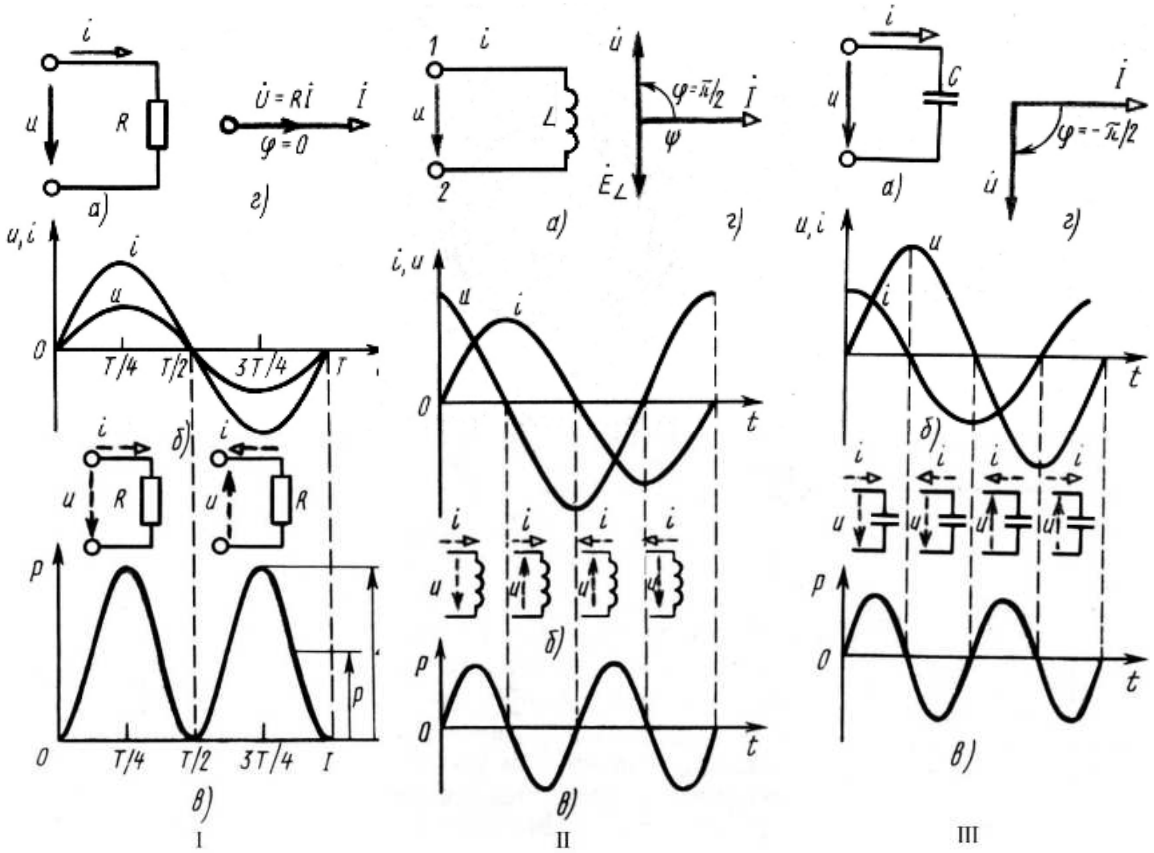

Рисунок 4 – Електричні кола змінного струму з різними опорами:
I – активним; II – індуктивним; III –ємнісним; (а– схема кола; б – графіки миттєвих значень напруги і струму; в – потужності; г – векторна діаграма)

Миттєві значення потужності визначаються добутком миттєвих значень струму і напруги. Як показано на рисунку 4, I, в, потужність завжди позитивна. В електричному колі середня споживана потужність

$$P = I^2R = IU \tag{9.4}$$

називається активною потужністю і виражається у ватах [Вт].

Коло з індуктивною котушкою. Розглянемо коло з ідеальною (такою, що не має активного опору) котушкою індуктивності (рис. 4, II, а).

При проходженні синусоїдального струму $i = I_m \sin\omega t$ напруга на котушці $u_L = L\frac{\Delta i}{\Delta t}$. Вона синусоїдальна й у момент найбільшої швидкості зміни струму $\Delta i/\Delta t$ (при переході через нульове значення) досягає найбільшого значення. При нульовій швидкості зміни струму (при переході через амплітудне значення) напруга на котушці дорівнює нулю (рис. 4, II, б).

Таким чином, в ідеальній котушці індуктивності кут зсуву фаз між напругою і струмом дорівнює $\pi/2$ (90°), причому напруга за фазою випереджає струм, як показано на векторній діаграмі (рис. 4, II, г).

Через деякий дуже малий проміжок часу Δt після того, як і був рівним нулю, $\Delta i = I_m \sin\omega\Delta t \approx I_m \omega\Delta t$, оскільки для малих аргументів $\sin\omega\Delta t \approx \omega\Delta t$. Тоді:

$$u_L = U_m = L\frac{I_m \omega \Delta t}{\Delta t} = LI_m\omega. \qquad (9.5)$$

Величину $U_m/I_m = U/I = \omega L = X_L$ називають індуктивним опором. Він визначає здатність індуктивної котушки протидіяти проходженню змінного струму і виражається в омах.

Чим більші ω і L, тим вищий X_L. Провідність кола $b = 1/X_L$.

Миттєве значення потужності в розглянутому колі може бути знайдене як добуток миттєвих значень струму і напруги і, як видно з рисунку 4, II, в, змінюється за синусоїдальним законом з частотою 2 ω. Очевидно, що активна потужність такого кола дорівнює нулю.

При позитивному значенні потужності вона споживається індуктивністю, при негативному віддається назад джерелу. Такий енергетичний стан кола характеризується так званою реактивною потужністю $Q_L = I^2\omega L = ULI$. Одиниця реактивної потужності – вольтампер реактивний (вар).

Коло з конденсатором. Розглянемо коло (рис. 4, III, а) з конденсатором, до затисків якого прикладена напруга $u = U_m \sin \omega t$. Струм у колі конденсатора $i_C = C\frac{\Delta u}{\Delta t}$. У момент найбільшої швидкості зміни напруги (при переході через нульове значення) через конденсатор протікає максимальний струм. Якщо напруга не змінюється в часі (при переході через амплітудне значення), струм конденсатора дорівнює нулю (рис. 4, III, б).

Таким чином, у конденсаторі кут зсуву між напругою і струмом також дорівнює $\pi/2$ (90°), причому за фазою напруга відстає від струму, як це показано на векторній діаграмі (рис. 4, III, г).

У момент часу Δt після проходження кривої синусоїдальної напруги через нуль можна записати: $\Delta u = U_m \sin\omega\Delta t \approx U_m \omega\Delta t$. Тоді $i = I_m = C\frac{U_m\omega\Delta t}{\Delta t} = \omega C U_m$.

Величина $U_m/I_m = U/I = 1/(\omega C) = X_C$ називається ємнісним опором. Він визначає здатність конденсатора зменшувати змінний струм і виражається в омах.

Чим більші C і ω, тим менший ємнісний опір. Провідність кола $b = 1/X_C$.

Енергетичний стан кола характеризується обміном енергії між конденсатором і джерелом (рис. 4, III, в). Цьому процесові також відповідає реактивна потужність.

Індуктивний і ємнісний опори називають реактивними. У зв'язку з розходженням фазових зсувів струму і напруги на індуктивності і ємності умовно прийнято вважати індуктивний опір споживачем, а ємнісний – генератором реактивної потужності.

*Поверхневий ефект***.** Активний опір для провідників при змінному струмі завжди більший омічного опору постійному струмові внаслідок так званого поверхневого ефекту. Останній зумовлений тим, що навколо провідника зі змінним струмом створюється змінне магнітне поле. Для струмів, що проходять у центральній частині провідника, створюється найбільша ЕРС самоіндукції, тому що ці струми оточені найбільшим магнітним потоком. У результаті струм наче витісняється в зовнішню частину провідника, «робочий переріз» провідника зменшується й опір зростає. На частоті 50 Гц цей ефект майже відсутній, але він дуже сильно виявляється на високих частотах.

9.5 Розрахунок кіл змінного струму

При розрахунках кіл змінного струму, так само як і кіл постійного струму, використовують закони Ома і Кірхгофа. Відмінність у застосуванні цих законів полягає в тому, що *в колах змінного струму необхідно враховувати кути зсуву фаз між струмами і напругами.*

Послідовне з'єднання. Розглянемо загальний випадок послідовного з'єднання резистора, котушки індуктивності і конденсатора (рис. 5, а). Для спадів напруги на окремих елементах можна записати: $U_R = IR, U_L = IX_L$; $U_C = IX_C$.

Ці спадання напруги мають відповідні кути зсуву фаз стосовно загального струму кола I.

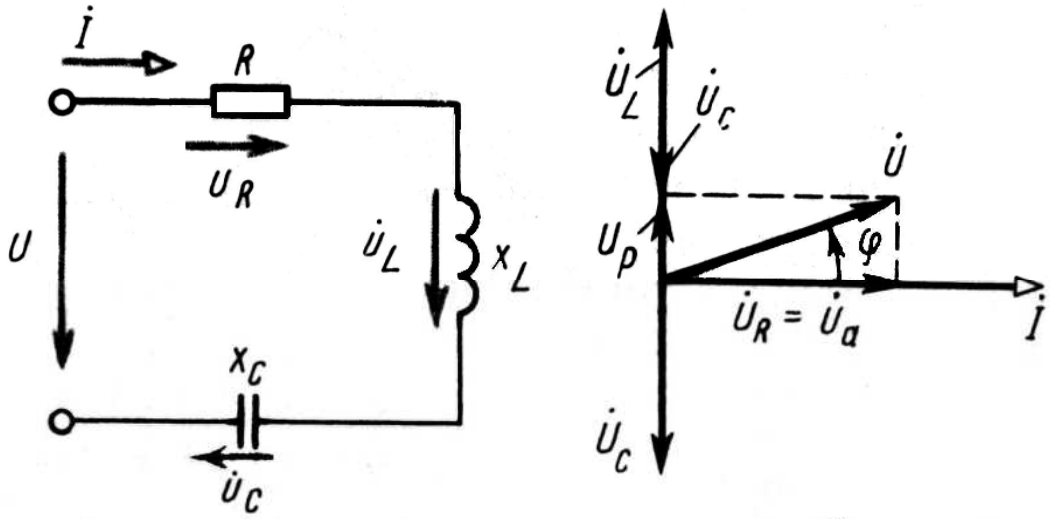

Рисунок 5 – Схема електричного кола з послідовним з'єднанням активного, індуктивного і ємнісного опору (а) та векторна діаграма для його розрахунку (б)

На векторній діаграмі (рис. 5, б) відкладені вектори $\mathring{U}_R$, $\mathring{U}_L$, $\mathring{U}_C$ і їх додаванням побудований вектор $\mathring{U}$, що має активну $\mathring{U}_a = \mathring{U}_R$ і реактивну $\mathring{U}_p = \mathring{U}_L + \mathring{U}_C$ складові. Для сумарної напруги U можна записати:

$$U = \sqrt{U_R^2 (U_L - U_C)^2} = I\sqrt{R^2 + (X_L - X_C)^2}. \quad (9.6)$$

Величина $Z = \sqrt{R^2 + (X_L - X_C)^2}$ називається повним опором кола і виражається в омах. Співвідношення U/I = Z – вираз закону Ома для кола змінного струму. Повна провідність кола y = 1/Z.

Кут зсуву фаз між струмом і напругою кола визначається тригонометричними функціями $\cos\varphi = U_R/U = R/Z$; $\sin\varphi = (U_L - U_C)/U = = (X_L - X_C)/Z$. Якщо $X_L > X_C$, то вектор $\mathring{U}$ випереджає вектор İ, якщо $X_L < X_C$, то $\mathring{U}$ відстає від İ.

Активна потужність кола:

$$P = U_R I = UI\cos\varphi, \quad (9.7)$$

реактивна потужність:

$$Q = (U_L - U_C)I = UI\sin\varphi. \quad (9.8)$$

Добуток діючих значень напруги і струму кола називається повною потужністю:

$$S = UI. \tag{9.9}$$

Очевидно, що $S = \sqrt{P^2 + Q^2}$, тому що $\sin^2\varphi + \cos^2\varphi = 1$.

Величина $\cos\varphi$ називається коефіцієнтом потужності.

*Резонанс напруг***.** У розглянутому колі з послідовним з'єднанням елементів R, L, і C при рівності реактивних опорів X_L і X_C має місце так званий резонанс напруг. Оскільки ці опори залежать від частоти, резонанс настає при деякій резонансній частоті ω_0:

$$1/(\omega_0 C) = \omega_0 L;\ \omega_0 = 1/\sqrt{LC}. \tag{9.10}$$

Загальний опір кола в цьому разі мінімальний і чисто активний $Z = R$, а струм має максимальне значення. При $\omega < \omega_0$ навантаження має активноємнісний характер, при $\omega > \omega_0$ – активноіндуктивний.

За заданої частоти ω резонанс може бути досягнутий зміною L або C.

Слід зазначити, що різкому збільшенню струму в колі при резонансі відповідає зростання U_L і U_C. Ці напруги можуть стати значно більшими від напруги U, прикладеної до затисків кола, тому резонанс напруг – явище, небезпечне для електроенергетичних установок.

У техніці зв'язку й в автоматиці явище резонансу напруг широко використовують для настроювання прийомних і передавальних пристроїв на певну частоту.

Паралельне з'єднання. Струми в гілках паралельно з'єднаних елементів кіл мають відповідний фазовий зсув стосовно загальної напруги цих кіл. Тому загальний струм кола дорівнює сумі струмів окремих гілок з урахуванням фазових зсувів. Інакше кажучи, в цьому випадку вектор загального струму визначається сумою векторів струмів паралельних гілок.

Розглянемо паралельне з'єднання трьох елементів, що мають активний опір R, індуктивний X_L і ємнісний X_C (рис. 6, а).

Для струмів гілок можна записати:

$$I_R = \frac{U}{R}U_g;\ I_L = \frac{U}{X_L}Ub_L;\ I_C = \frac{U}{X_C}Ub_C.$$

На векторній діаграмі (рис. 6, б) відкладені вектори $\dot{I}_R$, $\dot{I}_L$, $\dot{I}_C$ і їх додаванням побудований вектор $\dot{I}$, що має активну $\dot{I}_a = \dot{I}_R$ і реактивну $\dot{I}_p = \dot{I}_L + \dot{I}_C$ складові. Для сумарного струму I маємо:

$$I = \sqrt{I_R^2 + (I_L - I_C)^2} = U\sqrt{g^2 + (b_L - b_C)^2} = Uy. \qquad (0.11)$$

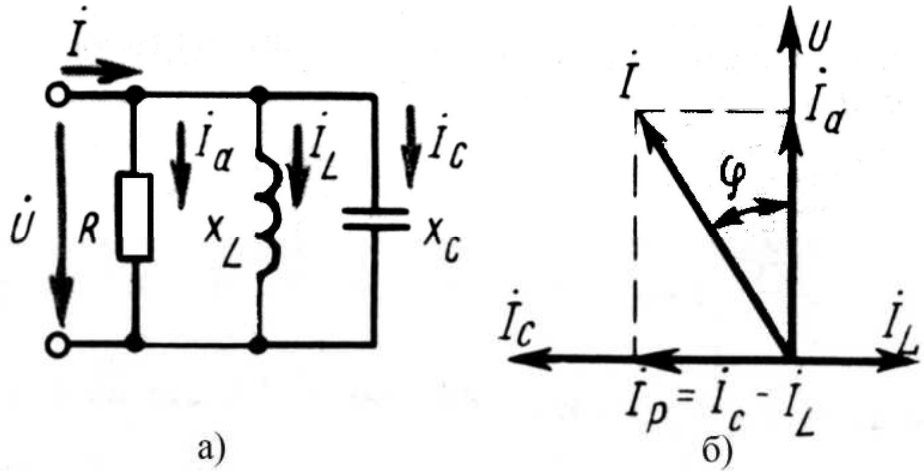

Рисунок 6 – Схема електричного кола з паралельним з'єднанням активного, індуктивного і ємнісного опору та векторна діаграма для його розрахунку

Кут зсуву фаз φ між струмом I і напругою U визначається тригонометричними функціями: $\cos\varphi = I_R/I = g/y$; $\sin\varphi = (I_L - I_C)/I = (b_L - b_C)/y$.

Якщо $b_L > b_C$, то навантаження в цілому має активноіндуктивний характер (вектор $\dot{U}$ випереджає $\dot{I}$), якщо $b_L < b_C$ – активноємнісний (вектор $\dot{U}$ відстає від вектора $\dot{I}$ на кут φ).

9.6 Потужності кіл змінного струму

Активна потужність кола:

$$P = U_R I = UI\cos\varphi,$$

реактивна потужність:

$$Q = U(I_L - I_C) = UI\sin\varphi,$$

повна потужність:

$$S = UI = P/\cos\varphi = Q/\sin\varphi.$$

Резонанс струмів. При рівності реактивних опорів $X_C = X_L$ у колі з паралельним з'єднанням елементів R, L, C виникає резонанс струмів. Струм при

резонансі досягає мінімального значення I = U/R, а cos φ максимального (cosφ = 1).

Значення резонансної частоти встановлюється за формулою:

$$\omega_0 = 1/\sqrt{LC},\ f_0 = 1/(2\pi\sqrt{LC}). \qquad (9.12)$$

Струми в гілках, що містять L і C, при резонансі можуть бути більшими загального струму кола.

Індуктивний і ємнісний струми протилежні за фазою, рівні за значенням і стосовно джерела енергії взаємно компенсуються, тобто йде обмін енергією між індуктивною котушкою і конденсатором.

Реактивна потужність кола при резонансі струмів дорівнює нулю, оскільки рівні і протилежно спрямовані струми I_L і I_C. Іншими словами, реактивна потужність, споживана в X_L, дорівнює реактивній потужності, яку генерує X_C.

Компенсація реактивної потужності. Режим, близький до резонансу струмів, широко використовують для підвищення коефіцієнта потужності cosφ споживачів електроенергії. Струм більшості споживачів електроенергії має активно-індуктивний характер. Вмикаючи паралельно споживачам батареї конденсаторів, розвантажують джерела енергії і лінію від реактивного струму. Індуктивний струм споживачів компенсується ємнісним струмом конденсаторів. У результаті за допомогою компенсації досягають значень cos φ = 0,85 ÷ 0,95. Це дає значний економічний ефект внаслідок розвантаження проводів, зниження втрат, економії матеріалів і електроенергії.

Запитання для перевірки

1. Який струм вважають змінним?
2. За яким законом змінюється струм в електричній мережі?
3. Наведіть часову діаграму змінного струму.
4. Якими величинами вимірюють період, частоту і кутову частоту?
5. Поясніть термін діюче значення змінного струму.
6. Які значенні величин в електричних колах називають миттєвими?
7. Навіщо використовують векторні діаграми?
8. Наведіть найпростіші кола змінного струму.

ТРИФАЗНИЙ СТРУМ

10.1 Основні поняття трифазного струму

У системі виробництва і споживання електроенергії велике поширення одержала трифазна система змінного струму. Вона забезпечує економічну передачу енергії, дозволяє створювати і використовувати надійні в роботі й прості за влаштуванням електродвигуни, генератори і трансформатори.

Трифазна система являє собою сукупність трьох електричних кіл змінного струму однієї частоти, ЕРС яких зсунуті за фазою на 1/3 періоду.

Звичайно амплітуди цих ЕРС рівні, тобто система симетрична. На рисунку 1, а дана часова діаграма таких ЕРС: e_A, e_B, e_C; на рисунку 1, б – їхня векторна діаграма.

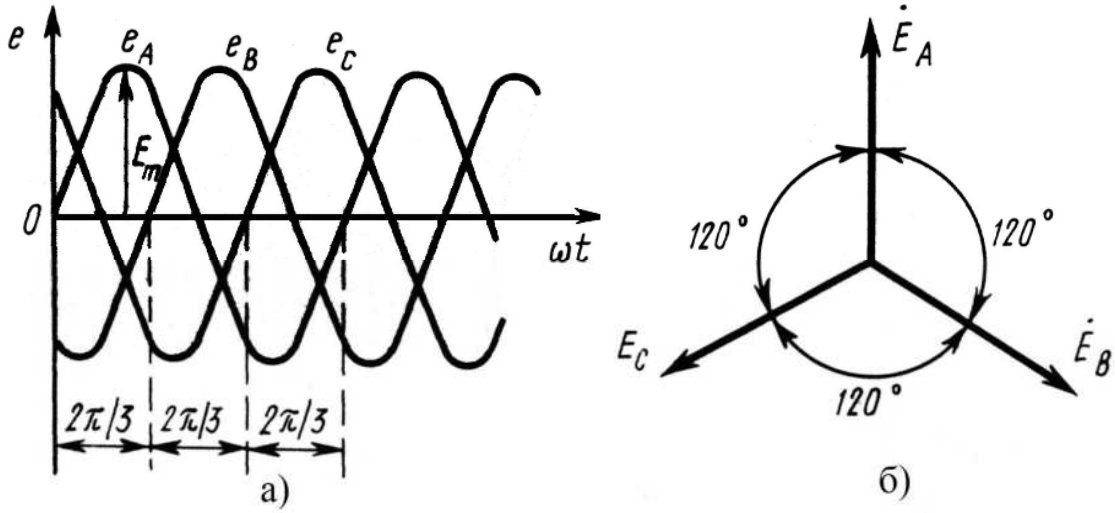

Рисунок 1 – Графік миттєвих значень трифазної системи ЕРС (а) і векторна діаграма (б)

Кожне окреме коло трифазної системи називають фазою.

Електроприймачі й обмотки джерел енергії у трифазних системах можуть бути з'єднані зіркою або трикутником (рис. 2).

*З'єднання приймачів зіркою***.** При з'єднанні фаз приймачів зіркою напруги на їхніх затискачах називають фазними $U_ф$ (U_A, U_B, U_C), а напруги між лінійними проводами – лінійними $U_л$ (U_{AB}, U_{BC}, U_{CA}). На рисунку 2, а зазначені лінійні й фазні напруги, а на рисунку 2, в побудована векторна діаграма для симетричної системи живильних напруг.

