

МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ І НАУКИ УКРАЇНИ
ХАРКІВСЬКА НАЦІОНАЛЬНА АКАДЕМІЯ МІСЬКОГО
ГОСПОДАРСТВА

**А.Є.Ачкасов, В.А.Лушкін, В.М.Охріменко,
А.І.Кузнецов, М.В.Чернявська, Т.Б.Воронкова**

ЕЛЕКТРОТЕХНІКА У БУДІВНИЦТВІ

Харків-ХНАМГ-2009

УДК 621.3
ББК 31.2
А 97

А 97

**Ачкасов А.Є., Лушкін В.А., Охріменко В. М., Кузнецов А. І.,
Чернявська М.В., Воронкова Т. Б.**

Електротехніка у будівництві: Навчальний посібник. - Харків: ХНАМГ, 2009 - 363 с.

Навчальний посібник написаний відповідно до програми підготовки бакалаврів і фахівців спеціальностей «Промислове і цивільне будівництво», «Міське будівництво і господарство». У ньому викладаються теми курсу й завдання з прикладами розв'язання. Наводяться основні відомості з теорії електричних кіл, розглянуто трансформатори і електричні машини, основи електроніки і електроприводу. Описується електрообладнання будівельних майданчиків, підприємств будівельної індустрії, інженерних систем будівель.

Призначений для студентів будівельних спеціальностей, викладачів та інших читачів, які цікавляться використанням електротехнічного обладнання у виробництві й побуті.

Рекомендовано Міністерством освіти і науки України
як навчальний посібник для студентів вищих навчальних закладів,
які навчаються за напрямком "Будівництво"
(лист №1/11-603 від 24.07.2009)

Рецензенти:

Ю.Г. Куцан, – доктор технічних наук, академік АТН України;

А.В. Праховник – доктор технічних наук, професор, директор інституту енергозбереження та енергоменеджменту НТУ України "КПІ";

О.І. Яковлєв, доктор технічних наук, професор, професор кафедри енергоустановок космічних літальних апаратів Національного аерокосмічного університету ім. М.Є. Жуковського (ХАІ).

ISBN 978-966-695-127-7

© Ачкасов А.Є., Лушкін В.А.,
Охріменко В.М., Кузнецов А.І.,
Чернявська М.В., Воронкова Т.Б.
© ХНАМГ

ЗМІСТ

Передмова.....	8
ЗМІСТОВИЙ МОДУЛЬ 1. ЕЛЕКТРИЧНІ КОЛА.....	9
Тема 1. Основні терміни й поняття.....	9
1.1. Електричне коло і його елементи.....	9
1.2. Класифікація електричних струмів, ЕРС і напруг.....	10
1.3. Елементи електричних кіл і їхні графічні зображення.....	11
1.4. Загальні правила виконання електричних схем.....	15
Контрольні запитання з теми 1.....	17
Розділ 1. Електричні кола постійного струму.....	18
Тема 2. Фізичні процеси в колах постійного струму.....	18
2.1. Закон Ома.....	18
2.2. Режими роботи джерела постійного струму.....	18
2.3. Робота й потужність постійного струму.....	21
2.4. Умови віддачі джерелом максимальної потужності.....	23
2.5. Схеми з'єднання елементів кола.....	25
2.6. Закони Кірхгофа.....	31
Контрольні запитання з теми 2.....	34
Тема 3. Методи розрахунку складних кіл постійного струму.....	35
3.1. Застосування законів Кірхгофа для аналізу складних кіл.....	35
3.2. Метод вузлових потенціалів.....	37
3.3. Метод контурних струмів.....	39
3.4. Принцип суперпозиції (метод накладання).....	40
3.5. Принцип взаємності.....	41
3.6. Метод еквівалентного генератора.....	43
Контрольні запитання з теми 3.....	46
Задачі до тем 2 і 3 і приклади їхнього розв'язання.....	46
Розділ 2. Електричні кола змінного струму.....	54
Тема 4. Фізичні процеси в колах змінного струму.....	54
4.1. Основні відомості про змінний струм.....	54
4.2. Елементи схем заміщення із змінними струмами.....	55
4.3. Діючі й середні значення періодичних напруг і струмів.....	57
4.4. Комплексна форма подання синусоїдальних напруг і струмів... ..	58
4.5. Діючі й середні значення синусоїдальних напруг і струмів.....	60
4.6. Комплексна форма запису законів Кірхгофа.....	60
Контрольні запитання з теми 4.....	62
Тема 5. Електричні кола однофазного змінного струму.....	63
5.1. Електричне коло з резистивним елементом.....	63
5.2. Електричне коло з ідеальною індуктивною котушкою.....	65
5.3. Електричне коло з ідеальним конденсатором.....	69
5.4. Електричне коло з реальною індуктивною котушкою.....	71
5.5. Потужність індуктивної котушки.....	73
5.6. Послідовне з'єднання резистора і ідеального конденсатора.....	76

5.7. Послідовне з'єднання індуктивної котушки і конденсатора.....	78
5.8. Коло змінного струму з паралельно з'єднаними приймачами...	80
5.9. Активні й реактивні складові провідності й струму.....	82
5.10. Підвищення коефіцієнта потужності в колах змінного струму	85
Контрольні запитання з теми 5.....	87
Задачі до теми 5 і приклади їхнього розв'язання.....	88
Тема 6. Трифазні кола електричного струму.....	95
6.1. Основні поняття і визначення.....	95
6.2. Схеми з'єднання обмоток трифазного генератора.....	97
6.3. З'єднання трифазних споживачів «зіркою».....	98
6.4. З'єднання трифазних споживачів «трикутником».....	100
6.5. Трифазні чотирипровідні електричні кола.....	101
6.6. Активна, реактивна і повна потужність трифазного електрич-	
ного кола.....	104
6.7. Порівняння умов роботи приймача при з'єднанні його фаз	
«трикутником» і «зіркою».....	105
Контрольні запитання з теми 6.....	106
Задачі до теми 6 і приклади їхнього розв'язання.....	106
Розділ 3. Електричні вимірювання.....	111
Тема 7. Електровимірювальні прилади.....	111
7.1. Основні поняття.....	111
7.2. Класифікація електровимірювальних приладів.....	112
7.3. Загальні технічні характеристики електровимірювальних приладів..	113
7.4. Прилади магнітоелектричної системи.....	114
7.5. Прилади електромагнітної системи.....	116
7.6. Електродинамічні і феродинамічні прилади.....	117
7.7. Вимірювальні перетворювачі.....	118
7.8. Електронні аналогові електровимірювальні прилади.....	122
7.9. Цифрові електровимірювальні прилади.....	123
Контрольні запитання з теми 7.....	123
Тема 8. Методи електричних вимірювань.....	124
8.1. Похибки і помилки вимірювань.....	124
8.2. Класифікація методів електричних вимірювань.....	127
8.3. Вимірювання струму і напруги.....	127
8.4. Вимірювання потужності і електричної енергії.....	131
8.5. Вимірювання неелектричних величин.....	136
Контрольні запитання з теми 8.....	137
Задачі до тем 7 і 8 і приклади їхнього розв'язання.....	137
ЗМІСТОВИЙ МОДУЛЬ 2. ТРАНСФОРМАТОРИ І ЕЛЕКТРИЧНІ	
МАШИНИ.....	140
Розділ 4. Трансформатори.....	142
Тема 9. Трансформатори.....	142
9.1. Загальні відомості про трансформатори.....	142
9.2. Однофазний трансформатор.....	143

9.3. Паспортні дані й зовнішня характеристика трансформатора.....	146
9.4. Трифазні трансформатори.....	149
9.5. Автотрансформатори.....	150
9.6. Вимірювальні трансформатори.....	151
Контрольні запитання з теми 9.....	152
Задачі до теми 9 і приклади їхнього розв'язання.....	153
Розділ 5. Електричні машини.....	156
Тема 10. Електричні машини постійного струму.....	156
10.1. Будова машини постійного струму.....	156
10.2. Принцип дії генератора постійного струму.....	158
10.3. Втрати енергії і ККД.....	159
10.4. Схеми включення обмоток збудження.....	160
10.5. Номінальні параметри і характеристики машин постійного струму.....	160
10.6. Електродвигуни постійного струму.....	161
Контрольні запитання з теми 10.....	166
Задачі до теми 10 і приклади їхнього розв'язання.....	167
Тема 11. Асинхронні електричні машини.....	169
11.1. Будова і принцип дії трифазної асинхронної машини.....	169
11.2. ЕРС статора і ротора.....	172
11.3. Рівняння електричної рівноваги статора і ротора.....	173
11.4. Схема заміщення асинхронного двигуна.....	175
11.5. Втрати і ККД асинхронного двигуна.....	177
11.6. Обертний момент асинхронного двигуна.....	178
11.7. Робочі характеристики асинхронних двигунів.....	180
11.8. Пуск асинхронних двигунів.....	181
11.9. Механічні характеристики асинхронного двигуна в гальмових режимах.....	184
11.10. Однофазний асинхронний двигун.....	187
Контрольні запитання з теми 11.....	189
Задачі до теми 11 і приклади їхнього розв'язання.....	190
Тема 12. Синхронні електричні машини.....	193
12.1. Будова синхронних машин.....	193
12.2. Синхронний генератор.....	195
12.3. Зовнішня характеристика синхронного генератора.....	197
12.4. Електромагнітний момент синхронного генератора.....	197
12.5. Паралельна робота синхронної машини з електричною мережею.....	199
12.6. Синхронний двигун.....	202
12.7. Пуск синхронного двигуна.....	203
12.8. Регулювання коефіцієнта потужності синхронного двигуна... ..	205
12.9. Робочі характеристики синхронного двигуна.....	207
12.10. Порівняння синхронних і асинхронних двигунів.....	207
Контрольні запитання з теми 12.....	208

ЗМІСТОВИЙ МОДУЛЬ 3. ОСНОВИ ЕЛЕКТРОНИКИ, ЕЛЕКТРО-ПРИВОД ТА ЕЛЕКТРООБЛАДНАННЯ ДЛЯ БУДІВНИЦТВА.....	209
Розділ 6. Промислова електроніка.....	211
Тема 13. Основи промислової електроніки.....	211
13.1. Елементи напівпровідникової техніки.....	211
13.2. Напівпровідникові випрямлячі.....	221
13.3. Інвертори.....	234
13.4. Згладжуючі фільтри.....	236
13.5. Підсилювачі.....	238
Контрольні запитання з теми 13.....	241
Розділ 7. Електропривод.....	242
Тема 14. Загальні відомості про електропривод.....	242
14.1. Основні поняття.....	242
14.2. Механіка електроприводу.....	244
14.3. Рівняння руху електроприводу.....	246
14.4. Механічні характеристики виробничих механізмів і електро- двигунів.....	248
14.5. Вибір електродвигуна.....	252
Контрольні запитання з теми 14.....	256
Задачі до теми 14 і приклади їхнього розв'язання.....	257
Тема 15. Регулювання швидкості електроприводів.....	262
15.1. Основні показники регулювання кутової швидкості електро- приводів.....	262
15.2. Регулювання кутової швидкості двигуна постійного струму з незалежним збудженням.....	263
15.3. Регулювання кутової швидкості асинхронних двигунів.....	269
15.4. Регульований привод змінного струму з вентильним двигуном... Контрольні запитання з теми 15.....	274 277
Розділ 8. Електрообладнання будівельних майданчиків, підпри- ємств і будівель.....	279
Тема 16. Електрообладнання зварювальних установок.....	279
16.1. Види електричного зварювання.....	279
16.2. Основні вимоги до джерел живлення зварювальної дуги.....	280
16.3. Зварювальні перетворювачі постійного струму.....	281
16.4. Зварювальні апарати змінного струму.....	283
16.5. Установки контактного зварювання.....	286
Контрольні питання з теми 16.....	287
Тема 17. Електрообладнання вантажопідійомних машин.....	288
17.1. Загальні відомості про вантажопідійомні машини.....	288
17.2. Електродвигуни вантажопідійомних машин.....	289
17.3. Елементи апаратури керування.....	291
17.4. Електричний привод будівельних кранів.....	303
Контрольні запитання з теми 17.....	308

Тема 18. Електричні ручні машини	309
18.1. Загальні відомості про електричні ручні машини.....	309
18.2. Ізоляція електричних ручних машин.....	309
18.3. Приклади конструкцій електричних ручних машин.....	311
18.4. Експлуатація і ремонт електричних ручних машин.....	314
Контрольні запитання з теми 18.....	315
Тема 19. Електропрогрів бетону і ґрунту	316
19.1. Електропрогрів бетону.....	316
19.2. Електропрогрів ґрунту.....	320
19.3. Техніка безпеки при електропрогріві.....	322
Контрольні запитання з теми 19.....	322
Тема 20. Електроосвітлювальні установки	323
20.1. Загальні відомості.....	323
20.2. Джерела світла і освітлювальна арматура.....	324
20.3. Обладнання електричного освітлення на будівельних майдан- чиках.....	327
20.4. Норми освітленості, спрощені способи розрахунку освітлю- вальних установок.....	329
Контрольні запитання з теми 20.....	331
Тема 21. Електрообладнання інженерних систем будівель	332
21.1. Загальні відомості.....	332
21.2. Системи вентиляції і кондиціонування.....	333
21.3. Ліфти і ескалатори.....	334
21.4. Електрообладнання систем водопостачання.....	336
21.5. Електричне опалення.....	338
Контрольні запитання з теми 21.....	339
Тема 22. Електробезпека в будівництві	340
22.1. Загальні відомості.....	340
22.2. Дія електричного струму на організм людини.....	340
22.3. Класифікація умов роботи за ступенем електробезпеки.....	342
22.4. Заходи щодо забезпечення безпечного ведення робіт з елект- роустановками.....	343
22.5. Захисне заземлення і занулення.....	344
Контрольні запитання з теми 22.....	347
Список літератури	348
Список скорочень	351
Предметний покажчик	352
Додатки	357

ПЕРЕДМОВА

Вивчення дисципліни «Електротехніка у будівництві» передбачено навчальними планами будівельних спеціальностей вузів. Як правило, її вивчають на 3-му курсі, базуючись на знаннях вищої математики, фізики і теоретичної механіки.

Відповідно до програми дисципліни матеріал курсу розділено на три модулі, в рамках яких він згрупований за розділами. У середині розділів виклад ведеться за логічно взаємозалежними темами, які завершуються висновками і запитаннями для самостійної перевірки засвоєння матеріалу і підготовки до заліку з дисципліни. Практична частина представлена задачами, які розміщені наприкінці відповідних тем і розділів. Кожна задача ілюструється прикладом розв'язання і містить варіанти вихідних даних для самостійного розв'язання.

У першому змістовому модулі розглянуто теоретичні основи електротехніки, зокрема електричні кола постійного і змінного струму, а також електричні вимірювання. Другий змістовий модуль розкриває принципи роботи трансформаторів і електричних машин, характерні режими їхньої роботи. Третій змістовий модуль містить відомості з основ електроніки і електропривода, опис особливостей електрообладнання будівельних майданчиків, підприємств будівельної індустрії та інженерних систем будівель, а також матеріал присвячений питанням електробезпеки.

Посібник підготовлений авторським колективом у складі:

- доктор економічних наук, професор Ачкасов А.Є.- теми 17, 18, 19, 22;
- доктор економічних наук, професор Лушкін В.А. - теми 6, 9, 12, 16, 18, 20;
- кандидат технічних наук, доцент Охріменко В.М. - теми 3, 5, 10, 11, 13, 16, 21, загальне редагування;
- кандидат технічних наук, доцент Кузнецов А.І. - теми 6, 7, 8;
- кандидат технічних наук, доцент Чернявська М.В. - теми 1, 9, 10;
- старший викладач Воронкова Т.Б. - теми 1, 2, 4, 7, 8, 14 15.

Автори висловлюють щире подяку рецензентам, доктору технічних наук, академіку АТН України Ю.Г. Куцану, доктору технічних наук, професору, директору інституту енергозбереження та енергоменеджменту НТУ України "КПІ" А.В. Праховнику, заслуженому винахіднику України, доктору технічних наук, професору кафедри енергоустановок космічних літальних апаратів Національного аерокосмічного університету ім. М.Є. Жуковського (ХАІ) О.І. Яковлеву за корисні зауваження і поради щодо змісту та методики викладання матеріалу посібника.

ЗМІСТОВИЙ МОДУЛЬ 1

ЕЛЕКТРИЧНІ КОЛА

У першому змістовому модулі курсу «Електротехніка у будівництві» розглянуто основні елементи теорії електричних кіл. Модуль розбитий на три логічно пов'язані розділи, взаємозв'язок яких показаний на рис. М.1.1. Основну увагу приділено вивченню кіл змінного струму, тому що процеси в них більш складні, ніж у колах постійного струму. У третьому розділі розглянуто питання електричних вимірювань, які логічно пов'язані з електричними колами як постійного, так і змінного струму.



Рис. М.1.1. Взаємозв'язок розділів змістового модуля «Електричні кола»

ТЕМА 1

ОСНОВНІ ТЕРМІНИ Й ПОНЯТТЯ

Ключові поняття: електричне коло, ділянка кола, джерело електричної енергії, приймач електричної енергії, електричний струм, ЕРС, напруга, постійний струм, змінний струм, лінійний елемент, нелінійний елемент, нерозгалужене коло, розгалужене коло, опір, індуктивність, ємність, взаєміндуктивність, пасивний елемент, активний елемент, схема з'єднання кола, схема заміщення кола, активний і пасивний двополюсники, послідовне і паралельне з'єднання, контур, вузол, гілка.

1.1. Електричне коло і його елементи

Електричним колом називають сукупність пристроїв, що призначені для генерування, передачі, перетворення і використання електричної енергії. Окремі пристрої, що входять до електричного кола, називають *елементами електричного кола*. Частину електричного кола, що містить виділені в ній елементи, називають *ділянкою кола*.

Елементи кола, що призначені для генерування електричної енергії, називають *джерелами живлення* або *джерелами електричної енергії*, а елементи, що використовують електричну енергію, - *приймачами електричної енергії*.

У джерелах живлення електрична енергія створюється за рахунок перетворення з інших видів енергії: механічної, хімічної, теплової, світлової та ін.

У приймачах, навпаки, електрична енергія перетворюється в інші види енергії: механічну в електричних двигунах, хімічну в акумуляторах, теплову в різних нагрівальних приладах і печах, променисту в освітлювальних приладах та ін.

Передавальні елементи кола є ланкою, що зв'язує джерела й приймачі електричної енергії. Крім електричних проводів до цієї групи належать також прилади контролю й керування, перетворюючі пристрої (трансформатори, випрямлячі та ін.).

1.2. Класифікація електричних струмів, ЕРС і напруг

Коли електричне коло замкнуте і в ньому є джерело електричної енергії, то має місце направлений рух носіїв електричних зарядів - **електричний струм**.

Величина або сила електричного струму обумовлюється кількістю електрики (зарядом), що проходить через поперечний переріз провідника в одиницю часу.