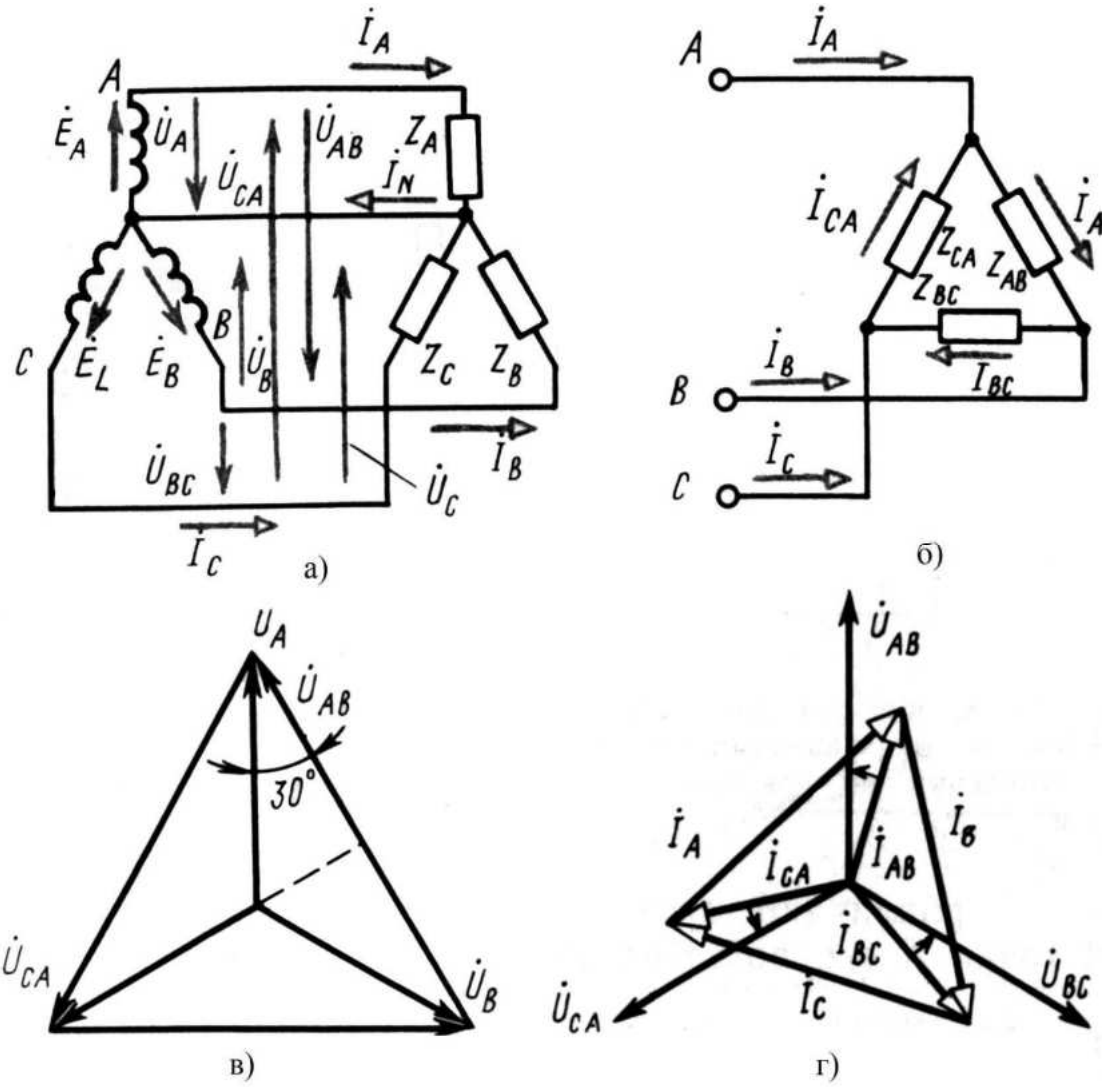

Рисунок 2 – Схеми з’єднань трифазних кіл і векторні діаграми

Співвідношення між векторами фазних і лінійних напруг такі:

$$\dot{U}_{AB} = \dot{U}_A - \dot{U}_B;\ \dot{U}_{BC} = \dot{U}_B - \dot{U}_C;\ \dot{U}_{CA} = \dot{U}_C - \dot{U}_A \qquad (10.1)$$

Для симетричної системи:

$$U_л = \sqrt{3} U_ф. \qquad (10.2)$$

При з’єднанні приймачів зіркою трифазна система буває чотирипровідною (так вмикають освітлювальні й побутові прилади, однофазні двигуни і таке інше) або трипровідною (трифазні двигуни, індукційні печі та ін.).

Для чотирипровідної системи (рис. 2, а), де приймачі включені між нейтральним проводом і кожним з лінійних проводів, можна записати:

$$I_л = I_ф; \tag{10.3}$$

$$I_A = U_A/Z_A;\ I_B = U_B/Z_B;\ I_C = U_C/Z_C; \tag{10.4}$$

$$\cos\varphi_A = R_A/Z_A;\ \cos\varphi_B = R_B/Z_B;\ \cos\varphi_C = R_C/Z_C. \tag{10.5}$$

Миттєве значення струму в нейтральному проводі:

$$i_N = i_A + i_B + i_C. \tag{10.6}$$

Діюче значення струму в нейтральному проводі характеризується геометричним додаванням векторів фазних струмів:

$$\dot{I}_N = \dot{I}_A + \dot{I}_B + \dot{I}_C. \tag{10.7}$$

Навантаження всіх трьох фаз називається симетричним, якщо струм у них однаковий і рівні зсуви фаз між фазними напругами і струмами.

При симетричному навантаженні сума векторів фазних струмів утворює замкнутий трикутник. Отже струм у нейтральному проводі дорівнює нулю. З цієї причини для симетричного трифазного навантаження (наприклад, трифазного двигуна) нейтральний провід не потрібний.

Розрахунок симетричної трифазної системи при рівномірному навантаженні зводиться до розрахунку однієї фази незалежно від наявності нейтрального проводу. У цьому випадку фазна напруга $U_A = U_B = U_C = U_ф = U_л/\sqrt{3}$, фазний струм $I_A = I_B = I_C = I_ф = U_ф/Z_ф$, косинус кута зсуву фаз струму і напруги $\cos\varphi = R_ф Z_ф$, активна, реактивна і повна потужність відповідно:

$$P = 3U_ф I_ф \cos\varphi = \sqrt{3}U_л I_л \cos\varphi;$$

$$Q = 3U_ф I_ф \sin\varphi = \sqrt{3}U_л I_л \sin\varphi;$$

$$S = 3U_ф I_ф = \sqrt{3}U_л I_л.$$

При несиметричній системі напруг або при нерівномірному навантаженні фаз потужності визначаються окремо для кожної фази.

З'єднання приймачів трикутником. При з'єднанні приймачів енергії трикутником (рис. 2, б) їхні фази приєднують до лінійних проводів, що йдуть від

джерела електроенергії. Струм у кожному з лінійних проводів дорівнює різниці фазних струмів (за позитивні напрямки струмів тут, як і раніше, приймають напрямок від генератора до приймача). Це справедливо як для миттєвих, так і для діючих значень струмів, що знаходять як геометричну різницю векторів відповідних фазних струмів (рис. 2, г):

$$\dot{I}_A = \dot{I}_{AB} - \dot{I}_{CA}; \dot{I}_B = \dot{I}_{BC} - \dot{I}_{AB}; \dot{I}_C = \dot{I}_{CA} - \dot{I}_{BC}.$$

Якщо система лінійних напруг симетрична, тобто $U_{AB} = U_{BC} = U_{CA} = U_ф = U_л$, навантаження фаз рівномірне, тобто $Z_{AB} = Z_{BC} = Z_{CA}$ і $\varphi_{AB} = \varphi_{BC} = \varphi_{CA} = \varphi_ф$, то й діючі значення фазних струмів рівні між собою, мають однаковий фазовий зсув $\varphi_ф$ щодо відповідних напруг і на 120° один стосовно іншого. У цьому разі:

$$I_л = \sqrt{3} I_ф; \cos\varphi_ф = R_ф / Z_ф; P = 3U_ф I_ф \cos\varphi = \sqrt{3} U_л I_л \cos\varphi;$$
$$Q = \sqrt{3} U_л I_л \sin\varphi; S = \sqrt{3} U_л I_л.$$

10.2 Електричні машини і трансформатори

В електричних машинах і трансформаторах відбувається перетворення електроенергії. У генераторах механічна енергія перетворюється в електричну, у двигунах відбувається зворотне перетворення; трансформатори перетворюють змінний струм однієї напруги в змінний струм іншої напруги.

Електричні машини мають властивість оборотності: кожний генератор може працювати як двигун і навпаки. Однак кожна конкретна машина звичайно призначається для одного режиму роботи: як генератор або як двигун. У кожному трансформаторі перетворення енергії також може бути змінене на зворотне. Високі енергетичні показники, зручність підведення і відбору енергії, можливість виконання машин найрізноманітнішої потужності, швидкості обертання, а також зручність обслуговування і простота керування зумовили велике поширення електричних машин.

Трансформатори використовують у системах передачі й розподілу електроенергії, а також для одержання різних рівнів напруги на виробництві й у побуті. Їхнє застосування забезпечує економічну передачу електроенергії до споживачів.

Корисна потужність, на яку розрахована електрична машина, називається номінальною. Всі інші величини, які характеризують роботу машини при цій потужності, також називаються номінальними. Ці величини вказують у паспор-

ті машини. Для трансформаторів указують не корисну, а повну номінальну потужність.

10.3 Трансформатори

Будова. Трансформатор складається зі сталевого замкнутого магнітопроводу і двох або декількох індуктивно зв'язаних між собою обмоток. Магнітопровід необхідний для посилення електромагнітного зв'язку між обмотками. Магнітопровід трансформатора, складається зі стрижнів, на яких розміщені обмотки, а також верхнього і нижнього ярма.

Для зменшення втрат від вихрових струмів магнітопровід збирають з листів електротехнічної сталі товщиною 0,35 або 0,5 мм. Листи ізолюють один від одного лаком, тонким папером або шаром окалини. Листи звичайно збирають «внакладку», тобто з перекриттям зазорів. Це дозволяє забезпечити високу магнітну провідність магнітопроводу й обмежити шляхи для проходження вихрових струмів. Листи магнітопроводу стягують болтами, пропущеними через ізольовані втулки. Останнім часом осердя трансформаторів навиваються смугою з трансформаторної сталі.

У системі електропостачання в основному використовують масляні трансформатори. У них магнітопровід з обмотками вміщують у бак з трансформаторним маслом. Просочення маслом підвищує електричну міцність ізоляції, а його циркуляція поліпшує охолодження обмоток і магнітопроводу. Збільшують охолоджувану поверхню трансформаторів використанням трубчастих радіаторів, які розташовані зовні трансформатора.

У громадських і виробничих приміщеннях за умовами пожежної безпеки баки трансформаторів заповнюють негорючою рідиною (соволом, совтолом) або використовують сухі трансформатори з повітряним охолодженням. Вони розраховані на менші потужності, ніж масляні, і випускаються на напруги до 10 кВ.

Обмотки трансформаторів найчастіше виконують у вигляді циліндричних котушок з мідних або алюмінієвих ізольованих один від одного проводів круглого або прямокутного перерізу. Для кращого магнітного зв'язку їх розташовують концентрично одна на одній, як це показано на рисунку 3, а. У силових трансформаторів ближче до стержня знаходиться обмотка нижчої напруги НН, а обмотка вищої напруги ВН – зовні.

Принцип дії. Дія трансформатора заснована на явищі взаємної індукції. Розглянемо двообмотковий однофазний трансформатор (рис. 3, б). У ньому є індуктивно зв'язані обмотки: первинна з кількістю витків ω_1 і вторинна ω_2.

Якщо первинну обмотку підключити до джерела змінної напруги U_1, то по ній протікатиме струм і, що збудить в осерді трансформатора змінний магнітний потік Ф.

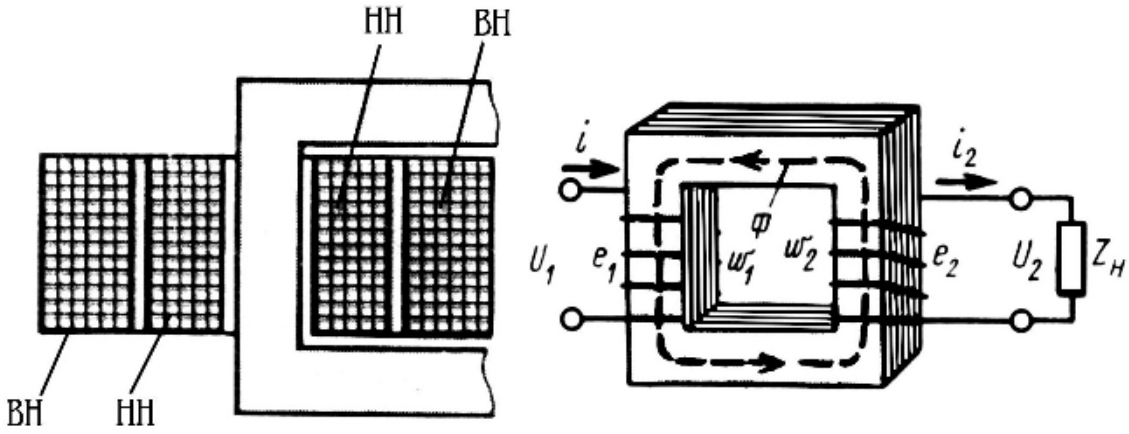

Рисунок 3 – Розташування обмоток трифазного силового трансформатора (а) і електромагнітна схема двообмоткового трансформатора (б)

Цей потік, пронизуючи витки обмоток трансформатора, буде індукувати у них ЕРС e_1 і e_2. Якщо вторинну обмотку замкнути на який-небудь приймач енергії з опором $Z_н$, то по цій обмотці і через приймач протікатиме струм i_2. У такий спосіб електрична енергія, трансформуючись, передається з первинного кола у вторинне.

ЕРС в обмотках. Миттєві значення ЕРС, індукованих в обмотках трансформатора, визначаються виразами:

$$e_1 = -\omega_1 \frac{\Delta\Phi}{\Delta t}, e_2 = -w_2 \frac{\Delta\Phi}{\Delta t}. \quad (10.8)$$

Діючі значення цих ЕРС при синусоїдальній зміні магнітного потоку Ф

$$E_1 \approx 4{,}44\ \omega_1\, f\, \Phi_m,\ E_2 \approx 4{,}44\ \omega_2\, f\, \Phi_m, \quad (10.9)$$

де f – частота мережі, Гц;

Φ_m – максимальне значення основного потоку, Вб.

Відношення ЕРС обмоток трансформатора, дорівнює відношенню числа витків і називається коефіцієнтом трансформації

$$k_т = E_1/E_2 = \omega_1/\omega_2. \quad (10.10)$$

При $k_т > 1$ трансформатор понижувальний, при $k_т < 1$ – підвищувальний. Будь-який трансформатор може бути використаний як підвищувальний, так і понижувальний.

Режими роботи. У режимі неробочого ходу трансформатора коло його вторинної обмотки розімкнуте; до первинного підведена номінальна напруга $U_{1н}$, у ньому протікає невеликий струм неробочого ходу I_0. За цих умов можна вважати, що $E_1 = U_1$ і $E_2 = U_2$, тому коефіцієнт трансформації і визначають при цьому режимі роботи трансформатора.

Дослідом холостого ходу можна знайти також втрати потужності P_0 у сталі магнітопроводу на гістерезис і вихрові струми.

У робочому режимі роботи трансформатора по його обмотках ω_1 і ω_2 протікають струми I_1 і I_2 при напругах на обмотках U_1 і U_2. У номінальному робочому режимі – номінальні струми $I_{1н}$, $I_{2н}$ при номінальних напруга $U_{1н}$ і $U_{2н}$.

Нехтуючи спадом напруги в первинній обмотці трансформатора, можна вважати $U_1 \approx E_1$. Тоді при незмінній за значенням напрузі $U_1 = U_{1н}$ при будь-якому навантаженні трансформатора ЕРС E_1 постійна. Оскільки вона залежить від магнітного потоку ($E_1 = 4{,}44\ \omega_1 \Phi f$), то і магнітний потік при будь-якому навантаженні можна вважати постійним.

Струм I_2, який протікає у вторинній обмотці трансформатора, створює свій магнітний потік, який, відповідно до правила Ленца, спрямований назустріч магнітному потоку первинної обмотки і прагне його зменшити. Щоб результуючий магнітний потік залишався незмінним, магнітний потік вторинної обмотки повинен бути урівноважений магнітним потоком первинної обмотки. Тому при збільшенні струму I_2 збільшується і струм I_1. Магнітні потоки, створювані цими струмами, врівноважуються, і результуючий магнітний потік в осерді зберігає практично незмінне значення.

Якщо знехтувати втратами в трансформаторі, то можна вважати рівними потужності трансформатора, споживану з мережі і ту, що віддається споживачеві:

$$U_1 I_1 = U_2 I_2. \qquad (10.11)$$

Тоді $I_2/I_1 = U_1/U_2 = \omega_1/\omega_2 = k_т$; $I_2 = k_т I_1$.

У понижувальному трансформаторі $U_1 > U_2$ у $k_т$ раз; $I_1 < I_2$ також у $k_т$ раз. У підвищувальному трансформаторі співвідношення зворотне.

Завантаження трансформатора в робочому режимі оцінюються коефіцієнтом завантаження:

$$\beta = \frac{P_2}{S_н cos\phi} = \frac{I_2}{I_{2н}}, \quad (10.12)$$

де P_2 – корисна потужність трансформатора;

$S_н$ – номінальна повна потужність;

cosφ – коефіцієнт потужності навантаження.

У режимі короткого замикання вторинна обмотка трансформатора замкнута накоротко. Слід розрізняти коротке замикання в умовах експлуатації і досліду. В експлуатаційних умовах коротке замикання – аварійний режим, при якому в трансформаторі протікають великі струми, виділяється велика кількість теплоти і створюються великі механічні зусилля, здатні його зруйнувати. Дослід же короткого замикання виконують при такій первинній напрузі, щоб значення струмів I_1 і I_2 обмоток трансформатора були номінальними. Цю напругу $U_к$ (у відсотках від $U_{1н)}$ вказують на щитку трансформатора поруч з іншими номінальними даними. Вона характеризує значення опорів обмоток трансформатора і використовується при розрахунках спаду напруги при навантаженні і струмі короткого замикання:

$$I_{1к} = I_{1н} \frac{100}{U_к\%}. \quad (10.13)$$

Меншому значенню ЕРС $E_1 \approx U_к$ відповідає менше значення магнітних втрат. Втрати $P_к$ в обмотках, які визначаються у цьому досліді такі ж, як і в номінальному режимі роботи трансформатора, оскільки в обмотках протікають номінальні струми.

Зовнішня характеристика. Зі зміною навантаження трансформатора змінюються струми I_1 і I_2 в його обмотках, спадання напруги в них і напруга U_2 на затисках вторинної обмотки.

Залежність $U_2(I)$ називається зовнішньою характеристикою. При найбільш розповсюдженому активно-індуктивному навантаженні ця характеристика має вигляд похилої прямої, і показує зміну напруги ΔU від струму I_2.

Втрати і ККД. Перетворення електроенергії в трансформаторах відбувається з високим ККД (до 98–99 % у потужних трансформаторах). Періодичні зміни магнітного поля в магнітопроводі трансформатора супроводжуються втратами в сталі магнітопроводу на гістерезис і вихрові струми. Ці втрати зале-

жать від сорту сталі і зростають зі збільшенням частоти, магнітної індукції і маси магнітопроводу.

Втрати в сталі не залежать від навантаження і дорівнюють втратам холостого ходу:

$$\Delta P_{ст} = P_0. \tag{10.14}$$

Протікання струмів обмотками трансформатора викликає втрати потужності в них, пропорційні квадрату коефіцієнта завантаження трансформатора:

$$\Delta P_{об} = \beta^2 P_к, \tag{10.15}$$

де $P_к$ – номінальні втрати в обмотках.

ККД трансформатора визначається за формулою:

$$\eta = \frac{P_2}{P_1} = \frac{P_2}{P_2 + \Delta P_{ст} + \Delta P_{об}} = \frac{\beta S_н cos\phi}{\beta S_н cos\phi + P_0 + \beta^2 P_к}. \tag{10.16}$$

На рисунку 4 показана залежність η = f(β). Видно, що при початковому навантаженні трансформатора ККД різко зростає, а потім змінюється дуже мало, досягаючи при деякому значенні β максимуму.

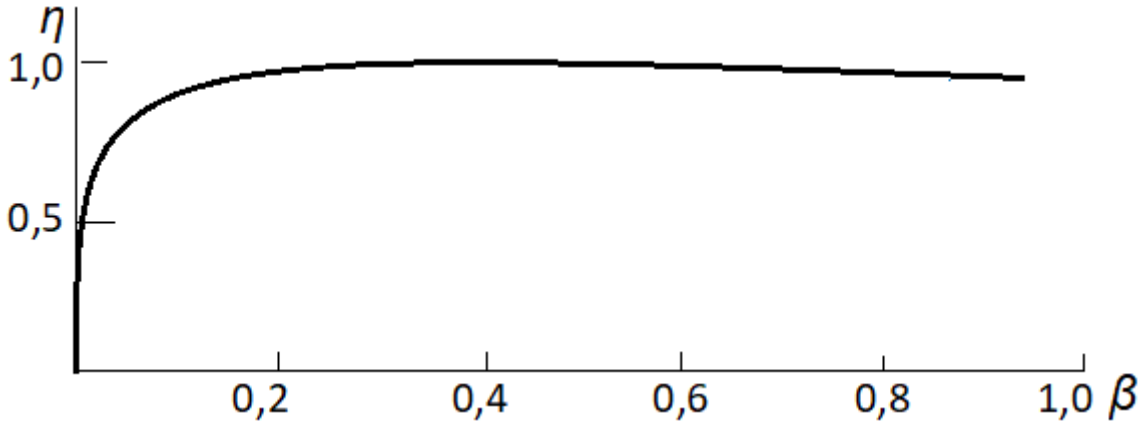

Рисунок 4 – Графік залежності ККД трансформатора від коефіцієнта завантаження η = f(β)

Трифазний трансформатор. Для трансформації трифазного струму можна використовувати три однофазних трансформатори (рис. 5, а), обмотки яких можуть бути з'єднані за схемою зірки або трикутника. На практиці застосову-

ють трифазні трансформатори (рис. 5, б) із загальним для всіх фаз магнітопроводом.

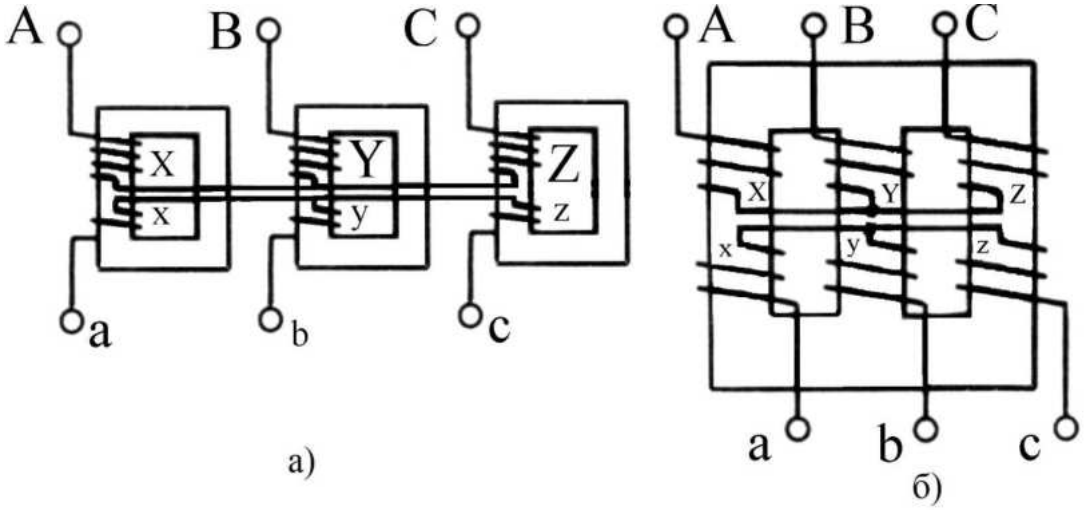

Рисунок 5 – Схеми вмикання трансформаторної групи (а) і трифазного тристрижневого трансформатора (б)

Основними способами з'єднання обмоток є з'єднання зіркою і трикутником. З'єднання обох обмоток у зірку є найпростішим і найдешевшим, оскільки кожна з обмоток та її ізоляція (при заземленій нейтралі) повинні бути розраховані тільки на фазні напруги і лінійний струм. З'єднання зірка – трикутник застосовують для трансформаторів великої потужності в тих випадках, коли на стороні нижчої напруги не потрібний нейтральний провід.

Автотрансформатори. В автотрансформаторі обмотка нижчої напруги є частиною обмотки вищої напруги (рис. 6).

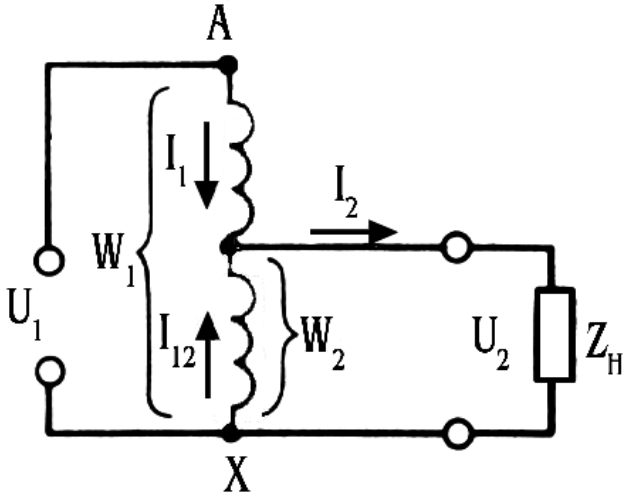

Рисунок 6 – Принципова схема автотрансформатора

Електроенергія в обмотках автотрансформаторів передається не тільки електромагнітним шляхом, але і за рахунок безпосереднього зв'язку обмоток.

Напруги і струми в автотрансформаторі зв'язані тими ж співвідношеннями, як і в звичайному трансформаторі $U_1/U_2 \approx \omega_1/\omega_2 \approx I_2/I_1$.

Струми I_1 і I_2 протилежні за фазою, тому в загальній частині обмотки ω_2 протікає струм:

$$I_{12} = I_2 - I_1. \qquad (10.17)$$

Для всієї переданої потужності, яка називається прохідною, можна записати:

$$S = U_2 I_2 = U_2(I_1 + I_{12}) = U_2 I_1 + U_2 I_{12} = S_e + S_p, \qquad (10.18)$$

де S_e – потужність, яка передається з обмотки ω_1 в обмотку ω_2 завдяки електричному зв'язкові;

S_P – розрахункова потужність, яка передається магнітним шляхом.

Розрахункова потужність визначає розміри магнітопроводу і, через те що вона складає тільки частину прохідної, то при виготовленні автотрансформатора можна використовувати магнітопровід меншого перерізу, ніж для звичайного трансформатора тієї ж потужності. Це дозволяє економити сталь. Крім цього, при виготовленні автотрансформатора заощаджується мідь. Із зменшенням перерізу магнітопроводу зменшується середня довжина витка; обмотки мають загальну частину ω_2, яку можна виконати проводом меншого перерізу, ніж обмотку нижчої напруги звичайного трансформатора тієї ж потужності.

Інші типи трансформаторів. В енергетиці застосовують триобмоткові трансформатори з однією первинною і двома вторинними обмотками або двома первинними й однією вторинною обмоткою. За номінальну потужність такого трансформатора приймають номінальну потужність найбільш потужної його обмотки.

У пристроях радіотехніки й автоматики часто застосовують багатообмоткові трансформатори малої потужності з однією первинною і декількома вторинними обмотками.

У трансформаторах з плавним регулюванням напруги застосовують контактні щітки, які ковзають неізольованою зовнішньою поверхнею вторинної обмотки, внаслідок чого змінюється число витків, які включаються в роботу.

Використовують також трансформатори з рухомою вторинною обмоткою, з підмагнічуванням магнітопроводу постійним струмом та ін.

Зварювальні трансформатори – це однофазні трансформатори з вторинною напругою холостого ходу, рівною 60–75 В. При роботі такого трансформатора коротке замикання є нормальним експлуатаційним режимом. Коло зварю-

вального струму трансформатора повинне мати велику індуктивність, для чого послідовно з вторинною обмоткою вмикають дросель. Завдяки цьому обмежується струм короткого замикання.

У випрямних трансформаторах у коло вторинних обмоток включені електричні вентилі, що пропускають струм в одному напрямку. Несинусоїдальність струмів обмоток таких трансформаторів і додаткове підмагнічування магнітопроводу в однонапівперіодних схемах випрямлення приводять до збільшення габаритних розмірів і маси трансформаторів у порівнянні з трансформаторами, які працюють на синусоїдальних струмах.

У пристроях автоматики, електроніки, зв'язку широко використовують імпульсні трансформатори, що служать для передачі імпульсних сигналів малої тривалості. Основна вимога, що ставиться до цих трансформаторів, – мінімальне спотворення сигналу, яке забезпечується зменшеним значенням індукції в магнітопроводі і застосуванням для нього магнітних матеріалів з високими магнітними властивостями (на високих частотах). Так само, як і у високочастотних трансформаторах, тут використовують магнітопроводи з тонких листів високоякісної електротехнічної сталі, залізонікелевих сплавів, магнітодіелектриків і феритів.

Для приєднання електровимірювальних приладів до кіл з великими струмами і напругами використовують вимірювальні трансформатори струму і напруги.

Запитання для перевірки

1. Яку систему змінного струму називають трифазною?
2. Що таке фаза у трифазній системі електропостачання?
3. Поясніть на векторній діаграмі різницю між фазними і лінійними величинами.
4. Яка трифазна електрична система називається симетричною?
5. Що таке електрична машина?
6. Поясніть схему будови та принцип дії трансформатора.
7. Дайте визначення коефіцієнта трансформації;
8. Який трансформатор називають понижувальним, а який підвищувальним?
9. Який ККД мають трансформатори?
10. Опишіть конструкцію трифазних трансформаторів;
11. Наведіть принципову схему автотрансформатора;
12. В чому полягає різниця між трансформаторами і автотрансформаторами?

АСИНХРОННІ ТА СИНХРОННІ МАШИНИ

11.1 Асинхронні машини

Асинхронні машини найчастіше використовують як двигуни. Найбільше застосування одержали трифазні асинхронні двигуни. Їх застосовують для приводу верстатів, насосів, вентиляторів, вантажопідйомних механізмів і в багатьох інших випадках. Асинхронні двигуни (АД) бувають від десятків ват до декількох мегават, при напругах обмотки статора до 10 кВ. Деяким недоліком АД є труднощі, пов'язані з регулюванням частоти обертання. Крім того, ці двигуни мають відносно низький cosφ (0,85–0,9 при повному навантаженні; і 0,2–0,3 на холостому ході).

Будова. Двигун (рис. 1) складається з нерухомої (*статора*) і обертової (*ротора*) частин. Основними деталями статора є корпус *7* і осердя *6* з обмоткою *8*. Корпус відливають з алюмінію (малопотужні двигуни) або з чавуну. Ребра *13* на зовнішній частині корпусу збільшують площу поверхні охолодження. Осердя статора зібране з листів електротехнічної сталі, вкритих лаком. Ротор складається із шихтованого осердя *5* з обмоткою і валу *2*. Вал ротора обертається в підшипниках кочення *1* і *11*, розміщених у підшипникових щитах *3* і *9*.

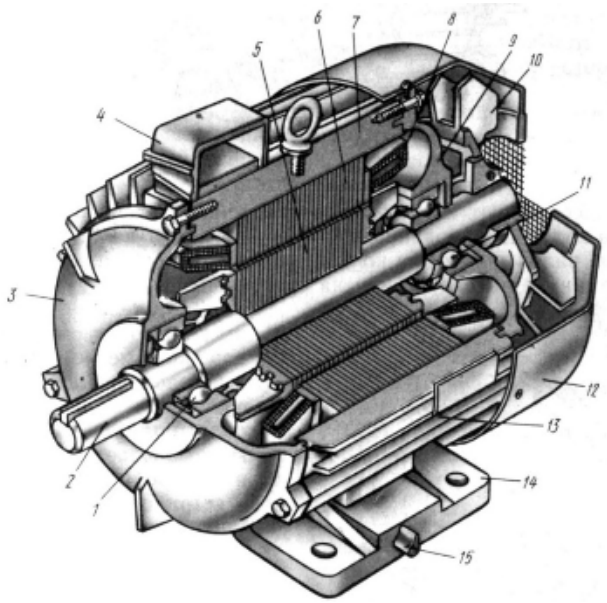

Рисунок 1 – Будова трифазного асинхронного двигуна

1, 11 – підшипники, 2 – вал, 3, 9 – підшипникові щити, 4 – коробка виводів, 5 – сердечник ротора, 6 – сердечник статора, 7 – корпус статора, 8 – обмотка статора, 10 – вентилятор, 12 – кожух, 13 – ребра, 14 – лапи, 15 – болт заземлення

Двигун охолоджується обдуванням зовнішньої поверхні корпусу. Потік повітря створює відцентровий вентилятором 10, прикритий кожухом 12.

Кінці обмоток статора приєднані до затискачів коробки виводів 4; для кріплення двигуна використовуються лапи 14, для заземлення – болт 15.

На внутрішній стороні пустотілого циліндра осердя статору є пази, в які закладають статорну обмотку. У трифазного двигуна вона трифазна і число її котушок в цьому разі кратне трьом (3, 6, 9 і т. д.).

Залежно від конструкції обмотки ротора розрізняють асинхронні двигуни з короткозамкнутим і фазним роторами.

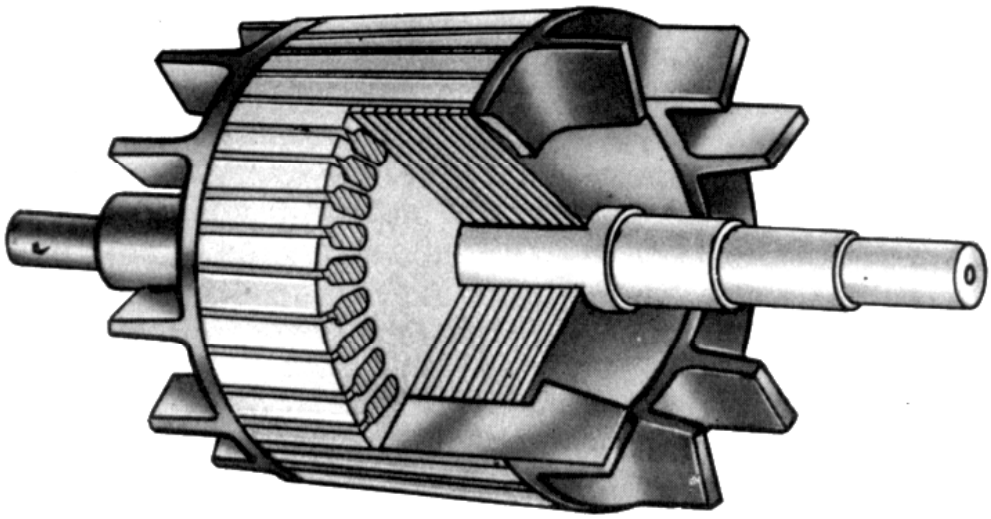

Рисунок 2 – Короткозамкнутий ротор

Трифазний асинхронний двигун з короткозамкнутим ротором найпростіший, надійний у роботі і дешевий. Обмотку ротора такого двигуна звичайно виконують з алюмінієвих стержнів, які заливають без ізоляції в пази. Одночасно з торців відливають короткозамикаючі кільця з лопатками вентилятора для примусового охолодження. На рисунку 2 зображений короткозамкнутий ротор (з розрізом). У потужних машинах ($P_н > 100$ кВт) для роторної обмотки використовують мідні стержні і замикаючі кільця.

У пазах ротора двигуна з фазним ротором укладають обмотку, подібну до обмотки статора. Фазні обмотки ротора з’єднують у зірку, а три її виводи приєднують до трьох контактних кілець, насаджених на вал і ізольованих одне від одного і від валу. Щітками, накладеними на кільця, обмотка ротора може бути замкнута накоротко або на опір. Двигуни з фазним ротором складніші, дорожчі і менш надійні в експлуатації, ніж з короткозамкнутим, але мають кращі пускові й регулювальні властивості.

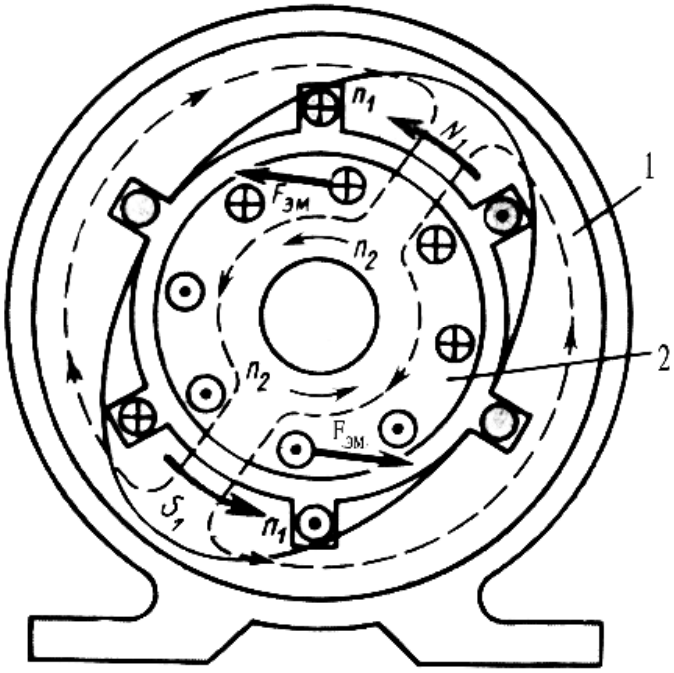

Рисунок. 3 – До принципу дії асинхронного двигуна

Принцип дії. Осердя статора *1* і ротора *2* утворюють магнітне коло асинхронної машини (рис. 3). При проходженні трифазного струму по трифазній обмотці статора створюється обертове магнітне поле частотою

$$n_1 = 60f/p, \text{ або } \omega_1 = 2\pi f/p \approx n_1/9{,}55, \qquad (11.1)$$

де f – частота живильної мережі;

p – число пар полюсів на фазу.

(Таким чином, при f = 50 Гц для двигунів з числом полюсів обмотки статора 2p = 2, 4, 6, 8, 10 синхронна частота обертання відповідно дорівнює 3 000, 1 500, 1 000, 750, 600 об/хв.).

Це поле (показане пунктиром) перетинає провідники обмотки ротора і наводить у них ЕРС E_2. Під дією ЕРС у замкнутій обмотці ротора виникає струм I_2. На кожен провідник обмотки ротора, який пересікає магнітне поле, діє електромагнітна сила $F_{ем}$. Сили, що діють на всі провідники обмотки ротора, створюють обертовий момент, що захоплює ротор услід за полем. Ротор двигуна обертається з асинхронною швидкістю n_2 меншою, ніж синхронна швидкість обертання поля n_1, Різниця швидкостей обертання поля і ротора характеризується ковзанням S, яке часто виражається у відсотках:

$$S = \frac{n_1 - n_2}{n_1} \cdot 100\%. \qquad (11.2)$$

У номінальному режимі роботи двигуна S звичайно невелике (2–6 %). Якщо ротор нерухомий ($n_2 = 0$), то $s = 100$ %.

Наявність різниці швидкостей n_1 і n_2 принципово необхідна (у двигуні), тому що тільки в цьому разі магнітне поле перетинає провідники ротора, у них наводиться ЕРС, виникають струми, створюється електромагнітний обертовий момент.

Для зміни напрямку обертання ротора, тобто для реверсування двигуна, необхідно змінити напрямок обертання магнітного поля, створюваного обмоткою статора. Це досягається перемиканням двох фаз, тобто двох із трьох проводів, що з'єднують обмотку статора з мережею.

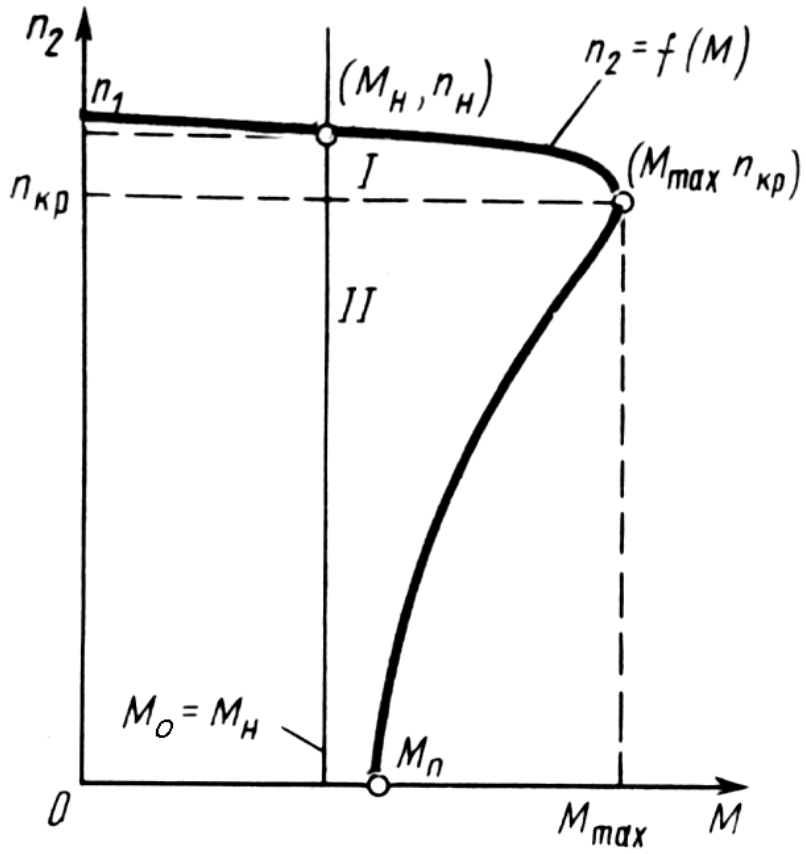

Рисунок 4 – Механічна характеристика асинхронного двигуна

Механічна характеристика – це залежність, що показує, як змінюється частота обертання ротора при зміні моменту на валу двигуна.

На рисунку 4 представлена механічна характеристика $n_2 = f(M)$ асинхронного двигуни. Її характерні точки: 0, n_1 – ідеальний неробочий хід; M_{max}, $n_{кр}$ – максимальний момент, критична частота обертання; M_n – пусковий момент. Точкою M_{max} крива поділяється на дві області: I – область усталеної роботи, де

знаходиться точка номінального режиму ($M_н$, $n_н$); II – область нестійкого режиму, яка використовується при пуску або змушеній зупинці двигуна.

Пуск двигуна з короткозамкнутим ротором. Для двигунів з короткозамкнутим ротором звичайно застосовують пряме включення в мережу обмоток статора C_1, C_2, C_3 (рис. 5, а) за допомогою відповідної комутаційної апаратури. Короткочасний поштовх пускового струму ($I_п = (4 \div 7)\ I_н$) безпечний для двигуна, але може бути причиною надмірно великого спадання напруги в мережі при недостатній потужності джерела енергії (як правило, трансформатора). У цих випадках обмежують пусковий струм пуском двигуна при зниженій напрузі.

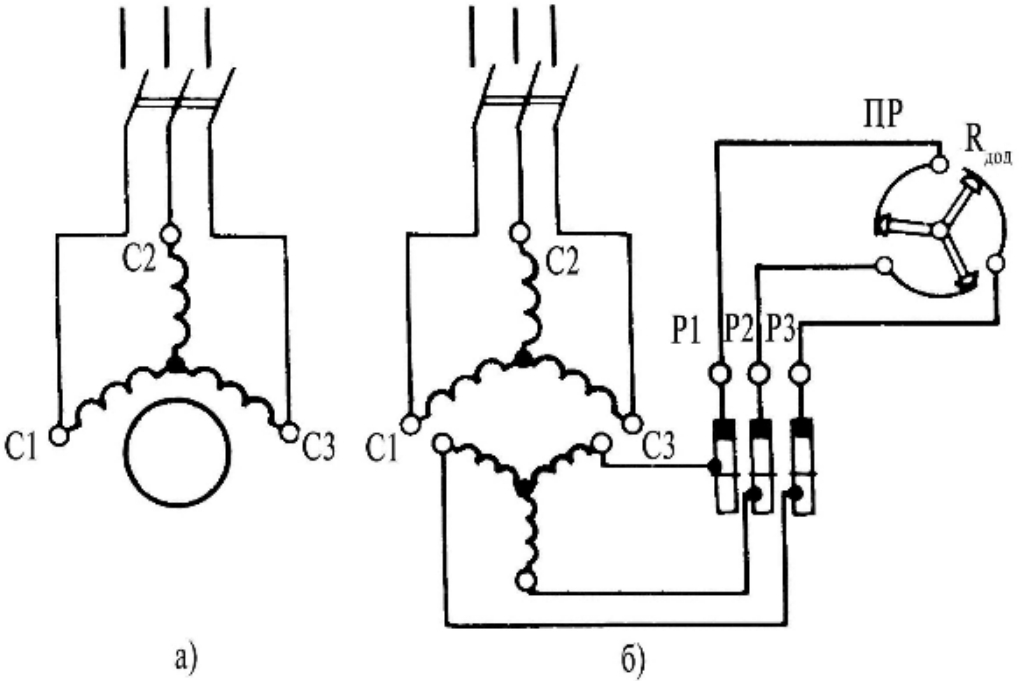

Рисунок 5 – Схема вмикання трифазних асинхронних двигунів з короткозамкнутим (а) і з фазним (б) ротором

Напругу в момент пуску двигуна знижують: використовуючи на період пуску з'єднання обмотки статора в зірку з наступним переключенням її на трикутник; вмикаючи в коло обмотки статора на період пуску додаткові активні або реактивні опори (реактори); підключаючи двигун до мережі через понижувальний автотрансформатор.

Загальним недоліком усіх цих способів є значне зменшення пускового і максимального моментів двигуна, пропорційних квадрату прикладеної напруги.

Пуск двигуна з фазним ротором. Кращі пускові характеристики має двигун з фазним ротором. Для зниження пускового струму обмотки Р1, Р2, Р3 ротора при пуску замикають на активний опір $R_{дод}$ пускового реостата ПР (рис. 5, б). При цьому зменшується струм ротора, а отже, і струм статора. У той же час активна складова струму ротора збільшується, підвищуючи пусковий момент.

У пусковому реостаті звичайно є декілька ступенів, що послідовно виводяться під час пуску аж до замикання обмотки ротора накоротко. Тривала робота з додатковим опором у колі ротора неекономічна внаслідок значних втрат.

Регулювання частоти обертання. Частота обертання ротора асинхронного двигуна визначається швидкістю обертання магнітного поля:

$$n_1 = 60f/p. \tag{11.3}$$

Для ступінчастої зміни частоти обертання застосовують спеціальні дво-, три- і чотиришвидкісні двигуни. На їхньому статорі розміщують обмотки з різним числом полюсів.

Крім того, можна використовувати перемикання фазних обмоток статора з послідовного з'єднання (рис. 6, а) на паралельне (рис. 6, б). При цьому число полюсів зменшується і відповідно збільшується n_1.