Електричний струм, величина й напрямок якого залишаються незмінними, називають **постійним струмом** (рис. 1.1,а) і позначають прописною літерою I . Якщо за t секунд пройшло q кулонів електричного заряду, то сила постійного струму

$$I = q/t. \quad (1.1)$$

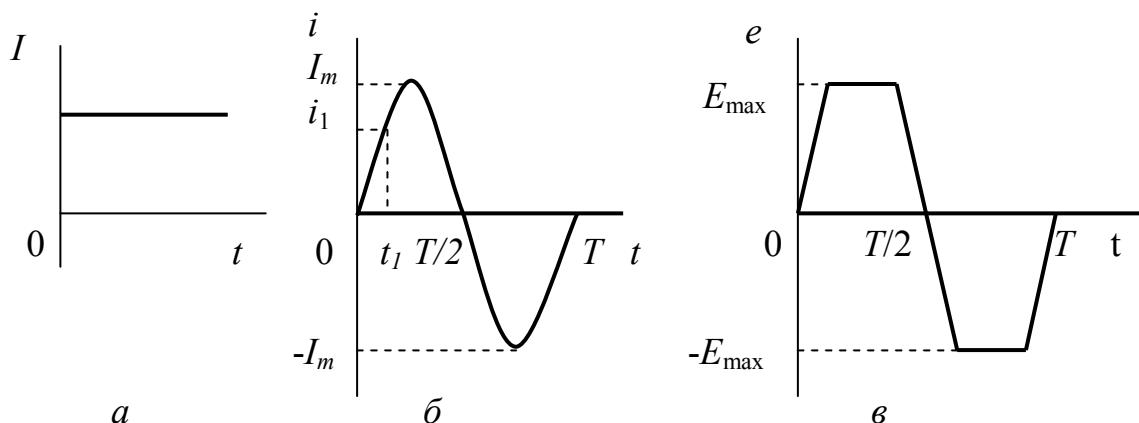


Рис. 1.1 - Форми кривих постійних і періодичних струмів (а і б) і ЕРС (в)

Електричний струм, величина або напрямок якого не залишаються постійними, називають **змінним струмом**. Значення змінного струму у певний момент часу називають миттєвими значеннями й позначають малою літерою i . Струм i пов'язаний із зарядом q і часом t співвідношенням

$$i = dq/ dt . \quad (1.2)$$

Основною електричною одиницею в Міжнародній системі одиниць виміру (SI) є одиниця сили струму ампер (А).

Форми кривих струмів, що змінюються, досить різноманітні. Домінуюче значення серед них мають періодичні струми. **Періодичним** називають такий струм, миттєві значення якого повторюються через рівні проміжки часу. Найменший проміжок часу, після закінчення якого миттєві значення струму повто-

рюються, називають **періодом** і позначають літерою T . Число періодів в одну секунду називають **частотою** періодичного струму. Частоту вимірюють у Герцах (Гц) і позначають літерою f . Частота й період зв'язані співвідношенням

$$f = 1/T. \quad (1.3)$$

Струм, що змінюється за гармонійним законом, називають **синусоїдальним струмом** (рис. 1.1, б). Синусоїдальний струм промислової частоти 50 Гц прийнято називати **змінним струмом**.

Якщо закон зміни миттєвих значень періодичного струму (напруги) відмінний від гармонійного, то такий струм (напругу) називають **несинусоїдальним** (рис. 1.1, в).

Найбільше значення синусоїдального струму називають **амплітудою** і позначають I_m . Найбільше значення несинусоїдального струму позначають i_{max} .

Постійні або змінні струми виникають в електричних колах під **впливом електрорушійних сил** (ЕРС), збуджуваних у джерелах у процесі перетворення якого-небудь виду енергії в електричну енергію. ЕРС і напруги (за аналогією із струмами) відповідно до закону зміни їхніх миттєвих значень називають постійними, змінними, синусоїдальними й несинусоїдальними. Постійні ЕРС і напруги позначають прописними літерами E і U , змінні ЕРС і напруги - малими літерами e і u . *Одиницею виміру ЕРС і напруги є вольт (В).*

1.3. Елементи електричних кіл і їхні графічні зображення

Електричне коло, в залежності від характеру протікаючого в ньому струму називають: «**електричне коло постійного струму**» або «**електричне коло змінного струму**». Якщо потрібне уточнення, тоді говорять «**електричне коло синусоїдального (несинусоїдального) струму**».

Елементи кіл і складені з них електричні кола підрозділяють ще за виглядом характеристик, що виражають, наприклад, залежність їхнього струму від прикладеної напруги $I(U)$ – ампер-вольтна характеристика (АВХ). Приклади таких характеристик наведені на рис. 1.2. Елементи кіл, АВХ яких є лінійними, називають **лінійними елементами**. Нелінійні характеристики мають **нелінійні елементи**.

Електричні кола постійного і змінного струмів розрізняють також за способом з'єднання їхніх елементів – **нерозгалужені й розгалужені кола**, за числом джерел електричної енергії – кола з одним і декількома джерелами електричної енергії.

Електричне коло, що складається з лінійних елементів, називають **лінійним колом**. Електричне коло, до якого входить хоча би один нелінійний елемент, називають **нелінійним колом** (рис. 1.2). Приймачі електричної енергії як елементи електричного кола мають властивості поглинати електричну енергію з кола й перетворювати її на інші види енергії (**необоротний процес**), створювати свої магнітні й електричні поля, енергії яких можуть накопичуватися і за певних умов повертатися назад у коло (**оборотний процес**). Щоб характеризувати ці властивості, вводять поняття параметрів елемента. У числі параметрів елементів кола розрізняють опір, індуктивність і ємність.

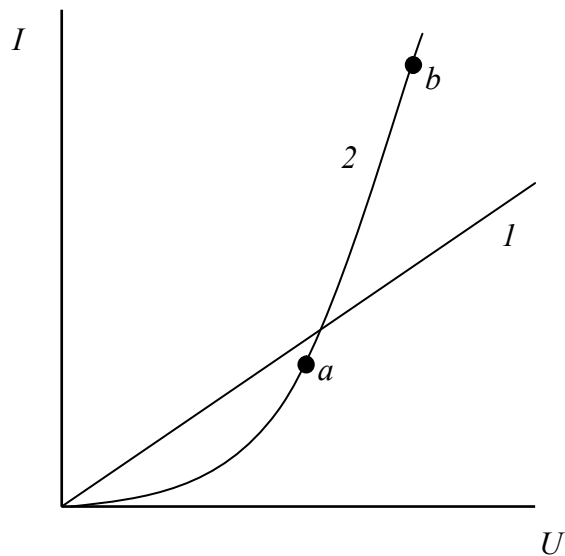


Рис.1.2 - Характеристики елементів кола: 1 – лінійна, 2 -нелінійна

Опір (R) – параметр, що характеризує властивість елемента поглинати енергію з електричного кола й перетворювати її на інші види енергії (теплову або світлову).

Відомо, що потужність (P, p) перетворення електричної енергії пропорційна квадрату струму (I^2, i^2), тому величина цього параметра - опір - визначається відношенням $R = P/I^2$ для постійного струму і $R = p/i^2$ для змінного струму. *Одиницею виміру опору є Ом.*

Властивість елемента кола створювати власне магнітне поле

(поле самоіндукції), коли в ньому є електричний струм, характеризують параметром індуктивності L . **Індуктивність** є коефіцієнтом пропорційності між струмом (I, i) і потокозчепленням (ψ, ψ_t) даного пристрою: $\psi = L \cdot I$ або $\psi_t = L \cdot i$. Його називають коефіцієнтом самоіндукції і вимірюють у Генрі (Г).

Параметр **взаємної індуктивності** M характеризує властивість першого елемента із струмом i_1 створювати магнітне поле, що частково зчіплюється з витками w_2 другого елемента. Потокозчеплення ψ_{21} другого елемента (перший індекс), що обумовлене струмом i_1 першого елемента (другий індекс), називають **потокозчепленням взаємоіндукції** другого елемента. Параметр взаємної індуктивності M є коефіцієнтом пропорційності між струмом першого елемента й створеним цим струмом потокозчепленням другого елемента: $\psi_{21} = M \cdot I_1$ або $\psi_{2t} = M \cdot i_1$.

Ємність (C) – параметр, що характеризує властивість елемента накопичувати заряди або збуджувати ними електричне поле. Цей параметр є коефіцієнтом пропорційності між напругою і зарядом елемента: $q = C \cdot U$.

У загальному випадку **будь-який реальний пристрій** має усі три параметри R, L і C .

Основну властивість джерела електричної енергії - здатність створювати й підтримувати різницю потенціалів на окремих ділянках кола, а також збуджувати й підтримувати електричний струм у замкнутому колі - характеризують його **електрорушійною силою** (ЕРС).

Проходження струму по джерелу супроводжується втратою енергії усередині джерела на нагрів. Ці втрати характеризують **параметром опору** R . Тому параметр опору поряд з ЕРС є важливим параметром джерела. У деяких випадках у джерелах змінного струму враховують також параметр індуктивності L .

Елементи кола, роботу яких можна описати за допомогою параметрів R, L, M і C , називають **пасивними**. Термін "пасивний" підкреслює, що такі елементи не можуть виконати своє призначення без впливу на них сторонніх джерел.

Елементи кола, для опису роботи яких, крім пасивних параметрів, необхідно вводити ЕРС або струм, називають **активними**. До активних елементів відносять джерела електричної енергії і деякі приймачі (акумулятори при зарядці, двигуни постійного струму та ін.).

Елементи кола, які мають тільки один параметр, називаються **ідеальними**. Ідеальне джерело ЕРС має тільки параметр E (величина ЕРС - рис. 1.3, а), ідеальне джерело струму – тільки параметр J (величина струму – рис. 1.3, в), ідеальний індуктивний елемент (ідеальна індуктивна котушка) - тільки параметр L (рис. 1.3, г), ідеальний ємнісний елемент (ідеальний конденсатор) - тільки параметр C (рис. 1.3, д); тільки один параметр опору R має резистивний елемент (резистор) (рис. 1.3, е).

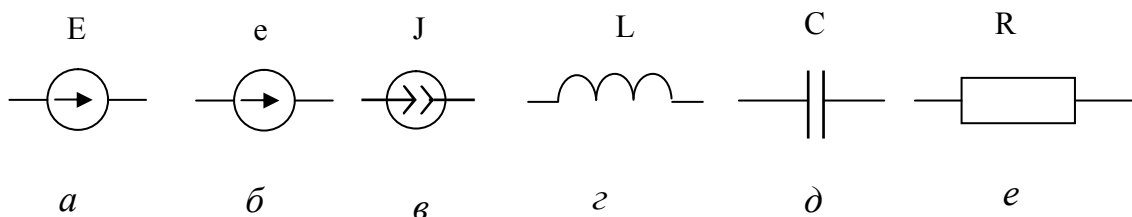


Рис. 1.3 - Графічні позначення ідеальних елементів: джерело ЕРС постійного струму (а), джерело ЕРС змінного струму (б), джерело струму (в), індуктивність (г), ємність (д), резистор (е)

Джерела електричної енергії розділяють на джерела ЕРС і джерела струму, схеми заміщення яких показані на рис. 1.4. Властивості джерела електричної енергії визначаються його вольт-амперною (зовнішньою) характеристикою – залежністю вихідної напруги від струму $U(I)$.