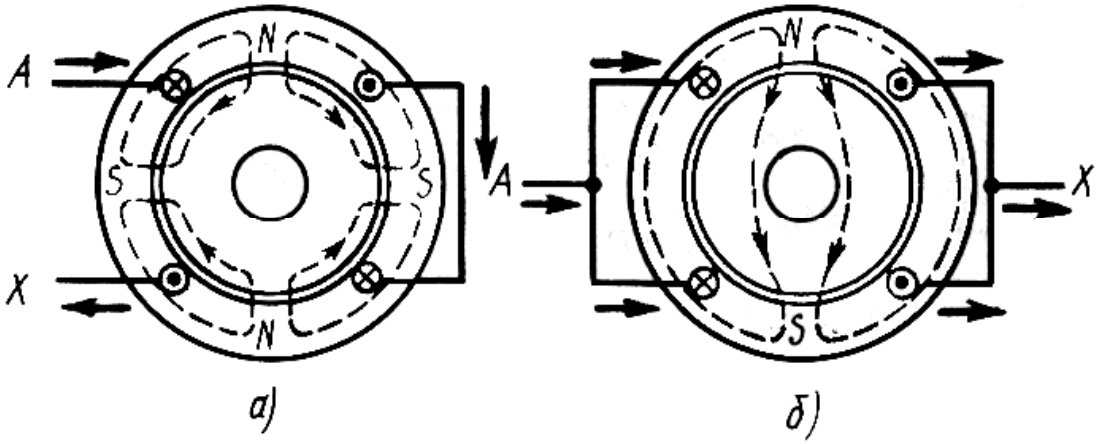

Рисунок 6 – Зміна числа полюсів магнітного поля при ввімкненні фази статорної обмотки послідовно (а) і паралельно(б)

Для плавного регулювання частоти обертання застосовують тиристорні перетворювачі частоти, які живлять двигуни електричним струмом з регульованою частотою.

У двигунах з фазним ротором для регулювання швидкості перемикають ступені реостата, ввімкненого в коло ротора. Двигуни працюють у цих режимах порівняно короткочасно.

Гальмування. При експлуатації двигунів нерідко виникає необхідність їхнього гальмування (швидкий перехід від одного режиму до іншого, точна зупинка та ін.).

Гальмування двигуна може бути механічним і електричним.

При механічному гальмуванні електромагніт або пружини впливають через гальмові колодки на шків, закріплений на валу двигуна.

При електричному гальмуванні використовують режим противмикання, коли в працюючого двигуна перемиканням двох фаз змінюється напрямок обертання поля, або режим динамічного гальмування, коли після відключення двигуна від мережі в обмотку статора короткочасно подається постійний струм.

Асинхронні двигуни невеликої потужності (до 600 Вт) застосовують в автоматичних пристроях і електропобутових приладах. Найчастіше використовують однофазні мікродвигуни. Для цих двигунів характерні підвищений (у порівнянні зі звичайними двигунами) опір обмотки ротора і відповідно робота з підвищеним ковзанням.

У пристроях автоматики використовують асинхронні виконавчі двигуни й асинхронні тахогенератори.

Виконавчі двигуни служать для перетворення електричного сигналу в механічне переміщення валу. Частота обертання таких двигунів повинна плавно змінюватися під впливом сигналу керування. Виконавчі двигуни не допускають самоходу (при знятті сигналу керування ротор негайно зупиняється), мають лінійні механічні і регулювальні характеристики, високу швидкодію, безшумні.

Асинхронні тахогенератори перетворюють механічне обертання в електричний сигнал. Їх застосовують для виміру частоти обертання, вироблення сигналів управління, виконання операцій диференціювання й інтегрування в схемах лічильних та обчислювальних пристроїв.

Лінійні асинхронні двигуни застосовують у тих випадках, коли потрібне лінійне переміщення рухомої частини виконавчого пристрою. Їхній принцип дії заснований на здатності багатофазної системи струмів створювати біжуче магнітне поле. Таке поле створюється струмами трифазної обмотки, покладеної в прямолінійний статор. Паралельно статору розташовують рухому частину двигуна – магнітопровід, у пази якого закладені алюмінієві або мідні стержні короткозамкнутої обмотки.

Взаємодія біжучого магнітного поля зі струмами, які наводяться в цій обмотці, створює електромагнітні сили, що захоплюють рухому частину двигуна за собою.

Рухомою частиною такого двигуна може бути електропровідна рідина (рідкі метали, електроліти), що заповнює канал між двома статорами з трифазною обмоткою. Такі пристрої називаються магнітогідродинамічними насосами.

Використання лінійних двигунів дозволяє виключити в механічних пристроях кінематичні ланки для перетворення обертового руху в поступальний.

11.2 Синхронні машини

Синхронні машини використовують як генератори і як двигуни. Майже всі генератори змінного струму – це синхронні машини. Синхронні двигуни застосовують рідше асинхронних і тільки в тих випадках, коли при заданій потужності і режимі роботи вони виявляються більш економічними, ніж асинхронні, або коли потрібен привод з абсолютно жорсткою механічною характеристикою.

Будова. Будова і ввімкнення синхронної машини показані на рисунку 7. У пазах статора 1 машини подібно до того, як це зроблено в асинхронному двигуні, покладена трифазна силова обмотка 3. Початок фазних обмоток позначений A, B, C; кінці – X, Y, Z. На роторі 2 розміщена обмотка збудження 4. Вона з'єднана через кільця 6 і щітки 5 із джерелом постійного струму. Потужність, необхідна для збудження, складає 0,3–3 % від номінальної потужності синхронної машини.

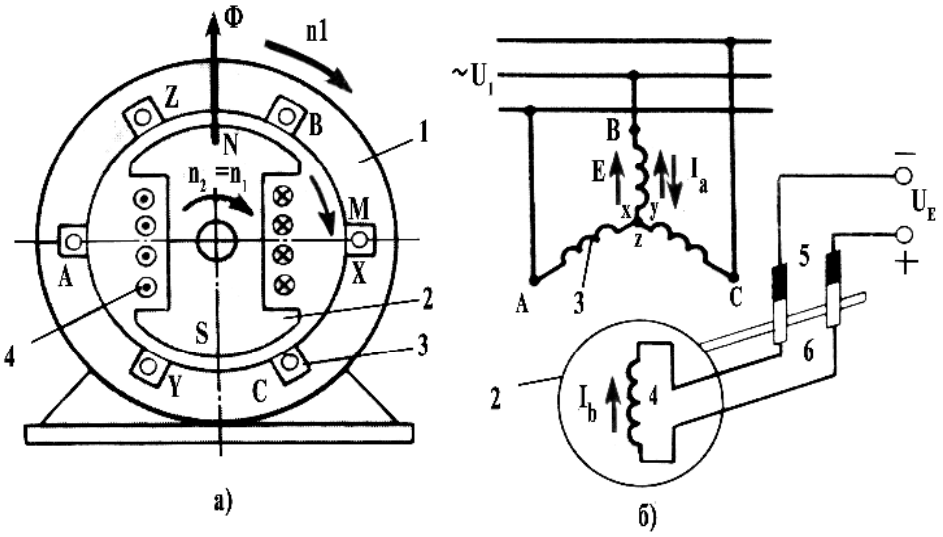

Рисунок 7 – Електромагнітна схема синхронної машини (а) і схема її вмикання (б). 1 – статор, 2 – ротор, 3 – обмотка статора, 4 – обмотка збудження

Принцип дії синхронного генератора. Постійний магнітний потік, створюваний струмом ротора, замикається через сталь ротора, повітряні зазори і осердя статора. Якщо ротор обертається, то створюється обертове магнітне поле. Перетинаючи провідники фазних обмоток статора, це поле наводить у них змінну ЕРС E. Частота обертання ротора n_2 підтримується постійною, тому зміна ЕРС у часі визначається тільки розподілом магнітної індукції уздовж окружності ротора. Цей розподіл має синусоїдальний характер, тому й у фазних обмотках статора наводяться синусоїдальні ЕРС, зсунуті по фазі одна щодо одної на одну третину періоду (120 ел. град). Якщо на роторі p пар полюсів, то за

один його оберт p раз змінюється ЕРС і частота цієї зміни $f = pn_2/60$. Для одержання частоти 50 Гц двополюсний синхронний генератор повинен робити 3 000 об/хв., як і асинхронний.

При підключенні обмотки статора до трифазного навантаження струм, що по ній протікає, створює обертове магнітне поле з частотою обертання n_1, яка дорівнює частоті обертання ротора n_2. Сумарне магнітне поле обертається з тією ж частотою, з якою обертається ротор. Тому машина називається синхронною.

Магнітне поле струмів статора, нерухоме щодо обертового ротора, взаємодіє з постійним струмом ротора і створює електромагнітний гальмовий момент M, що повинен бути урівноважений обертаючим моментом первинного двигуна. Чим більше активна складового струму статора I_a, тим більша потужність перетворена в машині, тобто електромагнітна потужність $P_{ем}$ генератора:

$$P_{ем} = 3EI_a = M\omega, \qquad (11.4)$$

де $\omega = 2\pi n_1/60$,

E – ЕРС фази обмотки статора.

Ротор синхронної машини може бути явнополюсним і неявнополюсним. Явнополюсний ротор (рис. 8, а) використовують у машинах з чотирма і більше числом полюсів. Осердя 1 роблять або масивним із сталевих поковок, або набирають з листів електротехнічної сталі. Їх кріплять до втулки валу або (при великому числі полюсів) до ободу хрестовини. Обмотки збудження 2 виконують у вигляді циліндричних котушок з смугової міді, які закріплюють на осердя полюсів.

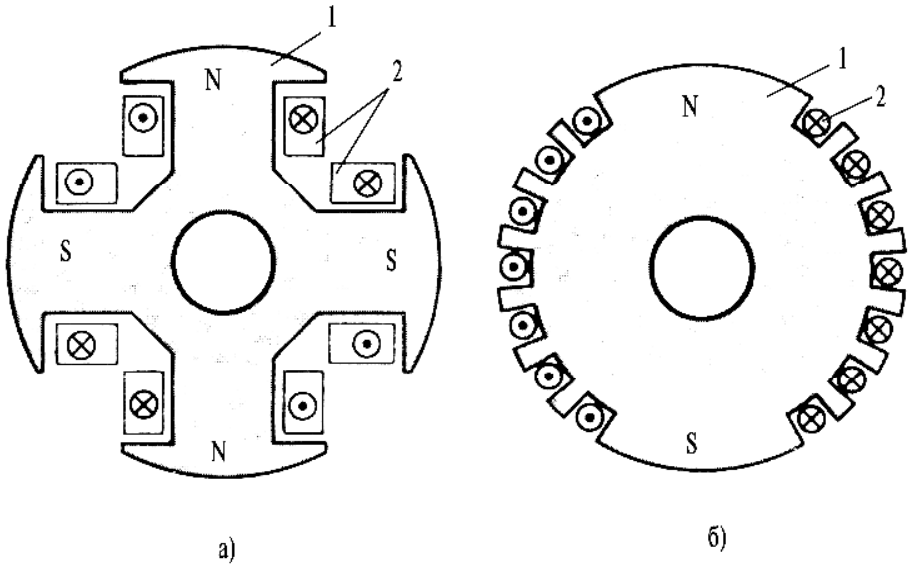

Рисунок 8 – Явнополюсний (а) і неявнополюсний ротори синхронної машини: 1 –осердя, 2 – обмотка збудження

Машини, які працюють з частотою обертання ротора 1 500 і 3 000 об/хв, виготовляють з неявнополюсним ротором (рис. 8, б), інакше неможливо забезпечити механічну міцність кріплення полюсів 1 і обмотки збудження 2. Обмотку збудження розміщують у пазах осердя ротора, виконаного з масивної сталевої поковки.

Синхронні генератори підрозділяються на турбо-, гідро- і дизель-генератори.

Турбогенератори приводяться в обертання швидкохідними паровими або газовими турбінами і виконуються неявнополюсними. Вал у них розташований горизонтально. Діаметр ротора за умовами механічної міцності обмежений розмірами 1–1,5 м. Гранична довжина ротора 7,5–8,5 м; вона обмежена припустимим прогином валу. При заданих обмеженнях за рахунок збільшення електромагнітних навантажень і підвищення інтенсивності охолодження (застосування водневого і водяного охолодження) створені турбогенератори потужністю 800–1 200 МВт.

Гідрогенератори приводяться в обертання гідравлічними турбінами, частота обертання яких складає 50–500 об/хв. Генератори виконують з великим числом полюсів і явнополюсними роторами. У гідрогенераторах потужністю більш 500 МВт діаметр ротора перевищує 15 м при висоті близько 2 м. У потужних гідрогенераторах вал розташовують вертикально. Турбіна знаходиться під генератором і фланцем з’єднується з його валом.

Дизель-генератори приводяться в обертання двигунами внутрішнього згоряння. Їх ротори явнополюсні з горизонтальним розташуванням валу. Поту-

жність таких генераторів буває від декількох кіловольтамперів до декількох мегавольтівамперів при частотах обертання від 100 до 1 500 об/хв.

Збудження. Обмотка збудження генератора через кільця і щітки одержує живлення або від генератора постійного струму (збуджувача), зв'язаного з ротором синхронного генератора, або від випрямлячів, що підключаються до мережі. Для потужних синхронних генераторів застосовують так звану безщіткову систему збудження. У цій системі як збуджувач використовують спеціальний синхронний генератор, в якого обмотка статора розташована на роторі машини, а випрямляч укріплений безпосередньо на валу. При цьому в колі обмотки генератора відсутні ковзні контакти, що підвищує надійність системи.

Синхронізація. Синхронні генератори електростанцій працюють, як правило, паралельно з мережею. На час профілактичних оглядів, ремонту або просто на час зменшення навантаження синхронний генератор може бути відключений від мережі. Необхідною умовою вмикання генератора на паралельну роботу з мережею є його синхронізація, тобто досягнення збігу чергування фаз, частот, початкових фаз і значень напруги мережі й генератора. Момент збігу фаз контролюють синхроноскопами. Для вмикання генераторів на паралельну роботу використовують автоматичну синхронізацію, що дозволяє регулювати напруги і частоти так, як це необхідно.

Велике поширення одержав метод самосинхронізації, сутність якого полягає в тому, що генератор вмикають у мережу незбудженим при частоті обертання ротора, близькій до синхронної. Потім включають струм збудження і ротор генератора поступово втягується в синхронізм.

Паралельна робота з мережею. Енергетичний стан синхронного генератора характеризується кутом θ – кутом повороту осі ротора стосовно осі обертового магнітного поля. Чим більше навантаження, тим більший кут θ.

Для збільшення активної потужності, яку видає генератор у мережу, слід збільшити момент первинного двигуна (подати більше пари в парову турбіну або води в гідравлічну). Ротор у цьому випадку здобуває деяке прискорення, кут θ зростає, збільшується гальмівний момент і встановлюється новий стан рівноваги при новому більшому значенні кута.

При збільшенні збудження генератора зростають ЕРС і струм, який видає генератор у мережу. Але це збільшення відбувається за рахунок реактивної складової струму, тобто росте реактивна потужність.

Будова і принцип дії синхронного двигуна. Принципова схема побудови трифазного синхронного двигуна така ж, як і генератора (рис. 5). Його трифаз-

ну статорну обмотку підключають до мережі трифазного змінного струму; в обмотку збудження подають постійний струм.

Частота обертання ротора синхронного двигуна дорівнює частоті обертання магнітного поля, тобто не залежить від навантаження. Інакше кажучи, двигун має абсолютно жорстку механічну характеристику.

При збільшенні навантаження двигуна зростає кут θ між осями ротора і поля (у режимі двигуна ротор слідує за полем). По досягненні максимального (перекидаючого) моменту ротор «випадає із синхронізму» і зупиняється.

Пуск синхронного двигуна. Для розгону синхронного двигуна застосовують асинхронний пуск. Для цього на роторі виконують спеціальну короткозамкнуту пускову обмотку: мідні або латунні стержні, закладені в полюсні наконечники і замкнуті накоротко торцевими кільцями. Після розгону ротора до частоти обертання, близької до синхронної, в обмотку збудження подається постійний струм і ротор втягується в синхронізм.

Регулювання реактивної потужності. Достоїнством синхронних двигунів крім абсолютно жорсткої механічної характеристики є їхня здатність працювати з cos φ рівним 1 і навіть з випереджальним струмом, тобто генерувати реактивну потужність. Для цього збільшують збудження двигунів.

Застосування синхронних двигунів дозволяє підвищити cos φ у системі і тим самим знизити втрати при передачі електроенергії.

Для підвищення cos φ у системі використовують також синхронні компенсатори – перезбудженні синхронні двигуни полегшеної конструкції, які працюють вхолосту.

Втрати і ККД синхронних машин. У синхронних машинах мають місце електричні втрати в роторі й статорі, магнітні втрати в осерді статора, механічні втрати на вентиляцію і тертя обертових частин. У двигунах великої потужності ККД досягає 0,95–0,98; ККД потужних генераторів дуже великий і дорівнює 0,99 при потужності близько 1 000 МВт.

Синхронні мікродвигуни. Жорсткість механічної характеристики є головною причиною великого поширення синхронних мікродвигунів в установках автоматики, телемеханіки, звукозапису, телебачення і таке інше. Конструкції цих двигунів різноманітні.

За принципом дії синхронний двигун з постійними магнітами не відрізняється від синхронного двигуна зі збудженням постійним струмом.

Синхронний реактивний двигун. Принципові відмінності має синхронний реактивний двигун. Його статор виконаний з трифазною обмоткою (або обмоткою конденсаторного двигуна). На явнополюсному роторі немає обмотки збу-

дження. При вмиканні двигуна обертове поле захоплює ротор з короткозамкнутою пусковою обмоткою і коли ротор досягне частоти обертання, близької до синхронної, виникає реактивний момент, що втягує ротор у синхронізм. Магнітні силові лінії прагнуть замкнутися шляхами з найменшим магнітним опором і на явнополюсний ротор діє синхронізуючий момент.

Ротор реактивного двигуна може бути і циліндричний: в алюмінієвий циліндр ротора закладають смуги м'якої сталі, що створюють необхідну різницю в магнітному опорі.

Обертаючий момент гістерезисного двигуна створюється за рахунок явища гістерезису при перемагнічуванні феромагнітного матеріалу ротора. У такому двигуні вісь намагнічування ротора відстає від осі обертового поля на кут θ, чим і створюються тангенціальні складові сили взаємодії ротора і поля. Ці двигуни мають порівняно великий пусковий момент, просту конструкцію, надійні й безшумні.

Редукторні двигуни застосовують у колах підвищеної частоти (до 30 кГц), що дає змогу одержувати частоти обертання від 60 до 5 000 об/хв. Ротори таких двигунів виконані без обмотки: наявна велика кількість зубців z, що у принципі можна розглядати як полюси.

Синхронна частота обертання ротора $n_2 = 60f_1/z$, тоді як магнітне поле обертається з частотою $n_1 = 60f/z$. Відношення

$$n_1/n_2 = z/p = k_{\text{ред}} \qquad (11.5)$$

називається коефіцієнтом редукції.

Крокові двигуни – це синхронні мікродвигуни, обмотки статора яких живиться імпульсною напругою, що подається від якого-небудь (наприклад, електронного) комутатора.

Під дією кожного такого імпульсу ротор двигуна робить певне кутове переміщення – крок.

Крокові двигуни застосовують у стрічкопротяжних пристроях для введення і виведення інформації, лічильниках, приводах верстатів із програмним керуванням.

Запитання для перевірки

1. Наведіть основні переваги і недоліки асинхронних електричних двигунів.

2. Поясніть схему будови асинхронного двигуна.

3. Наведіть принципові схеми запуску асинхронного двигуна.

4. Якими засобами регулюють частоту обертання асинхронних двигунів.

5. Які двигуни називають синхронними?

6. Поясніть принцип дії синхронного генератора.

7. Наведіть конструктивні відмінності явнополюсних і неявнополюсних роторів синхронної машини.

8. Поясніть відмінності турбо-, гідро- і дизель-генераторів.

9. Поясніть способи запускання синхронних двигунів.

10. Чи можливе регулювання реактивної потужності в синхронних двигунах?

11. Наведіть величину ККД синхронних електричних машин.

МАШИНИ ПОСТІЙНОГО СТРУМУ

12.1 Будова та принцип дії машин постійного струму

Машини постійного струму використовують і як двигуни і як генератори. Двигун і генератор постійного струму принципово влаштовані однаково.

Генератори застосовуються для живлення електродвигунів у спеціальних системах електроприводів, установок електролізу, для зарядки акумуляторів, для зварювальних робіт на постійному струмі, а двигуни – для приводу механізмів, що вимагають великих пускових моментів, широкого і плавного регулювання частоти обертання (транспорт, піднімальні пристрої, верстати). Використання їх у приводах дозволяє істотно спростити систему регулювання швидкості. Визначальною для використання двигуна є його механічна характеристика. Промисловістю випускаються двигуни постійного струму звичайної конструкції в діапазоні потужностей 0,3 – 200 кВт.

Будова. Розглянемо будову (рис. 1) машини постійного струму з однією парою полюсів (p = 1). Число полюсів може бути і більшим, але це завжди парне число, тобто 2p.

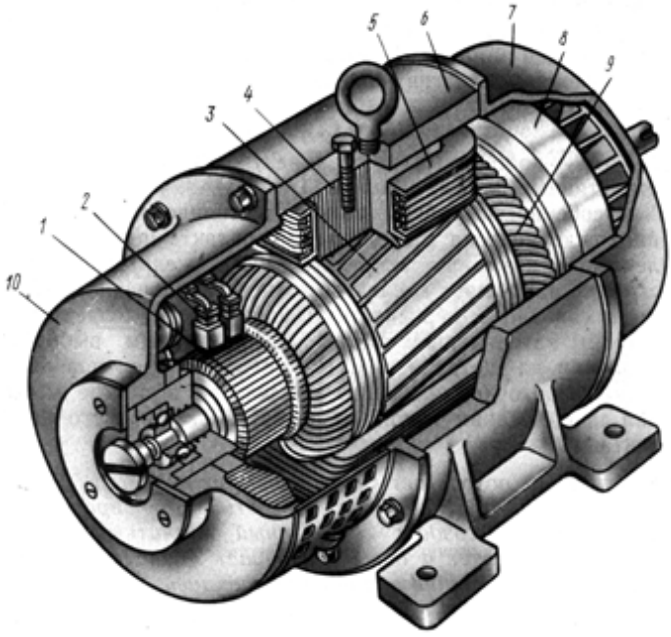

Рисунок 1 – Будова двигуна постійного струму

На внутрішній циліндричній поверхні сталевого корпусу – станини 6 статора укріплені полюси 4 з обмотками збудження 5.

Ці обмотки живляться постійним струмом і створюють магнітний потік, що замикається через станину, осердя полюсів, повітряні зазори і сталь якоря 3. З торців корпус закритий підшипниковими щитами 7 і 10.

На роторі розташований якір *3* з колектором *1* і вентилятор *8* для охолодження машини. Якір являє собою циліндричне осердя, у пазах якого покладені й закріплені мідні провідники. Ці провідники, з'єднані у певному порядку, утворюють замкнуту обмотку *9* якоря.

Осердя якоря і полюсів набирають з листів електротехнічної сталі для зменшення втрат на вихрові струми і перемагнічування.

Колектор має форму циліндра і складається з мідних пластин, ізольованих між собою і від валу. До кожної з пластин приєднані виводи провідників обмотки якоря. Обмотка якоря із зовнішнім колом зв'язана через щітки 2 (вугільні, графітні та ін.), що пружинами щільно притиснуті до колектору. Щіткотримачі кріпляться на підшипниковому щиті машини 10.

Принцип дії. У провідниках обмотки якоря при їхньому переміщенні в магнітному полі наводяться ЕРС, що складають сумарну ЕРС машини. ЕРС окремих провідників обмотки якоря, прямо пропорційні індукції магнітного поля і швидкості їхнього переміщення в цьому полі. Внаслідок цього і сумарна ЕРС Е машини прямо пропорційна частоті обертання ротора n і магнітному потоку Ф:

$$E = C_E n \Phi, \qquad (12.1)$$

де C_E – постійний коефіцієнт, який залежить від конструктивних даних машини.