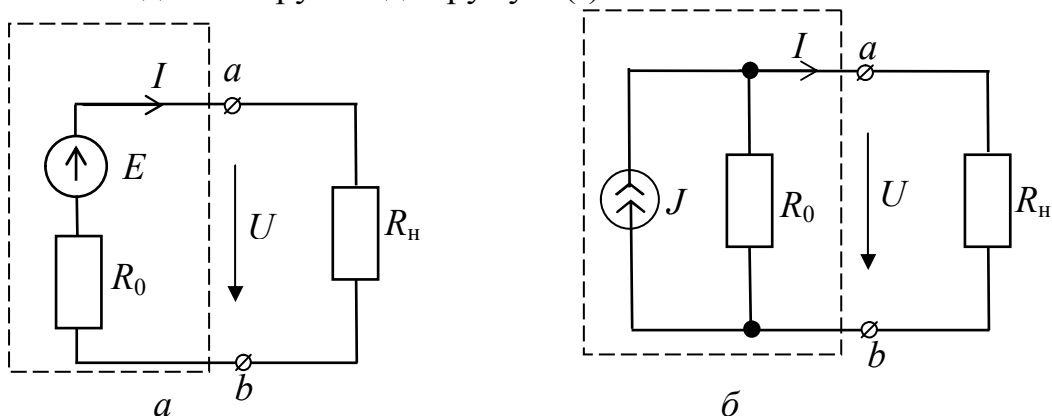


Рис.1.4 - Схеми заміщення джерел ЕРС (а) і струму (б)

Якщо в схемі кола внутрішній опір джерела електричної енергії R_0 малий у порівнянні з опором навантаження R_n , то справедлива нерівність $R_0 I \ll E$. У цьому випадку напруга між виводами джерела електричної енергії практично не залежить від струму, тобто $U = E = \text{const}$, і джерело називається **джерелом ЕРС**.

Джерело з малим внутрішнім опором можна замінити ідеалізованою моделлю в якій $R_0 = 0$. Таке джерело називають **ідеальним джерелом ЕРС** з одним параметром $E = U$. Напруга на вихідних затискачах ідеального джерела ЕРС не залежить від струму, а його зовнішня характеристика має вигляд прямої $U = E = \text{const}$ (рис. 1.5,а).

Якщо в схемі кола внутрішній опір джерела електричної енергії на багато разів більше опору навантаження ($R_0 \gg R_n$), то його струм $I = E/(R_0 + R_n) \approx E/R_0 = J = \text{const}$ не залежить від опору навантаження і джерело називається **джерелом струму**.

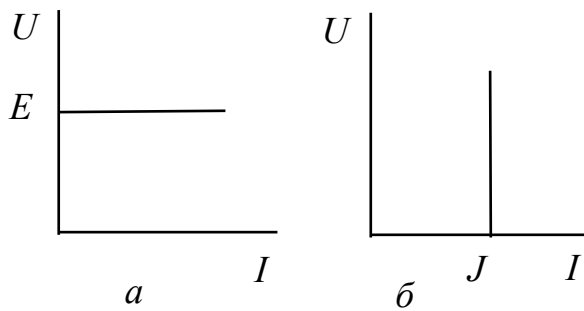


Рис.1.5 - Зовнішні характеристики:
 а - ідеального джерела ЕРС;
 б - ідеального джерела струму.

Джерело з великим внутрішнім опором можна замінити ідеалізованою моделлю, в якій $R_0 = \infty$ і $E = \infty$ і для якої є справедливим вираз $E/R_0 = J$. Таке джерело називають **ідеальним джерелом струму** з одним параметром J . Струм джерела струму не залежить від напруги на його вихідних затискачах, а його зовнішня характеристика має вигляд прямої $I=J = \text{const}$ (рис. 1.5,б).

Графічне зображення електричного кола за допомогою умовних позначень його елементів називають **схемою кола**.

На рис. 1.6, як приклад, наведено схему найпростішого електричного кола постійного струму, що складається з джерела (аккумуляторної батареї) E з внутрішнім опором R_0 , амперметра PA , вимикача S і приймача (електричної лампочки HL).

Вивчення властивостей електричного кола і його елементів з урахуванням усіх параметрів є досить складним, тому для спрощення аналізу реальне коло представляють його моделлю - набором ідеальних елементів.

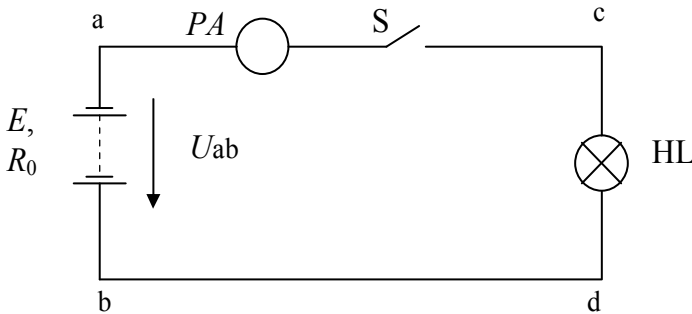


Рис.1.6 - Схема найпростішого електричного кола

Графічне зображення кола, в якому замість реальних представлени ідеальні елементи, називають **схемою заміщення кола**.

Ідеальні елементи в схемі заміщення дозволяють врахувати параметри, які суттєво впливають на фізичні процеси в колі. Параметри реальних елементів, що не мають істотного впливу на фізичні процеси, при цьому не враховують.

Той самий елемент кола може бути зображений різними схемами заміщення залежно від того, для яких цілей ця схема призначена. Наприклад, індуктивну котушку в колі постійного струму для врахування її нагріву подають у схемі заміщення тільки одним резистивним елементом. Але при вивченні фізичних процесів у котушці із змінними струмами її представляють послідовно з'єднаними резистивним і індуктивним ідеальними елементами. А у випадку роботи котушки в колах високої частоти для неї складають схему заміщення з резистивного, індуктивного і ємнісного елементів.

При розробці проектної і конструкторської документації на електрообладнання застосовують електричні схеми, які, на відміну від схем заміщення, виконують в строгій відповідності до чинних на даний момент часу стандартів,

наприклад, стандартів ЄСКД – Єдиної системи конструкторської документації. При розробці стандартів на правила оформлення графічних документів ураховують рекомендації міжнародних організацій: ІСО (Міжнародна організація із стандартизації), МЕК (Міжнародна електротехнічна комісія) та ін. Розрізняють **схеми електричні принципові, структурні, функціональні, монтажні**.

Як приклад на рис. 1.7 показана схема заміщення кола змінного струму, що складається з джерела змінної ЕРС e , опору проводів лінії електричного живлення $R_{\text{л}}$ і паралельно з'єднаних споживачів електричної енергії (конденсатор C і освітлювальна лампа HL).

Частина кола, що має два полюси, називають двополюсником. Розрізняють **двополюсники активні** (що містять джерела) і **пасивні** (що не містять джерела).

З'єднання елементів кола, при якому по всіх ділянках проходить той самий струм, називають **послідовним з'єднанням**. Будь-який замкнутий шлях, що проходить по декількох послідовно з'єднаних ділянках, називають **контуром електричного кола**.

Ділянку кола, уздовж якої в будь-який момент часу струм має одне і теж значення, називають **гілкою**, а місце з'єднання трьох або більшого числа гілок - **вузлом**.

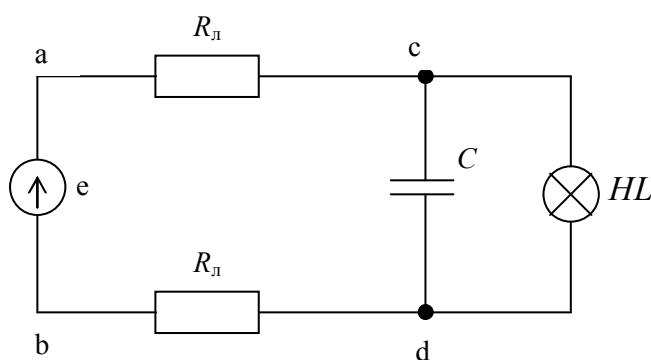


Рис.1.7 - Схема кола змінного струму

З'єднання, при якому дві або більше гілки приєднані до однієї пари вузлів, називають **паралельним з'єднанням**. Електричне коло з паралельними і послідовними гілками називають **розгалуженим колом**. Розгалужене коло – це багатоконтурне коло. Коло, показане на рис. 1.6 – одноконтурне, а коло на рис.1.7 – двоконтурне.

Для однозначності опису процесів, що відбуваються в якому-небудь елементі кола, необхідно знати не тільки величини його струму й напруги, але також їхні напрямки в певний момент часу. Один з двох можливих напрямків струму в елементі беруть за основний і вказують його на схемі стрілкою. **Стрілки**, поставлені на схемах, **вказують позитивні напрямки** ЕРС, напруг і струмів. Якщо значення цих величин від'ємні, то їхні дійсні напрямки протилежні вказаним на схемі стрілками.

1.4. Загальні правила виконання електричних схем

Схеми застосовують при вивченні принципу роботи машин, механізмів і апаратів при їхньому налагодженні, монтажі й ремонті, для з'ясування зв'язку між окремими складовими частинами обладнання без уточнення особливостей їхньої конструкції.

Правила виконання і оформлення схем регламентуються стандартами ЄСКД. Види й типи схем, загальні вимоги до їхнього виконання повинні відповідати ДЕРЖСТАНДАРТУ 2.701-84 "ЄСКД. Схеми. Види й типи. Загальні ви-

моги до виконання", правила виконання всіх типів електричних схем - ДЕРЖСТАНДАРТ 2.702-75 "ЄСКД. Правила виконання електричних схем."

Схеми входять до комплекта конструкторської документації і містять разом з іншими документами необхідні дані для проектування, виготовлення, зборки, регулювання і експлуатації обладнання.

Для зображення електричних елементів і пристроїв і скорочених відомостей про них на схемах застосовують графічні й літерно-цифрові позначення. Види умовних графічних позначень і правила їхньої побудови встановлені групою стандартів ЄСКД.