У провідниках обмотки якоря протікають струми. При цьому щітковоколекторний вузол виконує роль механічного випрямляча, забезпечуючи необхідний напрямок струму в провідниках обмотки якоря. На кожний провідник зі струмом, що перетинає магнітне поле, діє сила тим більша, чим більший струм і чим сильніше магнітне поле. Сили, що діють на всі провідники обмотки якоря, створюють сумарний електромагнітний обертовий момент М, що прямо пропорційний струмові якоря $I_я$ і магнітному потокові Ф:

$$M = C_м \Phi I_я, \qquad (12.2)$$

де $C_м$ – постійний коефіцієнт, що залежить від конструктивних даних машини.

12.2 Особливості роботи машин постійного струму

При проходженні струму в ковзному контакті щіток з колектором можливе іскріння. Воно небажане, оскільки руйнує колектор і щітки. Іскріння може

бути пов’язане з нерівною поверхнею колектору, поганим закріпленням щіток, неправильним вибором тиску на щітку, тощо. Тому потрібна періодична проточка, шліфування колектору й інші заходи для підтримання надійного ковзного контакту.

Іскріння зростає (комутація погіршується) зі збільшенням струму якоря і частоти його обертання.

Струм якоря створює власний магнітний потік, що спотворює і навіть зменшує магнітний потік машини. Це явище називається реакцією якоря. Через реакцію якоря знижується ЕРС машини і погіршуються умови роботи колектору – посилюється іскріння під щітками.

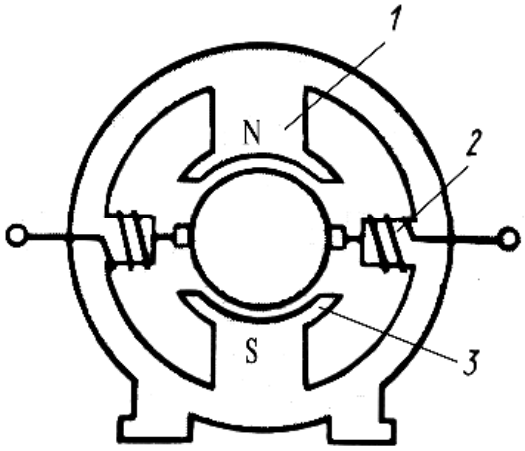

Рисунок 2 – Схема вмикання додаткових полюсів

Для поліпшення комутації між основними полюсами 1 установлюють додаткові полюси 2 (рис. 2), струми обмоток яких створюють у зоні комутації магнітний потік, протилежний магнітному потокові якоря.

Для повної компенсації реакції якоря в машинах може бути спеціальна компенсаційна обмотка, яка вкладається в пазах основних полюсних наконечників 3. Потік, створюваний цією обмоткою, спрямований протилежно потоку обмотки якоря.

Обмотки додаткових полюсів і компенсаційні обмотки включають послідовно з обмоткою якоря, для того, щоб із збільшенням струму якоря збільшувалася і їхня компенсаційна дія.

У машинах постійного струму для створення магнітного потоку використовують електромагнітне збудження. Збудження від постійних магнітів зустрічається тільки в мікромашинах. Залежно від способу вмикання обмоток збудження ОЗ (рис. 3) стосовно обмоток якоря машини постійного струму поділяють на машини незалежного (рис. 3, а), паралельного (рис. 3, б), послідовного (рис. 3, в), змішаного (рис. 3, г) збудження.

12.3 Генератори

У генераторному режимі роботи ротор машини приводиться в обертання первинним двигуном (звичайно асинхронним, або двигуном внутрішнього згорання), а коло обмотки якоря замкнуте на навантаження. ЕРС машини Е викликає струм у навантаженні. Напруга на затисках генератора менша цієї ЕРС через спадання напруги в колі обмотки якоря і в обмотках, включених послідовно з нею, а також через реакцію якоря.

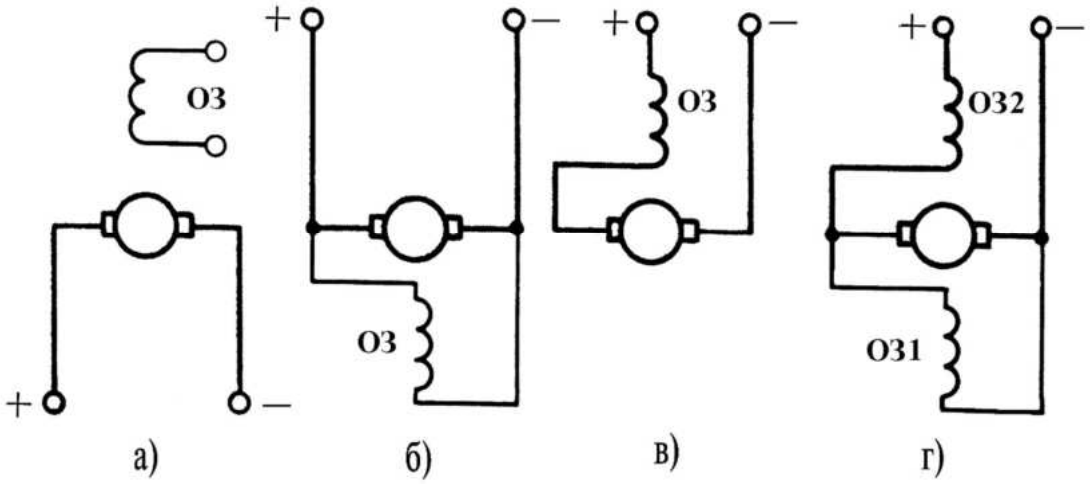

Рисунок 3 – Схеми збудження машин постійного струму
а) незалежного, б) паралельного, в) послідовного, г) змішаного

Електромагнітний момент у генераторному режимі спрямований у бік, протилежний обертанню ротора, тобто є гальмовим.

Чим більше навантаження генератора (чим більший струм $I_я$), тим більший гальмовий момент M доводиться переборювати первинному двигуну генератора. Повна перетворена генератором електромагнітна потужність:

$$P_{ем} = EI_я = M\omega \approx Mn/9{,}55, \qquad (12.3)$$

де $\omega = \pi n/360$ – кутова швидкість обертання ротора.

Великий практичний інтерес має зовнішня характеристика генератора, що показує, як змінюється вихідна напруга генератора U при збільшенні струму I через навантаження.

Причин для зміни напруги дві: спадання напруги всередині генератора і зміна ЕРС за рахунок реакції якоря і зміни струму збудження. На рис. 4 представлені зовнішні характеристики генераторів різного збудження.

Для генераторів незалежного і паралельного збудження (криві 1 і 2) напруга знижується при збільшенні навантаження, причому для генератора пара-

лельного збудження в більшій мірі, тому що при його навантаженні зменшується і струм збудження.

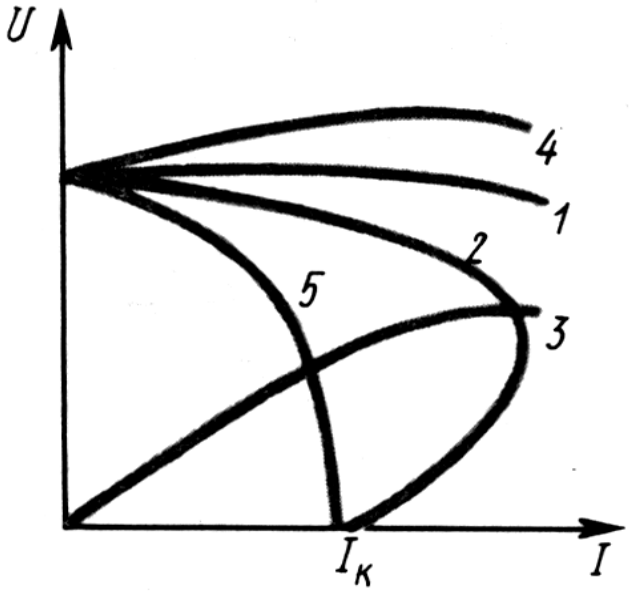

Рисунок 4 – Зовнішні характеристики генераторів різних типів збудження

При поступовому зменшенні опору навантаження до нуля струм $I_к$ короткого замикання генератора паралельного збудження невеликий, тому що напруга на обмотці збудження стає рівною нулю і ЕРС визначається тільки потоком залишкового намагнічування. При миттєвому короткому замиканні струм великий, тому що ЕРС машини в перший момент не встигає змінитися.

Генератори послідовного збудження застосовують мало. Для них характерне збільшення напруги при збільшенні навантаження, оскільки при цьому зростає струм збудження (крива 3).

Вид зовнішньої характеристики генератора змішаного збудження залежить від способу з'єднання обмоток.

При їхньому погодженому з'єднанні магнітні потоки, створювані обмотками, складаються, тому при збільшенні навантаження магнітний потік машини зростає і збільшується ЕРС (крива 4). Напруга з ростом навантаження може навіть трохи збільшитися.

При зустрічному з'єднанні обмоток зовнішня характеристика має різко падаючий характер (крива 5), тому що при збільшенні навантаження струм послідовної обмотки створює магнітний потік, протилежний потоку паралельної обмотки. Таку зовнішню характеристику має зварювальний генератор, для якого режим короткого замикання є експлуатаційним.

Напругу генераторів регулюють зміною струму в обмотці збудження.

Потужність, яка затрачується на збудження, відносно невелика (1–5 % від номінальної потужності машини), що дозволяє економічно регулювати напругу. Рівень напруги генераторів звичайно підтримується за допомогою автоматичних регуляторів.

12.4 Двигуни

У режимі двигуна коло якоря машини підключене до мережі постійного струму з напругою U. У ньому протікає струм $I_я$. При взаємодії його з потоком обмотки збудження виникає електромагнітний обертаючий момент M, що переборює момент опору з боку механізму, який приводиться в рух. ЕРС E двигуна спрямована протилежно прикладеній напрузі U:

$$E = U - I_я R_я;\ E < U. \tag{12.3}$$

Машина споживає енергію з мережі. Чим більший момент двигуна, тим більший струм він споживає.

Повна перетворена в двигуні електромагнітна потужність

$$P_{ем} = EI_я = M\omega, \tag{12.4}$$

де ω – кутова швидкість обертання якоря.

Пуск двигунів супроводжується великим струмом, що протікає через обмотку якоря. Тому без пускових реостатів (додаткових опорів $R_{дод}$ у колі якоря) щоб уникнути аварії пускають тільки двигуни потужністю до 1 кВт. Великий пусковий струм виникає тому, що опір в колі якоря $R_я$ невеликий, подавана напруга U номінальна, а ЕРС E, що у робочому режимі врівноважує значну частину прикладеної напруги, у момент пуску дорівнює нулю. Струм у колі якоря:

$$I_я = (U - E)/(R_я + R_{дод}). \tag{12.5}$$

Із збільшенням частоти обертання якоря зростає ЕРС E, а струм $I_я$ знижується.

Опір $R_{дод}$ звичайно відповідає декільком ступеням пускового реостата, що у перший момент вводять повністю і в міру запуску послідовно одну за одною відключають з таким розрахунком, щоб струм двигуна при пуску не перевищував припустимого значення.

Серед всіх електродвигунів двигуни постійного струму мають найкращі пускові властивості. При відносно невеликому пусковому струмі $(2 \div 2{,}5)\, I_н$ вони можуть створювати досить великий пусковий момент $(2{,}5 \div 4)\, M_н$.

Реверс (зміна напрямку обертання) двигуна можна здійснити, змінивши напрямок обертового моменту М. Тому що $M = C_м Ф I_я$, то знак моменту зміниться, якщо змінити або напрямок струму в обмотці якоря, або напрямок магнітного потоку. Звичайно для реверса змінюють полярність напруги на обмотці якоря, тобто напрямок струму в обмотці якоря.

З характеристик двигуна найбільше практичне значення має механічна характеристика, що показує, як змінюється частота обертання ротора при зміні моменту М на валу.

Механічна характеристика, отримана при номінальних значеннях напруги живлення і відсутності додаткового опору в колі якоря, називається природною.

На рисунку 5 представлені механічні характеристики двигунів з різним збудженням, причому крива 1 на всіх рисунках – природна характеристика, а крива 2 – штучна, отримана при включенні додаткового опору в коло якоря двигуна.

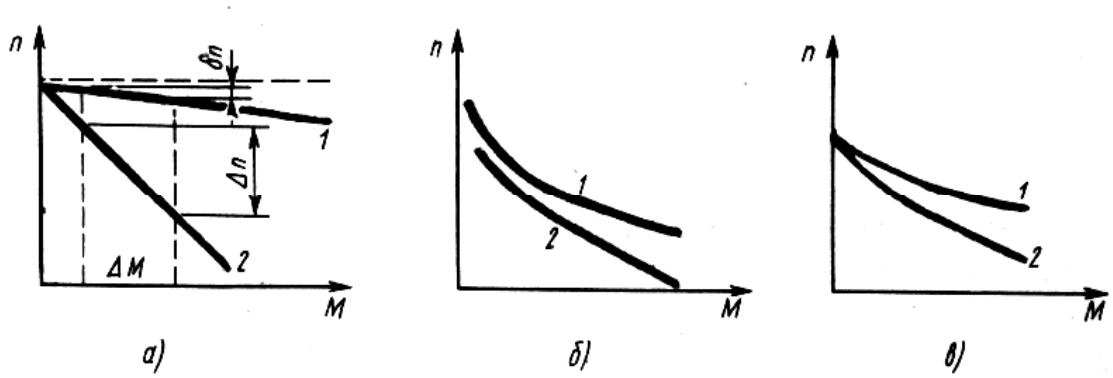

Рисунок 5 – Механічні характеристики двигунів постійного струму з різним збудженням: 1 – природна, 2 – штучна

Для двигунів незалежного і паралельного збудження механічна характеристика лінійна (рис. 5, а). Ідеальному неробочому ходу (М = 0) відповідає частота обертання n_0. При збільшенні моменту частота обертання зменшується. Якщо це зниження швидкості незначне (δn), те характеристика називається жорсткою (крива 1). Чим більший опір у колі якоря, тим «м'якша» характеристика (крива 2), тим більша зміна частоти обертання (Δn).

Двигун послідовного збудження має м'яку механічну характеристику (рис. 5, б), тому що при збільшенні моменту М і зростанні струму якоря зростає магнітний потік Ф, і частота обертання двигуна знижується.

Характерною рисою двигуна послідовного збудження є різке збільшення частоти обертання при зниженні навантаження.

При малих навантаженнях частота може досягти неприпустимо великих значень. Щоб цього не трапилося, на валу двигуна повинне бути навантаження не менше 25 % від номінального.

Механічна характеристика двигуна змішаного збудження (рис. 5, в) займає середнє положення між характеристиками двигунів паралельного і послідовного збудження. Характеристика м'яка, але через наявність паралельної обмотки частота обертання на холостому ходу обмежена. Частоту обертання двигуна n можна регулювати трьома способами; зміною напруги, яку подають на обмотку якоря, зміною магнітного потоку і включенням додаткового опору в коло якоря.

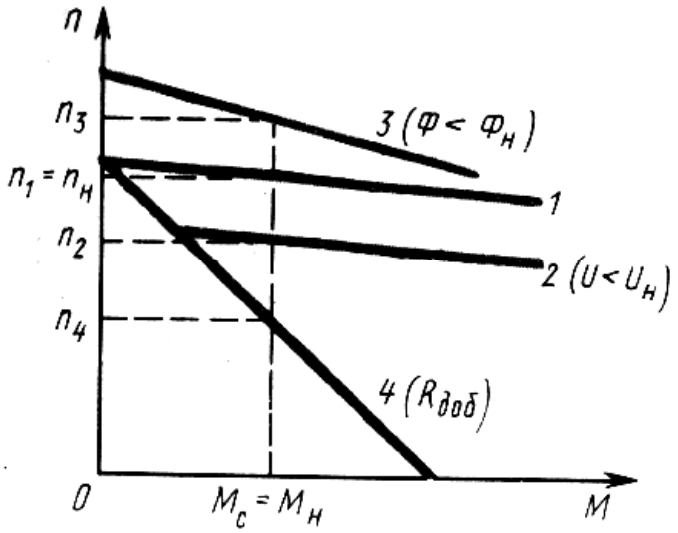

Рисунок 6 – Регулювання частоти обертів двигуна незалежного збудження

На рисунку 6 для двигуна незалежного збудження дана природна механічна характеристика (1) і штучні (2, 3, 4), що відповідають вказаним трьом способам регулювання частоти обертання n. Положення робочої точки на всіх характеристиках взяте при моменті опору $M_с = M_н$. При зниженні напруги U на якорі (крива 2) n зменшується, а жорсткість характеристики зберігається. При зменшенні магнітного потоку Ф зростає n, при введенні в коло якоря додаткового опору $R_{дод}$ знижується n, і в обох випадках характеристика буде «м'якшою». Метод регулювання n введенням $R_{дод}$ неекономічний, що обмежує його застосування. Два інших способи застосовують частіше.

Регулювання частоти обертів двигунів послідовного збудження можливе: вмиканням $R_{дод}$ (рис. 7, а), перемиканням однотипних двигунів з паралель-

ного з’єднання на послідовне (рис. 7, б), шунтуванням обмотки якоря й обмотки збудження (рис. 7, в), секціонуванням обмотки збудження (рис. 7, г).

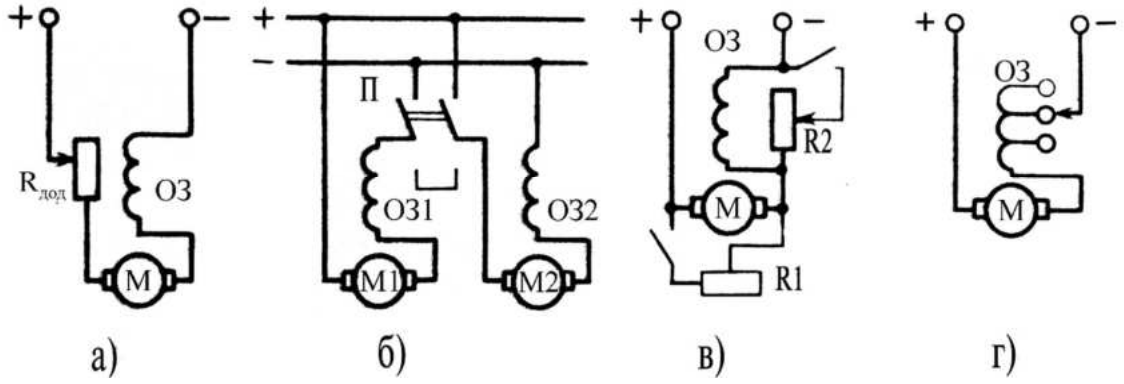

Рисунок 7 – Схеми регулювання частоти обертів двигунів послідовного збудження

Втрати потужності в машинах постійного струму складаються з: втрат у сталі (на гістерезис і вихрові струми в магнітному колі машини), електричних втрат (в обмотках якоря і збудження, щітковому контакті) і механічних втрат (тертя щіток об колектор, у підшипниках, обертових частин об повітря). Приблизно 50 % усіх втрат у номінальному режимі складають *електричні втрати в якорі*. ККД двигунів звичайно дорівнює 75–97 %. Більші значення ККД мають потужні електричні машини.

12.5 Мікродвигуни постійного струму

Мікродвигуни постійного струму застосовують як виконавчі для обертання механізмів. Мікродвигуни з якорем звичайного типу можуть мати електромагнітне збудження і збудження від постійного магніту.

Мікродвигуни з пустотілим якорем виконують з якорем у вигляді порожнього циліндра, розташованого між полюсами і нерухомим феромагнітним сердечником. Такі двигуни малоінерційні.

У мікродвигунах з друкованою обмоткою якоря, обмотка нанесена електрохімічним способом на тонкий диск (або поверхню порожнього циліндричного якоря) з немагнітного матеріалу. Вони малоінерційні, безшумні в роботі, технологічні за конструкцією. Потужності мікродвигунів складають від часток вата до декількох кіловатів.

Тахогенератори постійного струму виконують з постійними магнітами на статорі або з електромагнітним збудженням від незалежного джерела постійного струму.

Електромашинні підсилювачі являють собою спеціальні електричні генератори, вихідна потужність яких може змінюватися в широких межах шляхом зміни потужності керування. Відношення вихідної потужності до потужності керування, тобто коефіцієнт підсилення за потужністю, може досягати декількох тисяч або навіть десятків тисяч. Промисловістю випускаються такі підсилювачі на потужності від декількох сотень ват до десятків кіловат.

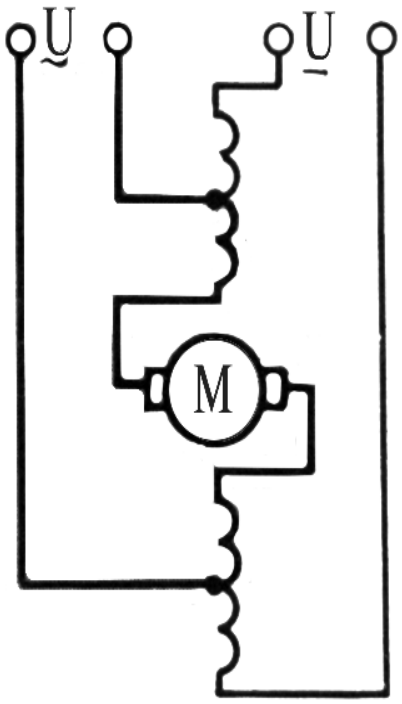

Рисунок 8 – Схема універсального колекторного двигуна

Універсальні колекторні машини. Принципово будь-який двигун постійного струму може працювати від мережі змінного струму, тому що обертовий момент не змінює напрямку при одночасній зміні напрямку струму в якорі і в полюсах. Однак у двигуні паралельного збудження струм у якорі і магнітний потік зміщуються за фазою майже на чверть періоду через велику індуктивність обмотки збудження. Обертовий момент виявляється занадто малим.

У двигуні ж послідовного збудження струм у якорі є одночасно і струмом збудження, тому універсальний колекторний двигун принципово побудований так само, як двигун послідовного збудження (рис. 8).

Універсальні колекторні двигуни малої потужності широко застосовують для приводу побутових приладів і автоматичних пристроїв у тих випадках, коли потрібна частота обертання більша 3000 об/хв при живленні від мережі 50 Гц, плавне регулювання частоти обертання в широких межах або великий пусковий момент. Так, для пилососів потрібні швидкості обертання 12 000–16 000 об/хв.

Запитання для перевірки

1. Поясніть переваги застосування машин постійного струму?
2. Які потужності машини постійного струму?
3. Поясніть принцип дії машини постійного струму.
4. Дайте характеристику генераторів постійного струму.
5. Якими засобами регулюється частота обертів двигунів постійного струму?
6. Сфера застосування мікродвигунів постійного струму.
7. Поясніть принципи роботи тахогенераторів постійного струму.
8. Що таке електромашинні підсилювачі?
9. Охарактеризуйте сферу застосування універсальних колекторних машин.