Літерно-цифрові позначення і правила їхньої побудови регламентовані ДЕРЖСТАНДАРТ 2.710-81. Для позначень використовують прописні літери латинського алфавіту й арабські цифри. Позначення записують у вигляді послідовності літер і цифр в один рядок без пробілів. У таблиці 1.1 як приклад наведено літерні позначення деяких елементів електричних схем.

Слід відзначити, що стандарти ЄСКД поширюються на електричні схеми, що входять до складу проектно-конструкторської документації. У навчальній літературі з електротехніки на схемах заміщення застосовують традиційно прийняті багатьма авторами позначення, які можуть дещо відрізнитися від вимог ЄСКД. Наприклад, на схемах заміщення джерело ЕРС позначається літерою латинського алфавіту *E*, а відповідно до ЄСКД його позначають буквою *G* (табл. 1.1). При подальшому викладі матеріалу в процесі розгляду фізичних процесів і принципу роботи окремих електротехнічних пристроїв, машин і апаратів будуть наведені їхні графічні й літерні позначення на електричних схемах.

Більш докладно з правилами виконання електричних схем можна ознайомитися у спеціальній літературі [2.17].

Таблиця 1.1 - Літерні позначення основних елементів електричних схем

Перша буква коду (обов'язкова)	Група видів елементів	Приклади видів елементів	Двобуквенний код
C	Конденсатори		
G	Генератори, джерела живлення	Батарея	GB
K	Реле, контактори, пускачі	Реле струмове Реле напруги	KA KV
L	Котушки індуктивності, дроселі	Дросель люмінесцентного освітлення	LL
M	Двигуни постійного і змінного струму		
P	Прилади, вимірювальне обладнання	Амперметр Вольтметр Ватметр	PA PV PW
R	Резистори		
S	Пристрої комутаційні	Вимикач або перемикач Вимикач автоматичний	SA SF
T	Трансформатори, автотрансформатори	Трансформатор струму Трансформатор напруги	TA TV

Контрольні запитання з теми 1

1. Що розуміють під електричним колом? Під ділянкою кола?
2. Назвіть основні елементи електричного кола і їхнє призначення.
3. Що розуміють під електричним струмом?
4. Які існують види електричного струму? В яких одиницях його вимірюють?
5. Що розуміють під ЕРС? В яких одиницях її вимірюють?
6. Чим відрізняється амплітудне значення змінного струму від максимального значення змінного струму? Чим відрізняються самі струми в цьому випадку?
7. Наведіть приклад нерозгалуженого (розгалуженого) електричного кола.
8. У чому відмінність нелінійного електричного кола від лінійного?
9. Дайте визначення такого параметра електричного кола як опір. В яких одиницях вимірюють опір?
10. Дайте визначення такого параметра електричного кола як індуктивність. В яких одиницях вимірюють індуктивність?
11. Дайте визначення такого параметра електричного кола як взаємодіючі індуктивності.
12. Дайте визначення такого параметра електричного кола як ємність. В яких одиницях вимірюють ємність?
13. Поясніть розходження між активними й пасивними елементами електричного кола.
14. Що розуміють під ідеальним елементом електричного кола? Приведіть приклади?
15. Що розуміють під контуром електричного кола?
16. Що розуміють під вузлом електричного кола?
17. Які напрямки струмів і ЕРС прийняті за позитивні?

ЕЛЕКТРИЧНІ КОЛА ПОСТІЙНОГО СТРУМУ

ТЕМА 2

ФІЗИЧНІ ПРОЦЕСИ В КОЛАХ ПОСТІЙНОГО СТРУМУ

Ключові поняття: закон Ома, режими джерела постійного струму (номінальний, холостого ходу, короткого замикання), струм короткого замикання, робота електричного струму, потужність електричного струму (повна, корисна, втрат), коефіцієнт корисної дії, послідовне (паралельне) з'єднання елементів, перший закон Кірхгофа, другий закон Кірхгофа, незалежний контур.

2.1. Закон Ома

У 1827 р. німецький вчений Ом експериментально вивів закон, що встановлює залежність між трьома основними параметрами електричного кола: струмом, напругою й опором.

Закон Ома для всього кола формулюється в такий спосіб: *сила струму в електричному колі прямо пропорційна величині ЕРС джерела й зворотно пропорційна повному опору кола:*

$$I = \frac{E}{R_{\Pi}}, \quad (2.1)$$

де I - сила струму в колі, А; E - ЕРС джерела, В; R_{Π} - повний опір кола, Ом.

Повний опір кола R_{Π} являє собою суму опорів навантаження $R_{\text{Н}}$ (зовнішній опір кола), опору лінії $R_{\text{Л}}$ (опір сполучних проводів) і внутрішнього опору джерела R_0 :

$$R_{\Pi} = R_{\text{Н}} + R_{\text{Л}} + R_0. \quad (2.2)$$

Для окремої ділянки кола закон Ома має вигляд

$$I = \frac{U}{R} \quad (2.3)$$

де: I - сила струму на ділянці кола, А; U - напруга (падіння напруги) на даній ділянці, В; R - електричний опір ділянки кола, Ом.

2.2. Режими роботи джерела постійного струму

Розглянемо характер зміни напруги на затискачах a і b джерела постійної напруги E з внутрішнім опором R_0 залежно від величини навантаження $R_{\text{Н}}$ (рис. 2.1).

Внаслідок того що ЕРС джерела (рис. 2.1) дорівнює сумі падінь напруги на зовнішньому $R_{\text{Н}}$ і внутрішньому R_0 опорах ділянки кола

$$E = U + U_0, \quad (2.4)$$

можемо записати

$$U = E - U_0. \quad (2.5)$$

Користуючись законом Ома, величину внутрішнього падіння напруги на джерелі можемо виразити через струм навантаження I_H і внутрішній опір джерела R_0 :

$$U_0 = I_H \cdot R_0. \quad (2.6)$$

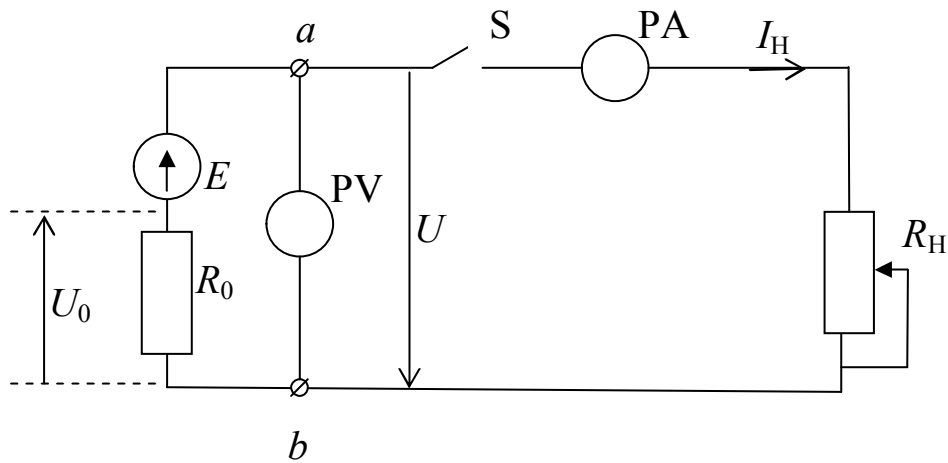


Рис.2.1 - Найпростіше коло постійного струму

Після підстановки (2.6) у (2.5) матимемо

$$U = E - I_H \cdot R_0. \quad (2.7)$$

Вираз (2.7) визначає залежність напруги на затискачах джерела від навантаження, за умови, що величини ЕРС і внутрішнього опору джерела постійні.

2.2.1. Режим холостого ходу. Під режимом холостого ходу розуміють роботу джерела електричної енергії при відключеному навантаженні (рис. 2.1, ключ S розімкнутий). Тоді опір зовнішнього кола нескінченно великий ($R_H = \infty$) і струм у колі дорівнює нулю:

$$I_H = \frac{E}{R_H + R_0} = \frac{E}{\infty + R_0} = 0. \quad (2.8)$$

При цьому напруга холостого ходу U_{xx} на затискачах джерела буде:

$$U_{xx} = E - 0 \cdot R_0 = E, \quad (2.9)$$

тобто напруга холостого ходу дорівнює ЕРС джерела.

2.2.2. Режим короткого замикання. Режим короткого замикання джерела створюється, коли величина опору навантаження практично дорівнює нулю (рис. 2.1, реостат R_H у верхньому положенні). Тоді опір електричного кола мінімальний і дорівнює опору сполучних проводів (на схемі заміщення рис. 2.1 не показані), а струм у колі досягає максимального значення, називаного **струмом короткого замикання**:

$$I_{K3} = \frac{E}{0 + R_0} = \frac{E}{R_0}. \quad (2.10)$$

При цьому напруга на затискачах джерела дорівнюватиме нулю:

$$U = I \cdot R_H = I \cdot 0 = 0, \quad (2.11)$$

а падіння напруги усередині джерела дорівнюватиме його ЕРС:

$$E = U + U_0 = 0 + U_0 = U_0. \quad (2.12)$$

Слід підкреслити, що режим короткого замикання для більшості джерел електричної енергії є неприпустимим (аварійним), тому що внутрішній опір джерел звичайно малий і струм короткого замикання досягає значних величин. Це приводить до виходу з ладу джерела електричної енергії.

2.2.3. Режим роботи на навантаження. Навантаженням джерела є будь-який споживач електричної енергії. Його опір R_H визначає величину струму навантаження:

$$I_H = \frac{E}{R_H + R_0} \quad (2.13)$$

Чим опір навантаження менший, тим струм навантаження більший і, отже, навантаження на джерело більше.

Із співвідношення (2.7) видно, що збільшення струму навантаження викликає зменшення напруги на затискачах джерела. Ця залежність лінійна (оскільки величини ЕРС і внутрішнього опору джерела ми вважаємо постійними). Її графік поданий на рис. 2.2.

Точка А відповідає режиму холостого ходу: $I = 0, U = E, U_0 = 0$.

Точка В відповідає режиму короткого замикання: $I = I_{кз}, U = 0, U_0 = E$.