ВИСОКОВОЛЬТНІ ТА НИЗЬКОВОЛЬТНІ ЕЛЕКТРИЧНІ АПАРАТИ

13.1. Електричні апарати

Електричні апарати – це електротехнічні пристрої, призначені для керування електричними і неелектричними об'єктами, а також для захисту цих об'єктів при ненормальних режимах роботи, вимірювання електричних та неелектричних величин, регулювання режимів роботи обладнання. Електричні апарати відіграють важливу роль на всіх етапах виробництва, передачі, розподілу і споживання електроенергії. Класифікують електричні апарати за різними ознаками (родом струму – змінний чи постійний; виконанням – для зовнішньої чи внутрішньої установки; за призначенням – комутаційні чи вимірювальні і таке інше). В першу чергу електричні апарати класифікують за напругою – високовольтні (для електроустановок понад 1 000 В) та низьковольтні – (до 1 000 В).

13.2 Високовольтні апарати

До високовольтних електричних апаратів належать:
– високовольтні вимикачі;
– роз'єднувачі;
– вимикачі навантаження;
– короткозамикачі;
– віддільники;
– високовольтні запобіжники;
– вимірювальні трансформатори струму та напруги;
– дугогасні та струмообмежувальні реактори;
– розрядники та обмежувачі перенапруги;
– конденсатори.

Високовольтні вимикачі – це пристрої, призначені для вмикання і вимикання електричних кіл напругою понад 1 000 В під навантаженням і для автоматичного вимикання при небезпечних перевантаженнях і коротких замиканнях. Швидке вимикання кіл при короткому замиканні є найбільш відповідальною операцією, яку виконують вимикачі, тому що це запобігає пошкодженню устаткування і порушенню нормальної роботи енергосистеми. Струми короткого замикання в колах високої напруги звичайно досягають десятків і сотень тисяч ампер.

При розмиканні контактів вимикачів виникає електрична дуга, яка збільшує час відключення струму і руйнує контакти. Тому у високовольтних вимикачах застосовують засоби гасіння дуги за можливо менший час. Існують різні способи гасіння дуги, засновані на її інтенсивній деіонізації та охолодженні, підвищенні електричної міцності середовища, в якому дуга виникає.

Спосіб гасіння дуги є основним чинником, що визначає конструкцію вимикачів.

Розрізняють масляні, повітряні, елегазові, автогазові, електромагнітні, вакуумні та інші вимикачі. Керують вимикачами за допомогою спеціального приводу і, як правило, дистанційно. В установках невеликої потужності застосування високовольтних потужних вимикачів недоцільне через їхню велику вартість і розміри. Тому досить часто використовують *вимикачі навантаження*. Це – автогазові вимикачі, не розраховані на переривання струмів короткого замикання. Як правило, їх встановлюють разом з високовольтними плавкими запобіжниками, які захищають від протікання струмів короткого замикання.

Роз'єднувачі – це електричні апарати, призначені для комутації ділянок електричних кіл під напругою при відсутності в них струму навантаження або з незначними струмами. Їх застосовують для забезпечення видимого розриву кола, а також для перемикань при складанні необхідної схеми електричних з'єднань електричної установки. Роз'єднувачі можуть бути одно-, дво- і триполюсними. Незважаючи на їх розмаїтість принципово конструкції роз'єднувачів схожі – вони найчастіше мають нерухомий і рухомий контакт (ніж), укріплених на ізоляторах, опорної плити і рами, Інколи роз'єднувачі мають два рухомих ножі. Роз'єднувачі можуть мати ручний, електродвигуновий або пневматичний привід.

Для зниження струмів короткого замикання і створюваних ними електродинамічних сил у сучасних потужних електричних мережах застосовують *струмообмежувальні реактори*, які є котушкою індуктивності, розрахованою на протікання великих струмів. За рахунок індуктивного опору реактори обмежують величину струму. Для підтримання постійного індуктивного опору незалежно від величини струму реактори виконують без сталевого осердя, внаслідок чого вони мають досить великі розміри і масу.

Дугогасні реактори призначені для зменшення струмів замикання на землю. Вони конструктивно відрізняються від струмообмежувальних наявністю феромагнітного осердя та меншими розмірами.

Розрядники і обмежувачі перенапруги – це апарати для захисту електроустановок від перенапруг (наприклад, внаслідок грозової діяльності). Розрядник

знижує перенапруги до значень, безпечних для ізоляції мережі, яку захищають, а енергія перенапруги відводиться в землю через заземлюючий провідник.

Принцип дії різних конструкцій розрядників заснований на електричному пробої ізоляційного проміжку з наступним відновленням його електричної міцності (після зняття перенапруги).

Останнім часом замість розрядників застосовують нелінійні обмежувачі перенапруги (ОПН), які мають значно кращі захисні характеристики. До складу ОПН входять напівпровідникові елементи з різконелінійною залежністю їх опору від прикладеної напруги. В ОПН ізоляційний проміжок відсутній.

13.3 Низьковольтні апарати

До низьковольтних апаратів належать комутаційні апарати, апарати захисту, пускові й регулювальні резистори, реле різного призначення.

Рубильники – це найпростіші ручні комутаційні апарати.

Вони можуть бути одно, дво і триполюсними. Їхні основні елементи (рис. 1): контакти, дугогасильний пристрій, привод. Контактні ножі *4* рубильника можуть шарнірно повертатися в нижньому контакті *1* і при вмиканні затискуються в пружних губках *2* верхніх контактів. Рубильники можуть мати центральну або бічну рукоятку *3* або важільний привід. Для гасіння дуги використовують дугогасильні контакти *5* і спеціальні дугогасильні камери.

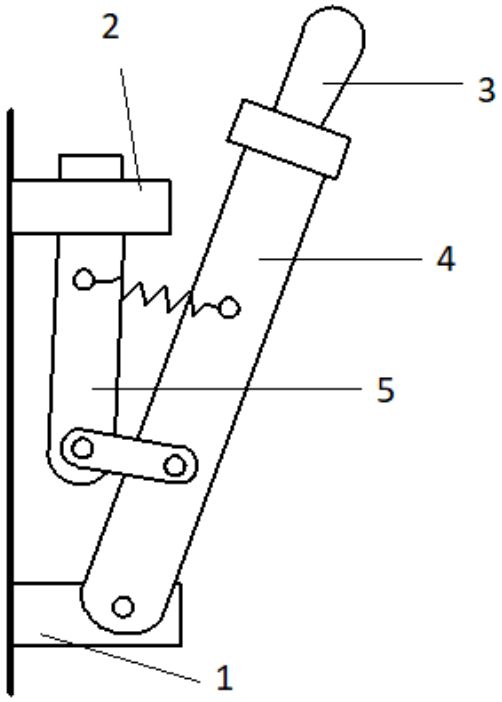

Рисунок 1 – Будова рубильника

Пакетні вимикачі – це пристрої, які використовують в мережах з напругою до 380 В і струмами до 100 А, призначені для перемикань, що виконуються одночасно в декількох електричних колах.

Вони складаються з декількох малогабаритних однополюсних вимикачів, розташованих на загальній осі один над одним і керованих за допомогою загальної рукоятки. В одній площині з рухомими контактами розміщують фіброві дугогасильні шайби, що обертаються разом з контактами. Приводний механізм при повороті рукоятки переводить рухомі контакти з одного фіксованого положення в інше, замикаючи їх з нерухомими контактами (або розмикаючи їх).

Запобіжники – це пристрої для захисту електричних мереж від коротких замикань і перевантажень. Елементом запобіжників, який розриває коло, є плавка вставка – дріт або металева пластинка, яка розплавляється при протіканні по ній струму, небезпечного для мережі, яку захищають.

На рисунку 2 показана будова розбірного трубчастого запобіжника. Він складається з фібрової трубки 2, ковпаків, що нагвинчуються 1, контактних ножів 4. Усередині трубки до ножів приєднана плавка вставка 3. При перегорянні вставки під впливом високої температури невелика частина фібри розкладається й у закритому корпусі розвивається тиск газів до 100 атмосфер. Дуга, яка виникла швидко гасне.

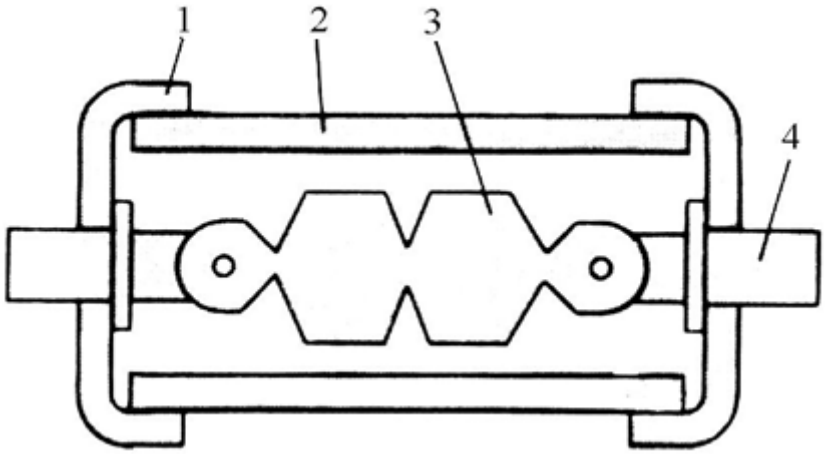

Рисунок 2 – Будова розбірного трубчастого запобіжника

У запобіжниках іншого типу плавка вставка вміщена в корпус, заповнений кварцовим піском, що також сприяє швидкому гасінню дуги.

Один і той самий запобіжник можна використовувати з плавкими вставками на різні номінальні струми.

Номінальний струм запобіжника – це найбільший з номінальних струмів плавких уставок, призначених для даної конструкції запобіжника. Після відключення кола заміняють перегорілу вставку або весь запобіжник.

Простота влаштування і обслуговування, малі розміри, висока здатність вимикання, невелика вартість забезпечили запобіжникам широке застосування. Запобіжники низької напруги виготовляють на струми від міліамперів до тисяч амперів і на напруги до 660 В. Недоліком запобіжників є те, що вони в основному одноразової дії. Зовнішній вигляд низьковольтних запобіжників показаний на рисунку 3.

Рисунок 3 –Зовнішній вигляд низьковольтних запобіжників

Автоматичні повітряні вимикачі (автомати) – це апарати, які служать для автоматичного розмикання електричних кіл при порушенні нормального режиму їхньої роботи, а також для нечастих замикань і розмикань кіл у нормальних умовах.

Рисунок 4 – Зовнішній вигляд автоматичних вимикачів

До автоматичних вимикачів можна віднести також:

– пристрій захисного відключення (ПЗВ – апарат для захисту людей і інших живих істот від враження електричним струмом);

– диференційний автоматичний вимикач (автоматичний вимикач з'єднаний з ПЗВ з метою забезпечення комплексного захисту).

В автоматах є ефективна система гасіння дуги (дугогасильні котушки і решітки) та механізм вільного розчіплювання (система шарнірнопов'язаних важелів). Цей механізм приводиться в дію біметалічним тепловим (реагуючим на перевантаження) або електромагнітним (реагуючим на струм короткого замикання або зниження напруги) елементом і виконує швидке відключення кола. Вмикати і вимикати автомати можна як вручну, так і дистанційно.

На рисунку 3 показана схема влаштування автомату максимального струму. Коли струм I стає більшим заданого значення, електромагніт 6, притягаючи якір 5, переборює зусилля протидіючої пружини 4 і звільняє фіксатор 3. Під дією поворотної пружини 1 відбувається швидке розмикання контактів 2.

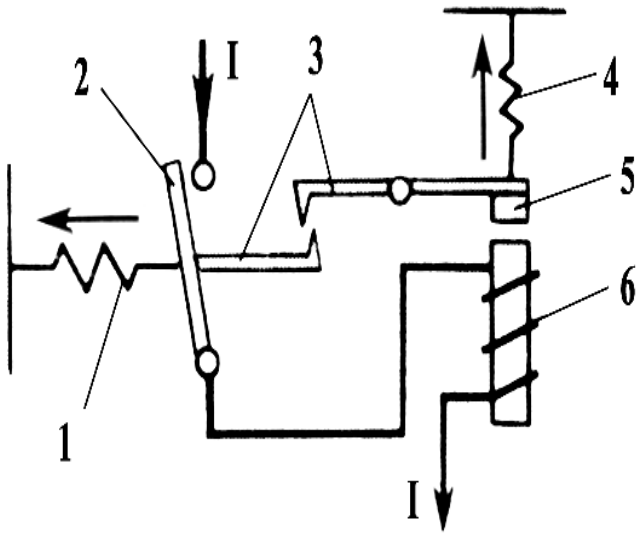

Рисунок 2 – Будова автомату максимального струму

Резистори – це пристрої, призначені для обмеження або регулювання струму і напруги.

Їх використовують як пускові, гальмові, регулюючі, розрядні опори в електричних колах низької напруги, електроприводів та інших електроприймачів. Резистори виготовляють з матеріалів з високим опором у широкому діапазоні їхніх номінальних значень (від одиниць ом до десятків кілоом) і припустимих струмів (від одиниць до сотень амперів).

Реостати – це апарати, що складаються з резисторів і пристроїв для регулювання опору і призначені для безрозривної зміни опору,

У металевих реостатах безрозривна зміна опору здійснюється за рахунок ковзання пружного контакту по резистору, намотаному на направляючий ізолюючий стержень (або на кільце в реостаті з круговим рухом рукоятки).

У реостатах зі ступінчастою зміною опору щітка плоского перемикача ступенів ковзає по нерухомих контактах, зв'язаних з набором резисторів.

У рідинних реостатах опір плавно регулюється зміною глибини занурення електродів в електроліт.

Контролери – це комутаційні апарати ручного керування з великим числом контактних елементів.

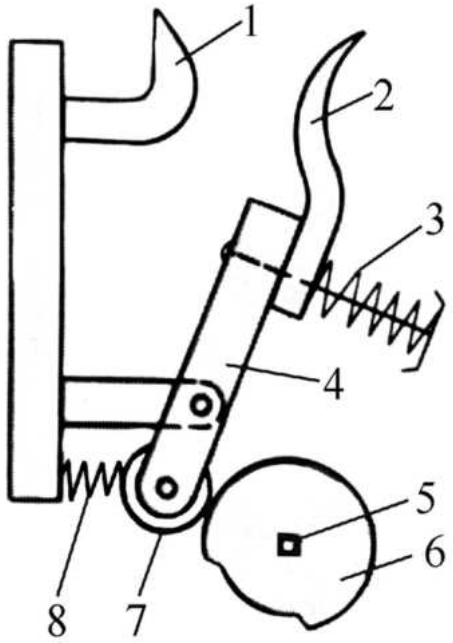

Рисунок 3 – Схема контактного елемента кулачкового контролера

Контролери служать для пуску, реверсу і регулювання частоти обертання двигунів. Різні схеми з'єднання одержують поворотом рукоятки контролера на певний кут. На рисунку 4 наведена схема контактного елемента найбільш розповсюдженої конструкції силового кулачкового контролера. Дія на контактний важіль 4 передається від приводного валу 5 через фігурний кулачок 6 і ролик 7. Пружина 3 забезпечує необхідне стискання контактів 1 і 2 при включенні, пружина 8 – поворотна.

Командоконтролери – апарати для дистанційного керування потужними електродвигунами. Їх використовують для включення і відключення котушок контакторів та інших апаратів. Влаштування командоконтролерів аналогічне

влаштуванню силових контролерів. У них може бути привод від двигуна, тоді їх називають програмними реле.

Універсальні перемикачі – це пристрої для переключення великого числа кіл керування. Вони бувають різних типів і серій відрізняються один від одного числом секцій, діаграмою замикання контактів, числом фіксованих положень і кутом повороту рукоятки.

Кнопки керування, часто поєднуються в кнопкові пости, а також шляхові і кінцеві вимикачі, – це командоапарати, що використовуються для переключень у колах керування.

Шляхові й кінцеві вимикачі широко застосовують у металорізальних верстатах і підйомнотранспортних пристроях. Усі подібні елементи повинні мати високу зносостійкість, оцінювану звичайно сотнями тисяч циклів.

Широкі можливості для підвищення зносостійкості й точності роботи командоапаратів дає застосування магнітокерованих контактів (рис. 5). Принцип дії такого контакту заснований на тому, що постійний магніт 1, зв'язаний з механізмом, приводить до спрацьовування магнітокерованого контакту 2 залежно від положення механізму. Полюсні башмаки 3 і 4 служать для підвищення точності спрацьовування апарата.

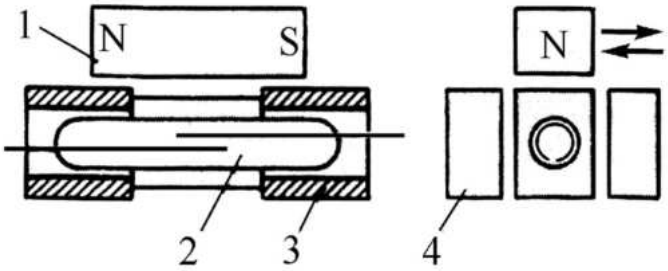

Рисунок 4 – Схема шляхового вимикача з застосуванням магнітокерованого контакту

Електромагнітні контактори – це електричні апарати, призначені для включення і відключення силових кіл за допомогою електромагнітів.

Електромагнітний контактор складається з втягувальної котушки, рухомого якоря, системи головних контактів, пристрою для гасіння дуги і часто забезпечується комплектом допоміжних блокувальних контактів. Головні контакти розраховані на включення і відключення великих струмів (до 1 000 А). Втягувальні котушки, робочий струм яких невеликий, включаються і відключаються дистанційно.

Будова контактора постійного струму показана на рисунку 6. З появою струму збудження в обмотці 9 головні контакти 3 замикаються під дією пружи-

ни 5 за рахунок притягання якоря 6 з важелем 4 до ярма 8. Розмикання контактів відбувається, під впливом пружини 7. У конструкції використовується дугогасильна камера 1 з решіткою з мідних пластин 2, що поліпшують відвід тепла від дуги. Позиція 10 відповідає вводам струму.

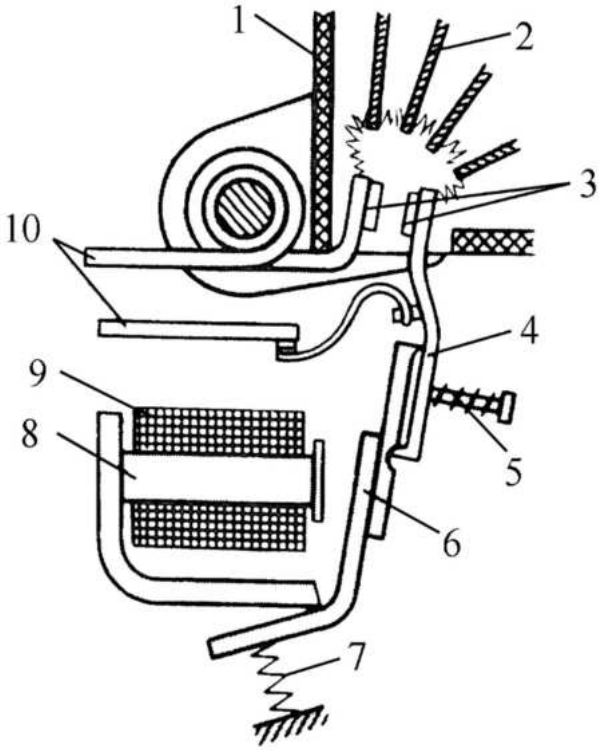

Рисунок 6 – Будова контактора постійного струму

Електромагнітні контактори змінного струму використовують у магнітних пускачах – комплектних пристроях, які складаються з триполюсного контактора, двох теплових реле, кнопок керування і призначені для дистанційного керування і захисту від перевантажень асинхронних двигунів. Основними величинами, що характеризують контактор, крім номінального струму і напруги є час спрацьовування і відпускання, а також напруга втягувальної котушки.

Реле – це пристрої, в яких при досягненні певного значення вхідної величини вихідна величина змінюється стрибком.

Вхідною величиною для реле можуть бути механічні, теплові, електричні та інші зовнішні впливи. Реле використовуються для захисту електричних кіл, а також для виконання логічних і вимірювальних функцій у системах керування.

Реле захисту електричних кіл спрацьовують при порушенні нормального режиму роботи або відключають ушкоджену ділянку, відновлюючи нормальний режим роботи. Велике поширення одержали електричні реле захисту (електромагнітні, магнітоелектричні, електродинамічні, індукційні), що реагують на

зміну струму в обмотці керування. У первинних реле обмотка включається безпосередньо в основне коло об'єкта, що захищається, у вторинних – у вторинні кола вимірювальних трансформаторів струму і напруги.

Рисунок 7 – Зовнішній вигляд електромагнітних реле

Розглянемо принципову схему захисту приймача електроенергії за допомогою реле максимального струму, подану на рисунку 8.

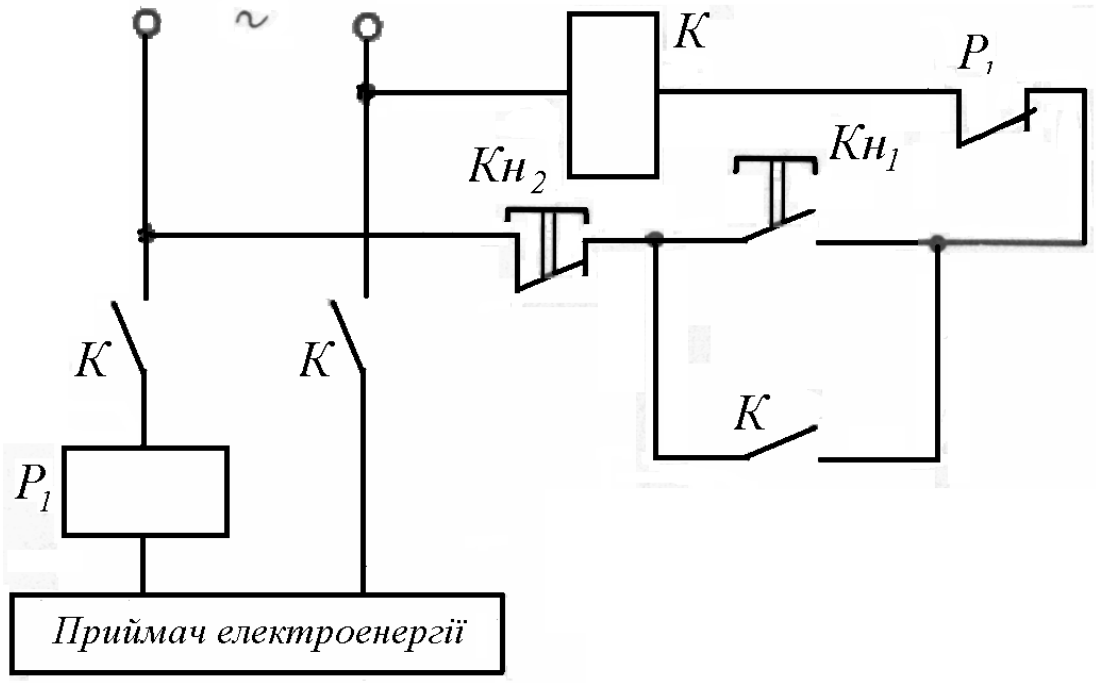

Рисунок 8 – Схема вмикання реле максимального струму

Вмикання живлення приймача виконується силовими контактами контактора К, котушка якого підключається до джерела при замиканні кнопки $Кн_1$. Блокувальний контакт К шунтує кнопку $Кн_1$, що дозволяє відпустити її після короткочасного натискання. Відключається приймач при натисканні на кнопку

$Кн_1$, яка розриває коло живлення котушки К. Реле максимального струму $Р_I$, котушка якого включена послідовно в контрольоване коло, спрацьовує, якщо струм у цьому колі перевищує припустимі значення. При цьому розмикається контакт $Р_I$ у колі котушки контактора К. Вона знеструмлюється, контакти контактора в силовому колі і колі керування розмикаються. Припиняється подача струму до приймача, для його вмикання треба знову натиснути кнопку $Кн_2$.