При будь-якому проміжному значенні струму навантаження, наприклад I_1 або I_2 на рис.2.2, напруга на затискачах джерела менша за його ЕРС на величину падіння напруги усередині джерела:

$$U_1 = E - U_{01} = E - I_1 \cdot R_0; \quad U_2 = E - U_{02} = E - I_2 \cdot R_0 \quad .$$

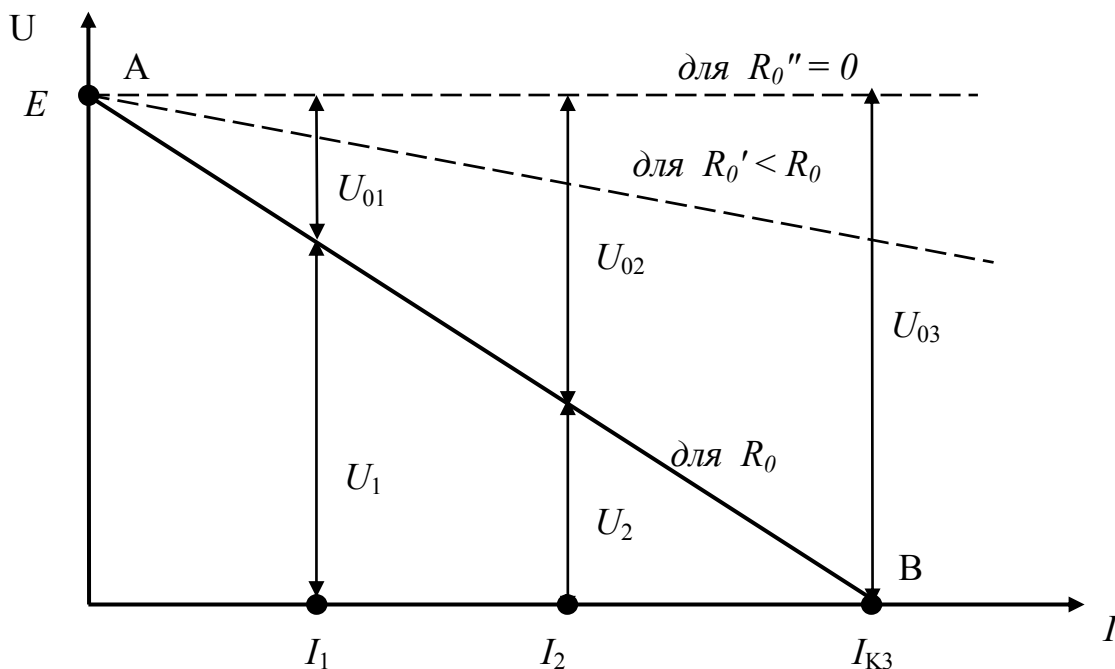


Рис. 2.2 - Залежність напруги джерела від струму навантаження

Таким чином, при зміні навантаження напруга підведена до споживача, весь час змінюється, що в більшості випадків є небажаним. Щоб забезпечити максимальну стабільність напруги, треба домагатися мінімального внутрішнього опору джерела, тоді при однакових межах зміни струму навантаження зміни напруги будуть меншими (рис. 2.2 - пунктирна лінія $R_0' < R_0$).

2.2.4. Номінальний режим. Номінальний режим джерела характеризується тим, що його напруга, струм і потужність відповідають тим значенням, що зазначені як номінальні у паспорті джерела. При цьому гарантуються найкращі умови роботи (економічність, довговічність та ін.).

Величини, що визначають номінальний режим, вказують у паспорті або на щитку, прикріпленому до пристрою. Ці дані беруть за основу при розрахунках електричних схем.

Основними даними електротехнічних пристроїв є їхні *номінальні напруги і струми*: U_n і I_n . **Номінальна напруга важлива для вибору ізоляції електричних проводів, а номінальний струм – для вибору їх перерізу за умов припустимого нагрівання.**

2.3. Робота й потужність постійного струму

2.3.1. Робота електричного струму. При проходженні електричного струму по провіднику відбувається робота з переміщення зарядів. З курсу фізики відомо, що робота, виконувана електричним струмом на ділянці кола, прямо пропорційна падінню напруги на цієї ділянці, силі струму й часу, протягом якого проходить цей струм:

$$A = U \cdot I \cdot t. \quad (2.14)$$

Одиницею виміру роботи електричного струму є 1 джоуль або ват-секунда:

$$1 \text{ Дж} = \text{В А с} = \text{Вт с}.$$

З формули (2.14), використовуючи різні форми запису закону Ома можна одержати наступні співвідношення:

$$A = I^2 \cdot R \cdot t; \quad (2.15)$$

$$A = \frac{U^2 \cdot t}{R}. \quad (2.16)$$

Процес здійснення роботи електричним струмом супроводжується перетворенням електричної енергії на теплову (у нагрівальних приладах), у механічну (в електродвигунах) або світлову (в освітлювальних приладах).

2.3.2. Потужність електричного струму. Потужністю називається величина, що характеризує швидкість, з якою відбувається робота, або швидкість перетворення енергії. **Електрична потужність (P) – це робота, виконувана електричним струмом в одиницю часу.**

$$P = \frac{A}{t}. \quad (2.17)$$

З виразу (2.17) можемо записати

$$P = U \cdot I, \quad (2.18)$$

тобто потужність, що розвивається на ділянці кола електричним струмом, прямо пропорційна напрузі й силі струму на цій ділянці.

Одиницею виміру потужності є **ват**: $1 \text{ Вт} = 1 \text{ В А}$.

Із співвідношення (2.18) можуть бути отримані наступні формули для розрахунку потужності:

$$P = I^2 \cdot R; \quad (2.19)$$

$$P = \frac{U^2}{R} \quad (2.20)$$

Потужність, що розвивається джерелом електричної енергії у всьому колі, називається **повною потужністю**. Повна потужність (P_{Π}) визначається електрорушійною силою джерела й величиною струму навантаження (рис. 2.1):

$$P_{\Pi} = E \cdot I_H \quad (2.21)$$

Оскільки ЕРС джерела дорівнює сумі падінь напруг на зовнішній і внутрішній ділянках кола (рис.2.1), можемо записати

$$P_{\Pi} = (U + U_0) I_H = U \cdot I_H + U_0 \cdot I_H \quad (2.22)$$

Величина $U \cdot I_H$ виражає потужність, що розвивається на зовнішній ділянці кола, тобто потужність, споживану навантаженням. Вона називається **корисною потужністю** (потужність навантаження):

$$P_H = U \cdot I_H \quad (2.23)$$

Величина $U_0 I$ виражає потужність, що витрачається усередині джерела і називається **потужністю втрат**:

$$P_{ВТР} = U_0 \cdot I_H \quad (2.24)$$

У практичних розрахунках у схемі заміщення часто враховують й опір лінії $R_{Л}$. У цьому випадку потужність втрат визначають як

$$P_{ВТР} = U_0 \cdot I_H + U_{Л} \cdot I_H = I_H^2 \cdot (R_0 + R_{Л}) \quad (2.25)$$

Таким чином, повна потужність дорівнює сумі корисної потужності й потужності втрат:

$$P_{\Pi} = P_H + P_{ВТР} \quad (2.26)$$

2.3.3. Коефіцієнт корисної дії. У зв'язку з тим, що не вся потужність джерела віддається приймачу електричної енергії, вводять поняття **коефіцієнта корисної дії** джерела η , що визначається як відношення корисної потужності до повного потужності:

$$\eta = \frac{P_H}{P_{\Pi}}, \text{ або у відсотках } \eta = \frac{P_H}{P_{\Pi}} 100\% \quad (2.27)$$

Коефіцієнт корисної дії (ККД) може бути виражений і через інші величини, що характеризують електричне коло (рис.2.1):

$$\eta = \frac{P_H}{P_{\Pi}} = \frac{U \cdot I_H}{E \cdot I_H} = \frac{U}{E} \quad (2.28)$$

або
$$\eta = \frac{P_H}{P_H + P_0} = \frac{I_H^2 \cdot R_H}{I_H^2 \cdot R_H + I_H^2 \cdot R_0} = \frac{R_H}{R_H + R_0} \quad (2.29)$$

або
$$\eta = \frac{U}{E} = \frac{E - U_0}{E} = 1 - \frac{U_0}{E} = 1 - \frac{I_H \cdot R_0}{I_{КЗ} \cdot R_0} = 1 - \frac{I_H}{I_{КЗ}} \quad (2.30)$$

На рис.2.3 показаний графік залежності ККД джерела від струму навантаження. При холостому ході струм дорівнює нулю і ККД дорівнює 1. При короткому замиканні струм досягає максимального значення, але ККД при цьому дорівнює нулю, оскільки ніякої корисної роботи джерело не виконує, і вся енергія витрачається усередині джерела.

Рівність ККД при холостому ході одиниці означає, що при наближенні режиму роботи джерела до режиму холостого ходу його ККД прагне до одиниці. Це має місце тоді, коли опір навантаження багаторазово перевищує внутрі-

шній опір джерела. Втрати енергії усередині джерела в цьому випадку значно менші за корисну потужність.

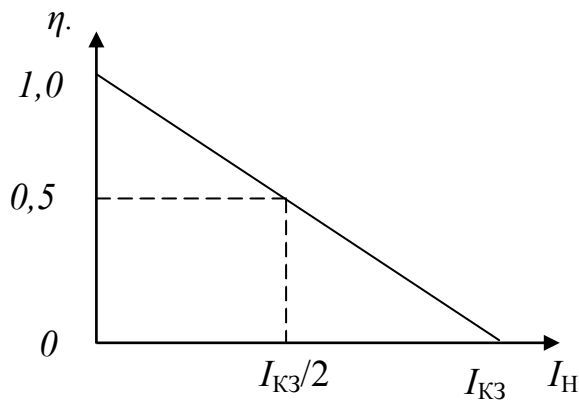


Рис.2.3 - Залежність $\eta = f(I_H)$

2.3.4. Теплова дія струму. Якщо при проходженні електричного струму по провіднику не відбувається додаткових перетворень електричної енергії на хімічну, механічну або світлову, то вся енергія, що йде на переміщення електричних зарядів, перетворюється на теплову. Тоді виділяється кількість тепла Q , яка еквівалентна роботі електричного струму:

$$Q = A = UI \cdot t \text{ або } Q = I^2 \cdot R \cdot t. \quad (2.31)$$

Кількість тепла тут виражається в джоулях.