У найбільш розповсюдженій конструкції реле максимального струму між полюсами електромагніту розміщений якір з магнітом'якого матеріалу. При відсутності струму в обмотці реле пружина утримує якір у такому положенні, що керуючі контакти реле розімкнуті. Коли струм в обмотці перевищить припустимі значення, електромагнітна сила стане більшою від сили протидії пружини, якір повернеться, контакти замкнуться, видаючи сигнал у коло керування. Змінюючи повідцем, зв'язаним з пружиною, силу її протидії, можна змінювати настроювання реле на необхідний струм спрацьовування (уставку реле) відповідно до шкали покажчика.

Для захисту електроприймачів від перевантаження часто застосовують теплове реле (рис. 9), яке складається з біметалевої (з двох різнорідних металів) пластини 2, що знаходиться в тепловому полі нагрівача 1, ввімкненого послідовно з приймачем, і з контактів 4. Якщо контрольований струм I більший припустимого, то через якийсь час, нагрівшись, біметалева пластина зігнеться (убік металу з меншим коефіцієнтом лінійного розширення). Пластина 2 звільнить фіксатор 3, який під дією пружини 4 повернеться і розімкне контакти 5 у колі керування електроприймача.

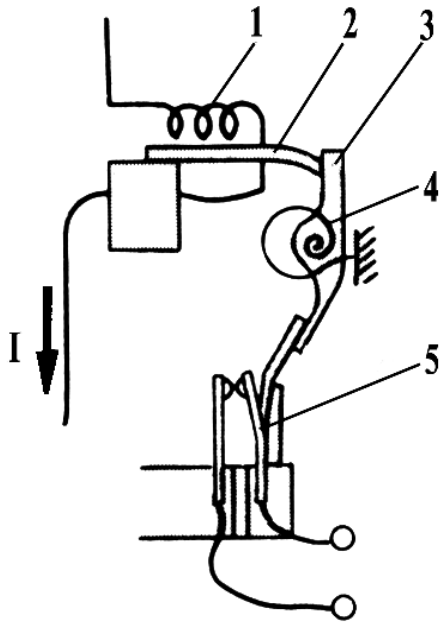

Рисунок 9 – Будова теплового реле

Для розмноження електричних сигналів, а також інколи для виконання логічних операцій у схемах релейно – контакторного керування використовують електромагнітні проміжні реле. Конструкції їх різноманітні. Найчастіше застосовують реле клапанного типу. Контактна система такого реле містить декілька пар контактів, які комутують різні кола. У магнітному колі реле є центральне осердя (ярмо), обмотка збудження, включена в коло сигналу керування I_y, і якір, що при русі до осердя за допомогою траверси замикає контактні групи.

У схемах керування і захисту часто потрібно, щоб спрацьовування апаратів відбувалося через певний проміжок часу після подачі керуючого впливу. Для цього використовують реле часу, в яких витримка часу створюється за допомогою годинникового механізму або електромагнітним шляхом. В електромагнітних реле часу внаслідок струмів, що наводяться в спеціальній короткозамкнутій обмотці, магнітний потік зростає і спадає повільніше, чим і створюється необхідна витримка часу на спрацьовування або відпускання.

Запитання для перевірки

1. Що таке електричні апарати?
2. Чому виділяють високовольтні електричні апарати?
3. Поясніть призначення високовольтних вимикачів.
4. Для чого призначені високовольтні роз’єднувачі?
5. Поясніть принцип роботи розрядників і обмежувачів перенапруги.
6. Які апарати називають низьковольтними?
7. Для чого служать низьковольтні рубильники?
8. Опишіть будову пакетних вимикачів.
9. Поясніть будову і принцип дії запобіжника.
10. Наведіть схему будови електромагнітного контактора.
11. Поясніть будову електромагнітного реле.

ЗАХИСТ ЕЛЕКТРИЧНИХ СИСТЕМ ТА МЕРЕЖ. РЕЗЕРВУВАННЯ В ЕЛЕКТРИЧНИХ МЕРЕЖАХ

14.1 Основи захисту електричних мереж

Захист електричних мереж – система заходів, що запобігають і обмежують розвиток аварії на лініях електропередавання та електричних підстанціях з метою забезпечення надійності постачання споживачів електричною енергією належної якості. Переважна кількість електроенергії розподіляється електричними мережами загального користування. Їх захист має важливе значення для нормального електропостачання промисловості, сільського господарства, залізничного транспорту та інших споживачів і безперервно удосконалюється. Тією чи іншою мірою захищаються всі електроустановки, в тому числі і автономні джерела електричної енергії з їх малими мережами.

Електричну мережу загального користування необхідно захищати від перевантаження, коротких замикань і перенапруг, небезпечних для мережі, від пошкодження ізоляційних і підтримуючих конструкцій та обривів проводів. Небезпечні явища виникають як внаслідок атмосферних впливів (наприклад, удару блискавки), так і в результаті зміни стану самої мережі, наприклад електричного пробою ізоляції або відключення ненавантаженій лінії передачі. Пошкодження ізоляції може бути викликане старінням матеріалу або зовнішніми причинами. Підтримуючі конструкції (опори, траверси, арматура ізоляторів і таке інше) ламаються під дією вітру, від ожеледі, піддаються корозії. Можливі випадки пошкодження проводів струмом і обриву їх, наприклад від вібрації. Причинами аварії можуть бути неправильна дія автоматичних пристроїв в мережі і помилки обслуговуючого персоналу. При величезних масштабах сучасних електричних мереж, що складаються з десятків тисяч км ліній електропередавання різних напруг, тисяч електричних підстанцій, практично неможливо уникнути небезпечних ситуацій. Якщо аварія все ж виникає, то її шкідливі наслідки захист повинен звести до мінімуму. Для цього необхідно якомога швидше відключити пошкоджений елемент (ділянка) мережі, не зачіпаючи при цьому сусідніх, а споживачів перевести на живлення від резервних джерел.

14.2 Захист електричних мереж від пошкоджень ізоляції

Ізоляція повітряної лінії електропередавання складається з навколишнього повітря і порцелянових або скляних ізоляторів, на яких кріпляться дроти.

Ізоляція підземних ліній, трансформаторів і різних апаратів зазвичай виконується з твердих і рідких діелектриків, які схильні до старіння. У цих пристроях можливий пробій ізоляції при робочій напрузі; аналогічне явище може мати місце в ізоляторах повітряної лінії. Основний засіб запобігання аварій від пошкодження ізоляції – профілактика, тобто періодичний контроль стану ізоляції з метою виявлення дефектів і своєчасної заміни або ремонту ізоляційних конструкцій. Контроль ізоляції здійснюється за допомогою випробування її підвищеною напругою, або непрямими методами: за опором ізоляції, за величиною кута діелектричних втрат, шляхом вимірювання розподілу напруги (по ізоляторах гірлянди) і індикації часткових розрядів і ін. Дефекти в ізоляції розвиваються поступово, причина їх у багатьох випадках пов'язана з проникненням вологи. Профілактичні випробування виявляють елементи ізоляції з підвищеною ймовірністю пошкодження, що дає можливість своєчасно усунути небезпеку аварії. Профілактика ізоляції різко скорочує аварійність електричних установок. У приморських і степових (пустельних) районах, а також поблизу заводів на ізоляторах осідають морська сіль, пісок, забирає з промислових підприємств тощо. У цих випадках встановлюють ізолятори спеціальної конструкції, з розвиненою зовнішньою поверхнею, а також виконують мокру очистку ізоляторів під напругою.

14.3 Захист електричних мереж від замикання на землю

В Україні мережі загального користування з напругою до 1 000 В експлуатуються з глухо заземленою нейтралю. У мережах з напругою від 3 до 35 кВ нейтраль ізольована від землі або з'єднується з нею через дугогасні котушки (в цьому випадку мережа називається компенсованою). Мережі напругою 110 кВ та вище виконуються з ефективно заземленою чи глухо заземленою нейтралю. Подібна практика стосовно режиму нейтралі має місце і в ін. країнах. При заземленої нейтралі з'єднання хоча б однієї фази з землею призводить до короткого замикання. Замикання однієї фази на землю в мережі з ізольованою нейтралю не порушує робочий режим, тому негайне відключення пошкодженої ділянки не потрібне, однак напруга двох інших фаз стосовно землі в сталому режимі збільшується в $\sqrt{3}$ раз, що створює загрозу для ізоляції і є небезпечним для людей. Мережі з ізольованою нейтралю обладнуються пристроями сигналізації замикання на землю, щоб пошкодження могло бути виявлене та усунуте за короткий час (не більше 2 годин). За вимогами техніки безпеки в необхідних випадках застосовується автоматичне відключення пошкодженої ділянки мережі.

Більшість замикань на землю починається з короткочасного пробою ізоляції внаслідок перенапруги і далі переходить в дуговий розряд, який підтримується струмом короткого замикання. У мережі великої протяжності розподілена ємність проводів відносно землі велика та сила струму на землю при ізольованій нейтралі досягає десятків і сотень ампер. При таких струмах дуга горить тривалий час і, як правило, перекидається на сусідні фази під дією вітру, термодинамічних і електродинамічних ефектів. Замикання однієї фази на землю переходить в дво-, або трифазне коротке замикання, яке повинне негайно відключатися.

14.4 Захист електричних мереж від коротких замикань

Захист електричних мереж від коротких замикань є найважливішим в системі захисних заходів. Короткі замикання є основним видом аварії в електричних мережах як за частотою виникнення, так і за масштабом шкідливих наслідків. Захисні заходи розвиваються в двох напрямках – максимально швидке відключення пошкодженої ділянки мережі і штучне обмеження сили струму короткого замикання. Скорочення часу дії струму короткого замикання полегшує тепловий режим елементів мережі і сприяє підтримці стійкої паралельної роботи станцій. Селективність (вибірковість) захисту забезпечує робочий режим можливо більшої частини неушкодженої мережі і відключення пошкодженої її ділянки. До числа заходів, що обмежують силу струму короткого замикання, відносяться: застосування блокових схем живлення, секціонування збірних шин підстанцій, послідовне включення реакторів, збільшення індуктивності розсіювання трансформаторів і таке інше. Фізичний сенс цих заходів полягає в збільшенні індуктивного опору електричного кола короткого замикання. Внаслідок цього неминучі труднощі з регулюванням напруги в нормальних режимах і збільшення втрат електроенергії в мережі. Це призводить до зниження в деяких випадках надійності електропостачання. Штучне обмеження сили струму короткого замикання суперечить вимогам, які пред’являються до схеми і параметрів електричної мережі за умовами оптимізації робочого режиму. Суперечність може бути усунена, якщо зменшити силу струму короткого замикання за допомогою послідовно ввімкнених обмежувачів, що мають незначний опір в нормальному режимі і в кілька разів більший в аварійному, коли на обмежувачі падає переважна частина фазної напруги.

14.5 Захист електричних мереж від перенапруги

Захист електричних мереж від перенапруги включає захист від атмосферних перенапруг, що виникають при розряді блискавки в струмопровідні частини електричної установки або поблизу неї в землю, і захист від внутрішніх перенапруг, що викликаються навмисними або випадковими змінами стану мережі, наприклад через спрацювання вимикача або електричного пробою ізоляції на якій-небудь ділянці мережі. *Перенапруги* – тимчасовий надлишок енергії електромагнітного поля на ділянці мережі. Захист електричної системи зводиться до того, щоб шляхом акумулювання або розсіювання надлишкової енергії убезпечити ізоляційні конструкції від електричного пробою. Атмосферні перенапруги характеризуються порівняно невеликою енергією, малою тривалістю дії (від часток до декількох десятків мксек) і великою амплітудою (млн. В). Внутрішні перенапруги тривають від сотих часток сек до кількох сек і більше. Їх амплітуда може значно перевищувати амплітуду робочої напруги, а енергія досягати десятків млн. Дж. Амплітуда внутрішніх перенапруг залежить від схеми електричної мережі, параметрів її елементів і живильних електростанцій. У ряді випадків для захисту від внутрішніх перенапруг можуть бути використані перемикаючі операції, що змінюють параметри мережі.

Розсіювання надлишкової енергії перенапруг здійснюється за допомогою розрядників чи нелінійних обмежувачів перенапруги, які за номінальної напруги не проводять струму, а при її перевищенні різко знижують свій опір і відводять енергію перенапруги в землю.

14.6 Захист електричних мереж від механічних пошкоджень

Підземні лінії передавання захищають від електрохімічної корозії, що спричиняється блукаючими струмами, і в необхідних випадках від ґрунтової корозії. Виконання будь-яких земляних робіт поблизу траси підземної лінії регламентується спеціальними правилами. Повітряні лінії електропередавання і відкриті електричні підстанції проектують з урахуванням вітрових навантажень і впливу ожеледі, наприклад обмерзання проводів з утворенням кірки льоду товщиною 10–20 мм. Можливо і більш інтенсивне зледеніння при сильному вітру; в таких випадках лід на проводах плавлять електричним струмом. При слабкому вітру, з постійною швидкістю 0,5–5 м/сек в напрямі, перпендикулярному лінії, можуть виникнути періодичні коливання проводів у вертикальній площині. Частота таких коливань від одиниць до десятків Гц, амплітуда не перевищує

декількох сантиметрів. Вібрація викликається збігом частоти аеродинамічних імпульсів, що діють на провід, з власною частотою його вільних коливань. Наслідком вібрації є тріщини і злами жил дротів, перш за все біля виходу їх із затиску. Вібрація з великою амплітудою призводить до поломки деталей арматури і пошкодження ізоляторів, в окремих випадках – до пошкодження зварених швів металевих опор. Захист від подібних вібрацій здійснюється шляхом підвішування на провід динамічних гасителів вібрації у вигляді чавунних вантажів, що закріплюються на тросі на відстані 0,5–2 м від затиску проводу та протидіючих коливань дроти. За допомогою таких гасителів амплітуда вібрації зменшується до безпечної величини. При швидкості вітру від 6 до 20–30 м/сек і ожеледі іноді спостерігаються коливання проводів з частотою 0,2–4 Гц дуже великої амплітуди, яка досягає декількох метрів. Це явище називається «танцем» проводів, радикального захисту від нього не розроблено.

Опори і конструкції, що підтримують провід, захищають від атмосферного впливу, а також від агресивної біосфери (грибків, бактерій, комах) за допомогою просочення дерев'яних частин або антикорозійного покриття металевих конструкцій. Вживаються також спеціальні заходи для захисту повітряних ліній від пожеж на трасі, від падіння дерев, від снігових і кам'яних лавин, від весняного льодоходу (поблизу річок) тощо. Зокрема, уздовж траси лінії встановлюється охоронна зелена зона шириною від 20 до 100 м в залежно від значення робочої напруги.

Запитання для перевірки

1. Які заходи необхідні для захисту електричних мереж?
2. Що має захищатися в електричній мережі?
3. Від яких явищ необхідно захищати електричну мережу?
4. Яким чином здійснюється контроль ізоляції.
5. Наведіть види коротких замикань на землю.
6. До яких наслідків може призвести довга дія короткого замикання?
7. Охарактеризуйте види перенапруг, що діють на електричну мережу.
8. Які механічні пошкодження впливають на справність електричних мереж?
9. Які заходи вживають для захисту від механічних пошкоджень?

БЕЗПЕКА ПІД ЧАС ЕКСПЛУАТАЦІЇ ЕЛЕКТРИЧНИХ СИСТЕМ ТА ПРИЛАДІВ

16.1 Деякі історичні факти

Перша офіційно зареєстрована смерть від ураження електричним струмом сталася у Франції в 1879 р – жертвою дії струму став тесля.

Частота електротравм у розвинених країнах складає 2–3 випадки на 100 тис. населення.

Групу ризику становлять люди віком 25–40 років, причому чоловіки в 4 рази частіше помирають внаслідок електротравм, ніж жінки.

16.2 Удар струмом: перша допомога, наслідки після ураження

Під електротравмою розуміють пошкодження органів і систем внаслідок ураження електричним струмом. Основні причини смерті при ударі струмом – це зупинка дихання і зупинка серця. Після сильного удару струмом, навіть якщо людина залишиться живою, можливий розвиток ускладнень з боку серцево-судинної, центральної нервової системи, порушення зору, слуху та ін.

Найчастіше нещасні випадки відбуваються при:

– незнанні або недотриманні правил техніки безпеки при користуванні електроприладами;

– несправності побутових приладів в побуті, електрообладнання на підприємствах;

– обриві дротів високовольтних ліній.

Ступінь ураження організму людини залежить від шляху протікання струму тілом, від сили і напруги струму, часу впливу, стану здоров’я, віку, а також своєчасності надання потерпілому першої допомоги.

Види враження електричним струмом:

– *електричний удар* (шок) – впливає на весь організм, викликає опіків, а призводить до паралічу дихання і / або серця

– *електрична травма* – враження зовнішніх частин тіла – наявні електричні знаки, опіки, металізація шкіри.

Вплив електричного струму на організм:

– *Тепловий* – внаслідок опору тканин організму електрична енергія перетворюється на теплову, викликаючи електричні опіки в характерних місцях вхо-

ду і виходу струму, які називають знаками струму. При проходженні через тканини теплова енергія змінює і руйнує їх.

– *Електрохімічний* – призводить до згущення і склеюванню клітин крові, переміщення іонів і зміни заряду білкових молекул, утворенню пари і газів. Уражені тканини набувають ніздрюватого вигляду.

– *Біологічний* – порушується робота мускулатури серця, нервової та інших систем.

Симптоми враження електричним струмом:

– Несподіване падіння людини на вулиці або неприродне відкидання від джерела струму невидимою силою.

– Втрата свідомості, судоми.

– Виражені скорочення м'язів мимовільного характеру.

– Випадання неврологічних функцій – втрата пам'яті, порушення зору та розуміння мови, порушення орієнтації в просторі, зміна шкірної чутливості, реакції зіниці на світло.

– Фібриляція шлуночків і зупинка дихання – нерівний пульс і нерівне дихання.

– Опіки на тілі з різко окресленими межами.

Знаки струму на шкірі:

Це ділянки омертвіння зовнішніх тканин в точках входу і виходу електроструму внаслідок переходу енергії з електричної в теплову. Електричні опіки часто обмежуються лише мітками на шкірі, частіше пошкоджуються більш глибокі тканини: м'язи, сухожилля, кістки. Зустрічаються варіанти, коли поразка локалізована під зовні неушкодженою шкірою.

– *Форма* – овальна, округла або лінійна. По краях ураженої шкіри може сформуватися припухлість, а середина мітки виглядає трохи запалою. Ймовірне відшарування верхнього шару у вигляді бульбашок, усередині яких відсутня рідина.

– *Колір* – найчастіше блідий, бідно-сірий світліший від навколишньої шкіри.

– *Чутливість* – біль у місцях міток відсутня зважаючи на враження нервових закінчень.

– *Ознаки* – відкладення частинок металу на шкірі: при враженні струмами низької напруги на поверхні шкіри, високої – всередині шкіри. Колір залежить від металу провідника: мідь – частинки синьо-жовті, залізо – коричневі. Волосяні стрижні закручуються в спіралі, зберігаючи структуру.

Наслідки удару струмом:

Нервова система: втрата свідомості різного ступеня та тривалості; втрата пам'яті (ретроградна амнезія); судоми; слабкість і розбитість; запаморочення і головний біль; порушення терморегуляції; мерехтіння в очах, порушення зору.

При враженні нервів змінюється чутливість і рухова активність в кінцівках, порушується трофіка, виникають патологічні рефлекси. Протікання струму через мозок призводить до судом та втрати свідомості, у ряді випадків ураження дихального центру веде до зупинки дихання.

Струм високої напруги призводить до глибоких порушень діяльності центральної нервової системи, гальмуванню центру дихання і регуляції серцевої діяльності, що призводить до електричної летаргії, уявної смерті, коли здається, що дихання і серцебиття відсутні, а насправді діяльність важливих систем організму знижена до мінімуму. Вчасно розпочаті реанімаційні заходи успішно відновлюють роботу систем.

Серцево-судинна система:

У більшості випадків спостерігаються порушення серцевої діяльності функціонального характеру: синусна аритмія; тахікардія; брадикардія; екстрасистолія; серцеві блокади.

Ураження струмом серцевого м'яза може призвести до порушення скорочувальної функції, приводячи до фібриляції, коли волокна міокарда починають скорочуватися в розрізненому ритмі, а серце не може перекачувати кров, що за тяжкістю рівносильне зупинці серця. Пошкодження судин призводить до кровотеч.

Дихальна система: гальмування або зупинка дихальної діяльності відбуваються внаслідок ураження дихального центру в головному мозку. Протікання струму через легеневу тканину призводить до удару і розриву легенів.

Органи відчуття: погіршення слуху; шум у вухах; розлад дотику; розрив барабанної перетинки; травма середнього вуха; кератит; катаракта.

Поперечнополосата і гладка мускулатура: спазм і скорочення м'язових волокон може призвести до судом; сильне скорочення скелетних м'язів може закінчитися переломами хребта і трубчастих кісток: спазм м'язового шару судинної стінки призводить до підвищення тиску чи інфаркту міокарда (у разі спазму серцевих артерій).

Віддалені ускладнення: серцево-судинна система – порушення провідності серця, серцевого ритму, облітерируючий ендартеріїт, артеріосклероз:

– нервова система – неврити, енцефалопатії, трофічні виразки, вегетативні зміни;

– органи чуття – катаракта, порушення слуху і зору;

– кістково-м’язова система – контрактури (обмеження амплітуди рухів, неможливість зігнути кінцівку), деформації.

16.3 Фактори, які впливають на характер і тяжкість електротравми

Вид, сила і напруга струму:

– напруга вища за 1 000 вольт може призвести до важких пошкоджень навіть, якщо не торкатися до частин під напругою, а перебувати досить близько від них.

– струм високої напруги викликає різке скорочення м’язів, людина навіть може бути з силою відкинута від джерела струму.

– змінний низькочастотний струм небезпечніший за постійний, оскільки вражає внутрішні органи;

– струм низької напруги провокує спазм м’язів, що може призвести до тривалого мимовільного захвату провідника руками;

– високочастотний – менш небезпечний, оскільки вражає тільки поверхню шкіри.

Таблиця 1 – Суб’єктивні відчуття людини залежно від величину струму при впливі на руку

Сила струму (мА)	Реакція організму при впливі на руку
0,9–1,2	Ледве відчутний вплив
1,2–1,6	Мурашки і лоскотання по шкірі
1,6–2,8	Напруга в зап’ясті
2,8–4,5	Погіршення рухливості в передпліччя
4,5–5,0	Судоми м’язів передпліччя
5,0–7,0	Судоми м’язів плеча
15,0–20	Рука не відривається від джерела струму
20–40	Хворобливі судоми м’язів всього тіла
50–100	Зупинка серцевої діяльності
Більше 200	Глибокі опіки

Шлях струму організмом – коло струму:

– найнебезпечніші варіанти – коло, що включає 2 руки і 2 ноги, руку-руку, руку – ногу, оскільки струм протікає через серце.

– практично таку ж небезпеку становить шлях – рука-голова, коли струм проходить через головний мозок.

Тривалість дії струму: з плином часу зменшується опір шкіри, тому необхідно якомога раніше перервати контакт потерпілого з провідником, більша тривалість дії струму викликає сильніше ураження і більшу ймовірність смерті.

Зовнішні фактори: тяжкість ураження зростає в умовах підвищеної вологості (лазні, ванні кімнати, тощо), а також при враженні струмом у воді, причому в солоній воді ураження сильніше, ніж у прісній (у солоної воді краща електропровідність).

Стан організму: небезпека ураження струмом посилюється на тлі виснаження, алкогольного або наркотичного сп'яніння, хронічних захворювань, похилого та дитячого віку.

16.4 Надання першої допомоги при ураженні електричним струмом

Всі дії з надання допомоги при ураженні електричним струмом повинні здійснюватися дуже швидко, без затримок, зайвих розмов і міркувань. Своєчасне надання допомоги дозволяє зберегти життя і зменшити тяжкість електротравми.

Незалежно від стану потерпілого, слід негайно викликати швидку або доставити людину до медичного закладу. Смерть від удару струмом може наступити і через кілька годин. Слід пам'ятати, що зовнішня картина не відображає внутрішнього стану організму.

При ураженні електричним струмом необхідно якомога швидше звільнити потерпілого від дії струму тому що від тривалості його дії на організм залежить важкість електротравми.

Дотик до струмоведучих частин що перебувають під напругою викликає в більшості випадків мимовільне судорожне скорочення м'язів і загальне збудження, яке може привести до порушення і навіть повного припинення діяльності органів дихання і кровообігу. Якщо потерпілий тримає провід руками і його пальці стискаються так сильно, що вивільнити провід неможливо, то в першу чергу, особа що надає допомогу, повинна відключити ту частину електроустановки, якої торкається потерпілий.

Відключити електроустановку можна за допомогою вимикача, рубильника або іншого вимикаючого апарату, а також шляхом зняття запобіжників, роз'єднанню штепсельних з'єднань, створення штучного короткого замикання на повітряній лінії ПЛ «накидом» і таке інше.

Якщо потерпілий знаходиться на висоті, відключення установки, і тим самим звільнення потерпілого від дії струму, може викликати його падіння з

висоти. В цьому випадку необхідно вжити заходи для запобігання додаткових травм.

При відключенні установки може одночасно згаснути електричне світло, тому при відсутності денного освітлення необхідно забезпечити освітлення від іншого джерела (ввімкнути аварійне освітлення, акумуляторні ліхтарі і таке інше з урахуванням вибухо- і пожежонебезпеки приміщення), не затримуючи при цьому відключення установки та надання допомоги потерпілому.

Якщо відсутня можливість швидкого вимкнення електроустановки то необхідно вжити заходи з відділення потерпілого від струмоведучих частин, до яких він торкається. При цьому у всіх випадках той хто надає допомогу не повинен торкатися до потерпілого без застосування належних запобіжних заходів, тому що це небезпечно для життя. Він повинен також стежити за тим щоб самому не опинитися в контакті з струмовідною частиною або під напругою кроку, перебуваючи в зоні розтікання струму замикання на землю.

При напрузі до 1 000 В для відділення потерпілого від струмоведучих частин або проводу слід скористатися канатом, палицею, дошкою або будь-яким іншим сухим предметом, що не проводить електричний струм. Можна відтягнути потерпілого від струмопровідних частин за одяг (якщо він сухий і відстає від тіла), наприклад, за поли піджака або пальто, за комір, уникаючи при цьому дотику до оточуючих металевих предметів і частин тіла потерпілого, не прикритих одягом. Можна відтягнути потерпілого за ноги, при цьому той хто надає допомогу не повинен торкатися його взуття або одягу без надійної ізоляції своїх рук, тому що взуття і одяг можуть бути сирими і бути провідниками електричного струму. Для ізоляції рук, той хто надає допомогу, особливо якщо йому необхідно торкнутися тіла потерпілого не прикритого одягом, повинен одягнути діелектричні рукавички або обмотати руку шарфом, надягти на неї суконний кашкет, натягнути на руку рукав піджака або пальто, накинути на потерпілого гумовий килим, прогумовану матерію, плащ або просто суху матерію. Можна також ізолювати себе вставши на гумовий килим, суху дошку або яку-небудь підстилку, що не проводить електричний струм, згорток сухого одягу і таке інше. При відділенні потерпілого від струмопровідних частин слід діяти однією рукою.

Якщо електричний струм проходить в землю через потерпілого і він судорожно стискає в руці струмовідний елемент (наприклад провід), простіше перервати дію струму, відокремивши потерпілого від землі (підсунувши під нього суху дошку або відтягнувши ноги від землі мотузкою або одягом дотримуючись при цьому зазначених вище запобіжних заходів, як стосовно самого себе

так і стосовно потерпілого. Можна також перерубати провід сокирою з сухим дерев'яним держаком або зробити розрив, застосовуючи інструмент з ізолюючими рукоятками (кусачки, пасатижі, тощо). Можна скористатися інструментом без ізолюючих рукояток, обернувши його рукоятку сухою матерією. Перерубувати дроти необхідно пофазно, тобто розрубувати провід кожної фази окремо, при цьому слід ізолювати себе від землі (стояти на сухих дошках, дерев'яних сходах і таке інше).

При напрузі понад 1 000 В для відділення потерпілого від струмоведучих частин необхідно використовувати засоби захисту: одягнути діелектричні рукавички та боти і діяти штангою або ізолюючими кліщами розрахованими на відповідну напругу.

На повітряних лініях електропередачі 6–20 кВ, коли не можна швидко відключити їх з боку живлення, слід створити штучне коротке замикання для їх вимкнення. Для цього на дроти лінії треба накинути гнучкий неізольований провідник, який повинен мати достатній переріз щоб уникнути перегоряння при проходженні через нього струму короткого замикання. Перед тим як накинути провідник, один його кінець необхідно заземлити (приєднавши до металевої опори, заземлюючого спуску, або окремого заземлювачу та ін.), а на інший кінець для зручності накидання бажано прикріпити вантаж. Накидати провідник треба так щоб він не торкнувся людей, в тому числі того, хто надає допомогу і потерпілого. При накиданні провідника необхідно користуватися діелектричними рукавичками та ботами.

Тому хто надає допомогу слід пам'ятати про небезпеку напруги кроку якщо струмовідна частина (провід і таке інше) лежить на землі. Переміщуватися в цій зоні потрібно з особливою обережністю, використовуючи засоби захисту для ізоляції від землі (діелектричні калоші, боти, килими, ізолюючі підставки) або предмети, що погано проводять електричний струм (сухі дошки, колоди і таке інше). Без засобів захисту переміщуватися в зоні розтікання струму замикання на землю слід пересуваючи ступні ніг по землі, не відриваючи їх одну від одної.

Після відділення потерпілого від струмопровідних частин слід винести його з цієї зони на відстань не меншу 8 м від струмовідної частини (проводу).

16.4.1 Способи надання першої допомоги постраждалому

Способи надання першої допомоги залежать від стану потерпілого. Ознаки за якими можна швидко визначити стан здоров'я потерпілого наступні:

– свідомість – ясна, відсутня, порушена (потерпілий загальмований або збуджений);

– колір шкірних покровів і видимих слизових оболонок (губ, очей): рожевий, синюшний, блідий;

– дихання – нормальне, відсутнє, порушене (неправильне, поверхневе, хрипле);

– пульс на сонних артеріях – добре визначається, (ритм правильний або неправильний), погано визначається, відсутній;

– зіниці – розширені чи звужені.

При наданні допомоги, той хто її надає, за хвилину повинен оцінити стан потерпілого і вирішити в якому об'ємі і порядку слід надавати йому допомогу.

Відсутність свідомості у постраждалого визначають візуально. Щоб остаточно переконатися в цьому слід звернутися до потерпілого з питанням про самопочуття.

Колір шкірних покривів і наявність дихання (за підйомом і опусканням грудної клітини) оцінюють також візуально. Не слід витрачати дорогоцінний час на прикладання до рота і носа дзеркала і блискучих металевих предметів.

Для визначення пульсу на сонній артерії пальці рук накладають на адамове яблуко (трахею) постраждалого і, просуваючи їх трохи в сторону, обмацують шию збоку.

Ширину зіниць при закритих очах визначають наступним чином: подушечки вказівних пальців кладуть на верхні повіки обох очей і злегка придавлюючи їх до очного яблука, піднімають вгору. При цьому очна щілина відкривається і на білому фоні стає видно округлу райдужку, а в центрі її – округлої форми чорні зіниці, стан яких (звужені або розширені) оцінюють за площею райдужки, яку вони займають.

Ступінь порушення свідомості, колір шкірних покривів і стан дихання можна оцінювати одночасно з промацуванням пульсу, що віднімає не більше хвилини. Огляд зіниць вдається провести за кілька секунд.

При відсутності видимих важких пошкоджень на тілі потерпілого після протікання через нього електричного струму, або впливу інших небезпечних факторів, потерпілому не можна дозволяти рухатися, а тим більше продовжувати роботу, тому, що не виключена можливість раптового подальшого погір-

шення стану його здоров'я. Тільки лікар може вирішити питання про стан здоров'я потерпілого.

При ураженні блискавкою не можна заривати потерпілого в землю, це принесе тільки шкоду і приведе до втрат дорогоцінних для його порятунку хвилин. Якщо потерпілий у свідомості (а до цього був непритомним або знаходився в несвідомому стані, але зі збереженим стійким диханням і пульсом), його слід покласти на підстилку, наприклад, з одягу; розстебнути одяг, який утруднює дихання; створити приплив свіжого повітря; зігріти тіло, якщо холодно; забезпечити прохолоду, якщо жарко; забезпечити повний спокій, безперервно спостерігаючи за пульсом і диханням; видалити зайвих людей; дати випити водний розчин настоянки валеріани (20 крапель).

Якщо потерпілий знаходиться в несвідомому стані необхідно спостерігати за його диханням і в разі порушення дихання через западання язика висунути нижню щелепу вперед. Для цього чотирма пальцями обох рук захоплюють нижню щелепу ззаду за кути і упираючись великими пальцями в її краї нижче кутів рота, відтягують і висувають вперед так, щоб нижні зуби стояли попереду верхніх. Підтримувати її в такому положенні слід поки не припиниться западання язика.

Потерпілому, що знаходиться в несвідомому стані потрібно давати нюхати нашатирний спирт, обприскувати обличчя холодною водою.

При виникненні у потерпілого блювання необхідно повернути його голову і плечі в сторону (краще наліво) для видалення блювотних мас.

Якщо потерпілий дихає дуже рідко і судорожно але у нього прощупується пульс, необхідно відразу ж почати штучне дихання. Не обов'язково щоб при проведенні штучного дихання потерпілий знаходився в горизонтальному положенні. Починати проводити штучне дихання потрібно відразу ж після звільнення потерпілого від впливу небезпечних і шкідливих факторів, а також під час спуску з опори, виносу з небезпечної зони і таке інше.

Якщо у потерпілого відсутні свідомість, дихання, пульс, шкірний покрив синюшний, а зіниці розширені, слід негайно приступити до відновлення життєвих функцій організму, шляхом проведення штучного дихання і зовнішнього масажу серця.

Комплекс цих заходів називається реанімацією (тобто оживленням), а заходи – реанімаційними.

Не слід роздягати потерпілого, втрачаючи на це дорогоцінні секунди. Необхідно пам'ятати, що спроби оживлення ефективні лише в тих випадках, коли з моменту зупинки серця пройшло не більше 4 хвилин, тому першу допомогу слід надавати негайно і по можливості на місці події.

Не можна відмовлятися від надання допомоги потерпілому і вважати його померлим за відсутності таких ознак життєдіяльності як дихання або пульс. Робити висновок про смерть постраждалого має право тільки медичний персонал.

Приступивши до оживлення слід подбати про виклик лікаря або швидкої медичної допомоги. Це повинен зробити не той, хто надає допомогу і не може перервати її надання, а хтось інший.

Потрібно зафіксувати час зупинки дихання і кровообігу у потерпілого, час початку проведення штучного дихання і зовнішнього масажу серця, а також тривалість реанімаційних заходів і повідомити ці відомості прибулому медичному персоналу.

16.4.2 Способи виконання штучного дихання і зовнішнього масажу серця

Штучне дихання проводиться в тих випадках коли потерпілий не дихає або дихає дуже погано (рідко, судорожно немовби зі схлипуванням), а також якщо його дихання постійно погіршується.

Найбільш ефективним способом штучного дихання є спосіб «з рота в рот» або «з рота в ніс» тому, що при цьому забезпечується надходження достатнього об’єму повітря в легені потерпілого. Спосіб «з рота в рот» або «з рота в ніс» заснований на використанні повітря, яке видихає той, хто надає допомогу; таке повітря насильно подається в дихальні шляхи потерпілого і фізіологічно придатне для його дихання. Повітря можна вдувати через марлю, хустинку і таке інше. Цей спосіб штучного дихання дозволяє легко контролювати надходження повітря в легені потерпілого за підйомом грудної клітини після вдування і наступного спадання її в результаті пасивного видиху.

Для проведення штучного дихання потерпілого слід покласти на спину, розстібнути одяг, що ускладнює дихання, і забезпечити прохідність верхніх дихальних шляхів, які в положенні на спині при несвідомому стані закриті запалим язиком. Крім того, в ротовій порожнині може знаходитись чужорідний вміст, який необхідно видалити вказівним пальцем, загорнутим хусткою, тканиною або бинтом, повернувши голову потерпілого набік. Після цього, той хто надає допомогу, розташовується збоку від голови потерпілого, одну руку підсовує під його шию, а долонею іншої руки натискає на лоб максимально закидаючи голову. При цьому корінь язика піднімається і звільняє вхід в гортань, а рот потерпілого відкривається. Той, хто надає допомогу, нахиляється до обличчя потерпілого глибоко вдихає відкритим ротом, потім щільно охоплює губами відкритий рот потерпілого і енергійний видихає, з деяким зусиллям вдихаючи повітря в його рот; одночасно він закриває ніс потерпілого щокою або пальцями руки, що знаходиться на лобі. При цьому слід обов’язково спостерігати за

грудною кліткою потерпілого, яка повинна підніматися. Як тільки грудна клітка піднялася нагнітання повітря припиняють, той, хто надає допомогу, піднімає свою голову, відбувається пасивний видих у потерпілого. Для того щоб видих був більш глибоким, можна несильним натисканням руки на груди допомогти повітрю вийти з легень потерпілого.

Якщо у потерпілого добре визначається пульс і необхідно проводити тільки штучне дихання, то інтервал між вдихами має становити 5 с, що відповідає частоті дихання 12 разів на хвилину.

Крім розширення грудної клітини, про ефективність штучного дихання свідчить набуття рожевого кольору шкірними покровами і слизовими оболонками, а також повернення потерпілого у свідомість та поява у нього самостійного дихання.

При проведенні штучного дихання той, хто надає допомогу, повинен стежити за тим щоб повітря, яке вдихається потрапляло в легені а не в шлунок потерпілого. При попаданні повітря в шлунок, про що свідчить здуття живота», під ложечкою», обережно натискають долонею на живіт між грудиною і пупком. При цьому може виникнути блювота, тому необхідно повернути голову і плечі потерпілого набік (краще наліво), щоб очистити його рот і горло.

Якщо після вдування повітря грудна клітка не піднімається необхідно висунути нижню щелепу потерпілого вперед. Якщо щелепи потерпілого щільно стиснуті і відкрити рот не вдається, слід проводити штучне дихання за способом «з рота в ніс».

При відсутності самостійного дихання і наявності пульсу штучне дихання можна проводити і в положенні сидячи, або вертикальному, якщо нещасний випадок стався в корзині вишки на опорі або на щоглі. При цьому, якомога більше закидають голову потерпілого назад або висувають вперед нижню щелепу. Решта прийомів та ж сама.

Зовнішній масаж серця проводиться за відсутності не тільки дихання але і пульсу на сонній артерії. Одного штучного дихання при наданні допомоги недостатньо тому, що кисень з легень не може переноситися кров'ю до інших органів і тканин. У цьому випадку необхідно відновити кровообіг штучним шляхом, для чого слід проводити зовнішній масаж серця. Серце у людини розташоване в грудній клітці між грудиною і хребтом. Грудина – рухлива плоска кістка. У положенні людини на спині на твердій поверхні хребет є жорсткою нерухомою підставою. Якщо натискати на грудину, то серце буде стискатися між грудиною і хребтом і кров з його порожнин буде видавлюватися в судини. Якщо натискати на грудину поштовхами, то кров буде виштовхуватись з порожнин серця майже так, як це відбувається при його природному скороченні. Це нази-

ається зовнішнім непрямим закритим масажем серця, при якому штучно відновлюється кровообіг. Таким чином, при поєднанні штучного дихання з зовнішнім масажем серця, імітуються функції дихання і кровообігу.

Показанням до проведення реанімаційних заходів є зупинка серцевої діяльності, для якої характерне поєднання таких ознак: блідість або синюшність шкірних покривів, втрата свідомості, відсутність пульсу на сонних артеріях, припинення дихання або судорожне дихання. При зупинці серця, не втрачаючи ні секунди, потерпілого треба укласти на рівну жорстку основу: лаву, підлогу, в крайньому випадку підкласти під спину дошку.

Якщо допомогу надає одна людина то вона розташовується збоку від потерпілого і нахилившись робить два швидких енергійних вдування за способом «з рота в рот» або «з рота в ніс» потім розгинається залишаючись на цій же стороні від потерпілого долоню однієї руки кладе на нижню половину грудини відступивши на два пальці вище від її нижнього краю, а пальці піднімає. Долоня другої руки кладеться поверх першої поперек або уздовж. При натисканні допомагають нахилом корпусу. Руки при натисканні повинні бути випрямлені в ліктьових суглобах. Натискати слід швидкими поштовхами, так щоби зміщувати грудину на 4–5 см, тривалість натискання не більше 0.5 с, інтервал між окремими надавлюваннями не більше 0.5 с.

В паузах рук з грудини не знімають (якщо допомогу надають двоє), пальці залишаються піднятими, руки повністю випрямленими в ліктьових суглобах.

Якщо оживлення проводить одна людина, то на кожні два глибоких вдування вона робить 15 натискань на грудину, після чого знову робить два вдування і знову повторює 15 натискань і т. д. За хвилину необхідно зробити не менше 60 натискань і 12 вдувань, тому темп реанімаційних заходів повинен бути високим.

При участі в реанімації двох осіб, співвідношення «дихання – масаж» складає 1 : 5, тобто після одного глибокого вдування проводиться п’ять натискань на грудну клітку. Під час штучного вдиху постраждалому, той хто робить масаж серця, натискання не виконує, тому, що зусилля, які виникають при натисканні, значно більші ніж при вдуванні (натиснення при вдування призводить до неефективності штучного дихання, а отже і реанімаційних заходів). При проведенні реанімації вдвох, тим, хто надають допомогу, доцільно мінятися місцями через 5–10 хв.

При правильному виконанні зовнішнього масажу серця кожне натиснення на грудину викликає поява пульсу в артеріях.

Ті, хто надають допомогу повинні періодично контролювати правильність і ефективність зовнішнього масажу серця за появою пульсу на сонних або

стегнових артеріях. При проведенні реанімації однією людиною, їй слід через кожні 2 хвилини переривати масаж серця на 2–3 с для визначення пульсу. Якщо в реанімації беруть участь двоє, то пульс на сонній артерії контролює той хто проводить штучне дихання. Поява пульсу під час перерви масажу свідчить про відновлення діяльності серця. При цьому слід негайно припинити масаж серця, але продовжувати проведення штучного дихання до появи стійкого самостійного дихання. При відсутності пульсу необхідно продовжувати масаж серця.

Штучне дихання і зовнішній масаж серця необхідно проводити до відновлення стійкого самостійного дихання і діяльності серця у потерпілого або до його передачі медичному персоналу. Якщо реанімаційні заходи ефективні (визначається пульс на великих артеріях під час натискання на грудину, звужуються зіниці, зменшується синюшність шкіри і слизових оболонок), серцева діяльність і самостійне дихання у потерпілого відновлюються.

Тривала відсутність пульсу при появі інших ознак оживлення організму (самостійне дихання, звуження зіниць, спроби потерпілого рухати руками і ногами та ін.) служить ознакою фібриляції серця. У цих випадках необхідно продовжувати робити штучне дихання і масаж серця потерпілого до передачі його медикам. Реанімаційні заходи у дітей до 12 років мають особливості. Дітям від року до 12 років масаж серця виконують однією рукою і в хвилину роблять від 70 до 100 натискань в залежності від віку дітям до року – від 100 до 120 натискань в хвилину двома пальцями вказівним і середнім на середину грудини або великими пальцями обох рук обхопивши тулуб дитини іншими пальцями.

Запитання для перевірки

1. Що таке електротравма?
2. Що таке електричний удар.
3. Наведіть види впливів електричного струму на організм.
4. Які симптоми ураження електричним струмом?
5. Який шлях струму найнебезпечніший для людини?
6. Наведіть класифікацію ступенів ураження струмом.
7. Поясніть порядок надання першої допомоги при ударі струмом.
8. Які дії необхідні при ураженні блискавкою?
9. Наведіть засоби захисту від ураження електричним струмом;

СПИСОК ДЖЕРЕЛ

1. Будіщев М. С. Електротехніка, електроніка та мікропроцесорна техніка: підручник / М. С. Будіщев. – Львів : Афіша, 2001. – 424 с.
2. Колонтаєвський Ю. П. Промислова електроніка і мікросхемотехніка : Під ред.. А. Г. Соскова. Вид. 2е, виправл. і доповн. / Ю. П. Колонтаєвський, А. Г. Сосков. – Харків : ХДАМГ, 2003. – 281 с.
3. Теорія електропривода : підручник / [М. Г. Попович, М. Г. Борисик, В. А. Гаврилюк та ін.]. За ред. М. Г. Поповича. – Київ : Вища шк., 1993. – 454 с.
4. Клауснитцер Г. Введение в електротехнику / Г. Клауснитцер ; пер. с нем. – М. : Энергоатомиздат, 1985. – 480 с.
5. Руденко В. С. Промислова електроніка / В. С. Руденко, В. Я. Ромашко, В. В. Трифонюк. – Київ : Либідь, 1993. – 432 с.
6. Веников В. А. Введение в специальность. : учеб. пособие для вузов / В. А. Веников, Е. В. Путятин. – М. : Высш. шк., 1978. – 294 с.
7. Касаткин А. С. Электротехника: учебник для вузов / А. С. Касаткин, М. В. Немцов. – [6-е изд. перераб.]. – М. : Высш. шк., 1999. – 542 с.

Навчальне видання

ГАРЯЖА Василь Миколайович,
КАРПАЛЮК Ігор Тимофійович

ВСТУП ДО СПЕЦІАЛЬНОСТІ

КОНСПЕКТ ЛЕКЦІЙ

(для студентів 2 курсу денної, заочної і прискореної форм навчання освітньо-кваліфікаційного рівня «бакалавр» за спеціальністю 141 – Електроенергетика, електротехніка та електромеханіка)

Відповідальний за випуск *П. П. Рожков*

За авторською редакцією

Комп'ютерне верстання *І. Т. Карпалюк*

План 2018, поз. 132Л

Підп. до друку 04.06.2018. Формат 60 × 84/16.
Друк на ризографі. Ум. друк. арк. 8,7.
Тираж 50 пр. Зам. № _____

Видавець і виготовлювач:
Харківський національний університет
міського господарства імені О. М. Бекетова,
вул. Маршала Бажанова, 17, Харків, 61002
Електронна адреса: rectorat@kname.edu.ua
Свідоцтво суб'єкта видавничої справи:
ДК № 5328 від 11.04.2017.