У технічних розрахунках часто вимірюють теплову енергію в калоріях (1 калорія - це кількість тепла, необхідна для нагрівання 1 грама води на 1 градус Цельсія). Один джоуль становить 0,24 калорії, тому величину 0,24 калорій/джоуль називають **термічним еквівалентом роботи**.

Кількість тепла, що виділяється у провіднику при проходженні по ньому електричного струму, яка виражена в калоріях, розраховують за формулою:

$$Q = 0,24 \cdot I^2 \cdot R \cdot t. \quad (2.32)$$

Співвідношення (2.37) виражає **закон Джоуля-Ленца - кількість тепла, яка виділена електричним струмом у провіднику, прямо пропорційна квадрату сили струму, величині опору провідника і часу, протягом якого проходить струм**.

2.4. Умови віддачі джерелом максимальної потужності

При опорі резистора зовнішнього кола (рис. 2.1) R_H , напруга й струм в ньому зв'язані рівнянням $U = I_H \cdot R_H$, що виражає закон Ома для пасивної ділянки кола. З огляду на це можна записати:

$$E = U_0 + U = I_H R_0 + I_H R_H. \quad (2.33)$$

Це рівняння виражає електричний стан найпростішого замкнутого кола. З (2.33) можемо одержати:

$$I_H = E / (R_0 + R_H). \quad (2.34)$$

При цьому потужність джерела живлення

$$P_{дж} = I_H^2 \cdot (R_0 + R_H) = E^2 / (R_0 + R_H), \quad (2.35)$$

і потужність, виділена на навантаженні,

$$P_H = R_H \cdot I_H^2 = R_H \cdot E^2 / (R_0 + R_H)^2. \quad (2.36)$$

Потужність навантаження P_H при холостому ході ($R_H = \infty$) і при короткому замиканні ($R_H = 0$) дорівнює нулю. Вона має максимальне значення, коли відношення $R_H / (R_0 + R_H)^2$ максимальне. Взевши першу похідну від (2.36) за R_H і дорівнявши її до нуля, дістанемо

$$\frac{d}{dR_H} \cdot \frac{R_H}{(R_0 + R_H)^2} = \frac{(R_0 + R_H)^2 - 2R_0(R_0 + R_H)}{(R_0 + R_H)^2} = 0$$

або
звідки

$$(R_0 + R_H)^2 - 2R_0 \cdot (R_0 + R_H) = 0 ,$$

$$R_H = R_0. \quad (2.37)$$

Отже **потужність зовнішнього кола максимальна, коли опір зовнішнього кола R_H дорівнює внутрішньому опорю R_0 джерела.** Такий режим роботи джерела називають погодженим. У погодженому режимі потужність втрат усередині джерела дорівнює половині потужності джерела:

$$\Delta P_{ДЖ} = R_0 \cdot I^2 = R_H \cdot I^2 = E \cdot I / 2 . \quad (2.38)$$

Розглянемо, як змінюється ККД джерела залежно від величини опорю R_H . **ККД джерела дорівнює відношенню потужності зовнішнього кола P_H до повної потужності $P_{П}$ джерела:**

$$\eta = \frac{P_H}{P_{П}} = \frac{R_H \cdot I^2}{(R_0 + R_H) \cdot I^2} = \frac{R_H}{(R_0 + R_H)} = \frac{1}{1 + \frac{R_0}{R_H}} . \quad (2.39)$$

З формули (2.39) видно, що при холостому ході, коли $R_H = \infty$, ККД $\eta_{хх} = 1$; при короткому замиканні, коли $R_H = 0$, ККД $\eta_{кз} = 0$; у погодженому режимі ($R_H = R_0$) ККД $\eta_{пог} = 0,5$.

На рис. 2.4 показані графіки залежностей $P_{П}$, P_H і η від відносної величини опорю зовнішнього кола R_H/R_0 .

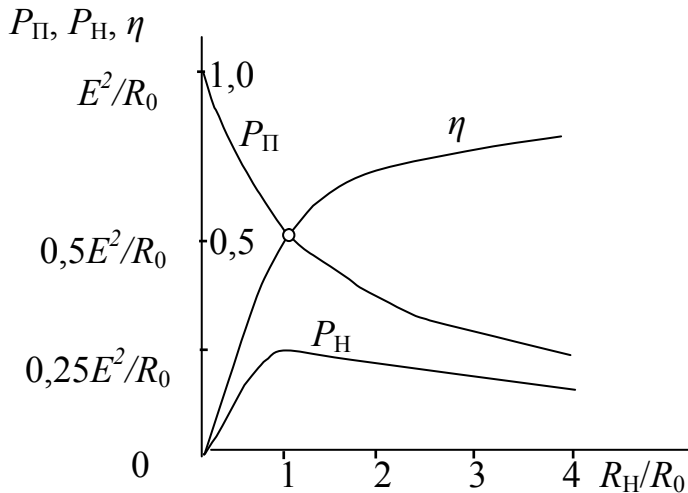


Рис.2.4 - Графік залежності $P_{П}$, P_H і η від співвідношення R_H/R_0

Зазначимо, що в практичних умовах номінальний режим потужних джерел рідко співпадає з погодженим режимом, оскільки ККД дорівнює 0,5, а струм навантаження джерела значно більший за номінальний струм. Остання обставина може призвести до надмірного виділення тепла усередині джерела.

З погодженим режимом доводиться мати справу тоді, коли низький ККД не має вирішального значення через малу потужність кола. Коли питання

економіки є вирішальними, внутрішній опір R_0 джерела повинний бути малим в порівнянні з опором R_H зовнішнього кола. У цьому випадку номінальний режим джерела ближче до режиму холостого ходу й ККД джерела близький до одиниці.

2.5. Схеми з'єднання елементів кола

Можливі варіанти з'єднання елементів кіл постійного струму розглянемо на прикладі з'єднання пасивних електроприймачів.

2.5.1. Послідовне з'єднання елементів кола. *Послідовним називають таке з'єднання, при якому в кожному з елементів проходить той самий струм.* При послідовному з'єднанні n елементів струми заданої (рис. 2.5,а) і еквівалентної (рис. 2.5,б) схем будуть однаковими. Тому для них можна написати рівняння

$$U_1 + U_2 + \dots + U_n = U,$$

або

$$R_1 I + R_2 I + \dots + R_n I = R_{\text{ЕКВ}} I$$

і визначити з нього еквівалентний опір:

$$R_{\text{ЕКВ}} = R_1 + R_2 + \dots + R_n \quad (2.40)$$

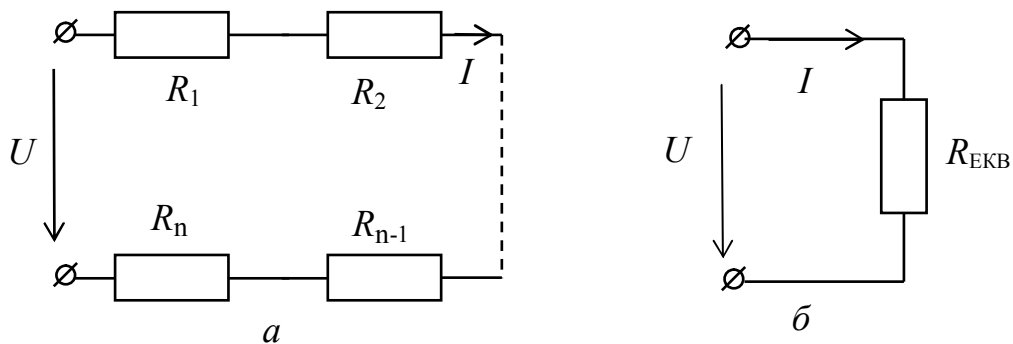


Рис.2.5 - Схема кола з послідовним з'єднанням активних опорів (а) і її еквівалентний опір (б)

Еквівалентний опір послідовно з'єднаних елементів кола дорівнює сумі опорів окремих елементів. Для аналізу режимів роботи схеми запишемо в загальному вигляді наступні рівняння кола:

для струму

$$I = U/R_{\text{ЕКВ}} ; \quad (2.41)$$

для напруги n -го елемента

$$U_n = R_n \cdot U/R_{\text{ЕКВ}} ; \quad (2.42)$$

для потужності споживання енергії n -м елементом

$$P_n = R_n \cdot I^2 = R_n \cdot U^2/R_{\text{ЕКВ}}^2. \quad (2.43)$$

На підставі цих рівнянь можна отримати деякі **загальні властивості послідовного кола:**

1. З рівнянь (2.41) і (2.42) видно, що між напругою на вході схеми, струмом і напругою її окремих елементів є лінійна залежність. Усяка зміна напруги U в k разів спричиняє зміну струму й напруги кожного елемента теж в k разів. Потужність всього кола і його окремих елементів змінюється при цьому в k^2 разів.

2. Струм всього кола й напруга на його окремих елементах залежать від величини опору кожного з елементів кола. При цьому, якщо опір якого-небудь елемента збільшується, струм у колі й напруги на елементах з незмінними опорами зменшуються, а напруга на елементі із зростаючим опором збільшується. У границі, коли опір цього елемента дорівнює нескінченності (холостий хід), напруга на затискачах, за допомогою яких даний елемент був приєднаний до іншої частини кола, дорівнюватиме напрузі джерела.

Послідовне з'єднання приймачів використовують у тому випадку, коли їхні номінальні напруги нижче за напругу мережі. Якщо, наприклад, приймачі мають номінальні напруги 110 В, а напруга мережі 220 В, то ці приймачі можна з'єднати послідовно і включити на напругу мережі. Однак при цьому необхідно мати на увазі, що *опір приймача зворотно пропорційний його номінальній потужності* $R = U_n^2/P_n$. Тому приймач великої номінальної потужності буде працювати з недовантаженням, а приймач малої номінальної потужності - з перевантаженням. **Послідовно з'єднані приймачі з однаковими номінальними напругами будуть мати найкращі умови роботи при однакових номінальних потужностях.**

Численними є застосування послідовних з'єднань елементів у різних областях техніки. Наприклад, при використанні двигунів постійного струму послідовно з колом якоря включають резистори з регульованими опорами для обмеження пускового струму (пусковий реостат, див. розділ 10.9) і для регулювання швидкості (регульовальний реостат, див. розділи 10.9, 15.2).

У практиці електричних вимірів з послідовно з'єднаних резисторів утворюють вимірювальні магазини опорів, послідовним включенням додаткових резисторів до вимірника напруги домагаються розширення меж виміру напруги та ін.

2.5.2. Паралельне з'єднання елементів кола. На рис. 2.6,а показано схему з n пасивними гілками, які приєднані до двох вузлів, різниця потенціалів між якими дорівнює напрузі U джерела. Таким чином, струм у кожній n -й гілці визначається напругою між вузлами й опором цієї гілки R_n або її провідністю $G_n = 1/R_n$:

$$\left. \begin{aligned} I_1 &= U/R_1 = G_1 \cdot U \\ I_n &= U/R_n = G_n \cdot U. \end{aligned} \right\} \quad (2.44)$$

Та обставина, що **паралельне з'єднання забезпечує однакову напругу на всіх включених приймачах і їхні незалежні один від одного режиму роботи**, є важливою **перевагою** цього з'єднання, завдяки якій воно знайшло широке застосування. Як правило, всі приймачі електричної енергії включають у мережу паралельно. Для характеристики роботи паралельного кола визначимо його еквівалентний опір. Умови еквівалентності будуть дотримані, якщо струм $I_{\text{екв}}$, що протікає по еквівалентному колу (рис. 2.6,б), буде дорівнювати струму I у нерозгалуженій частині кола або сумі струмів окремих паралельних гілок:

$$I_{\text{екв}} = I = I_1 + I_2 + \dots + I_n. \quad (2.45)$$

Підставимо в це рівняння значення струмів з (2.44) і одержимо вираз

$$G_{\text{екв}} \cdot U = G_1 \cdot U + G_2 \cdot U + \dots + G_n \cdot U,$$

з якого можна вивести формулу еквівалентної провідності:

$$G_{\text{екв}} = G_1 + G_2 + \dots + G_n = \sum G_k \quad (2.46)$$

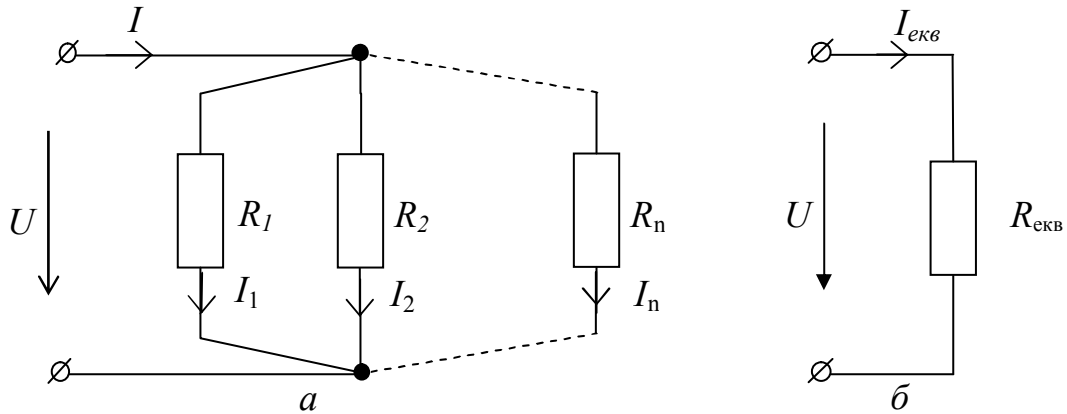


Рис. 2.6 - Схема кола з паралельним з'єднанням резистивних елементів (а) і її еквівалентна схема (б)

або формулу еквівалентного опору

$$1/R_{\text{екв}} = 1/R_1 + 1/R_2 + \dots + 1/R_n = \sum 1/R_k. \quad (2.47)$$

Отже **при паралельному з'єднанні еквівалентна провідність кола дорівнює сумі провідностей окремих гілок**. Оскільки найбільшу провідність має гілка з найменшим опором, то провідність кола з паралельним з'єднанням елементів не може бути меншою за провідність гілки з найменшим опором. **Еквівалентний опір кола, що складене з паралельно з'єднаних гілок, зворотно пропорційний його еквівалентній провідності:**

$$R_{\text{екв}} = 1/G_{\text{екв}}, \quad (2.48)$$

тому він завжди менший найменшого з опорів гілок.

Необхідно ясно уявляти, що при підключенні нового приймача до кола створиться додаткова паралельна гілка, загальна провідність кола при цьому збільшиться, а його еквівалентний опір зменшиться. Якщо паралельно з'єднані n гілок з однаковими опороми R , то їхній еквівалентний опір буде в n разів менший за опір однієї гілки: $R_{\text{екв}} = R/n$. Зменшення загального опору кола буде супроводжуватися збільшенням струму й потужності:

$$P = U \cdot I = U \cdot (I_1 + I_2 + \dots + I_n),$$

або

$$P = P_1 + P_2 + \dots + P_n.$$

Потужність кола, яке складене з паралельних гілок, дорівнює сумі потужностей його окремих гілок.

Становить практичний інтерес коло з двома паралельно включеними резисторами, які мають опори R_1 і R_2 . Еквівалентний опір такого кола дорівнює добутку опорів, поділеному на їхню суму:

$$R_{\text{екв}} = R_1 \cdot R_2 / (R_1 + R_2). \quad (2.49)$$

Струми гілок цього кола дорівнюють:

$$\left. \begin{aligned} I_1 &= U/R_1 = R_{\text{екв}} \cdot I/R_1 = R_2 \cdot I/(R_1 + R_2) \\ I_2 &= U/R_2 = R_{\text{екв}} \cdot I/R_2 = R_1 \cdot I/(R_1 + R_2) \end{aligned} \right\} . \quad (2.50)$$

Відповідно до отриманих співвідношень струм в одній з паралельних гілок кола дорівнює струму нерозгалуженої ділянки кола, помноженому на відношення опору протилежної гілки й суми опорів обох гілок.

2.5.3. Еквівалентні перетворення з'єднань пасивних елементів «зіркою» і «трикутником». Зустрічаються схеми із складним з'єднанням елементів, які не можна віднести ні до паралельного, ні до послідовного з'єднання. Розглянемо одну з таких схем (рис.2.7), коли частина її утворює «трикутник», вершинами якого є три вузли, а сторонами - три пасивних гілки, включені між цими вузлами. Для спрощення розрахунку подібних схем у багатьох випадках буває зручно замінити «трикутник» еквівалентною трипроменевою «зіркою». На схемі (рис.2.7) маємо два «трикутники» резисторів 1-2-3 і 4-5-6. Розглянемо її перетворення на схему з еквівалентними «зірками» (рис. 2.8) з опором резисторів променів R_1, R_2, R_3 і R_4, R_5, R_6 .

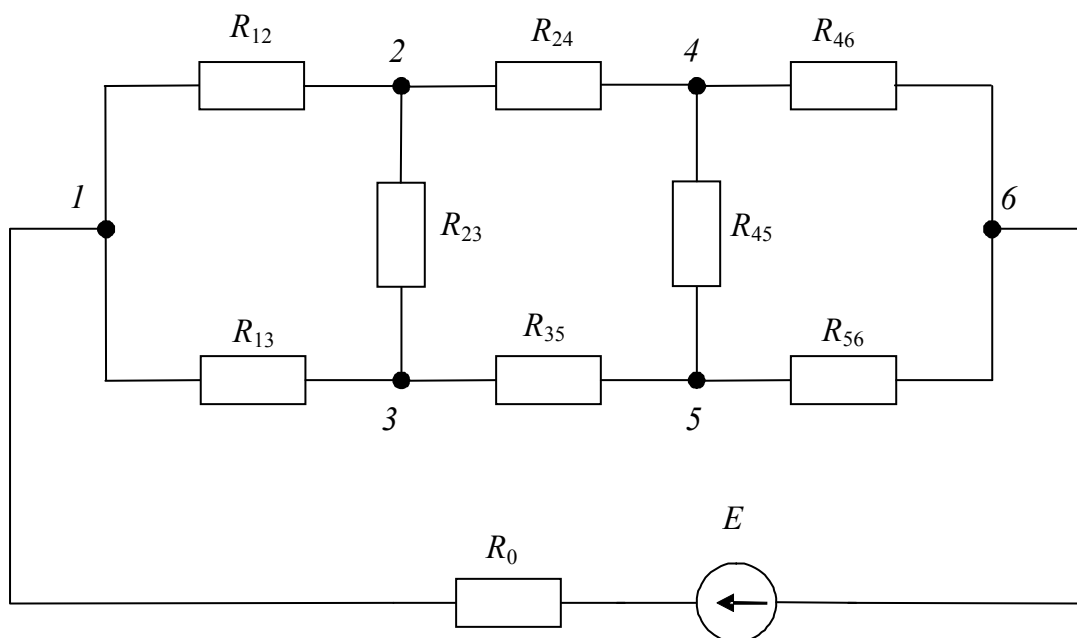


Рис.2.7 - Схема мережі з двома ділянками з'єднання опорів у «трикутник»

Визначимо рівняння, що зв'язують еквівалентні опори «трикутника» і «зірки» (рис.2.9, а та б).

Для вирішення завдання скористаємося загальною умовою еквівалентності, за якою струми в гілках схеми, які не піддані перетворенню, повинні залишатися без зміни. Це означає, що струми, спрямовані до вузлів 1, 2 і 3 по проводах схем «трикутника» (рис. 2.7) і «зірки» (рис. 2.8), повинні бути однаковими. Умова еквівалентності повинна бути збереженою в усіх режимах, в тому числі при обриві одного з проводів, які приєднані до вузлів 1, 2 і 3.

При обриві проводу, що приєднаний до вузла 1, напруга між вузлами 2 і 3, а також струми проводів, приєднаних до цих вузлів, повинні бути однаковими в схемах «трикутника» й «зірки». Отже опори між вузлами 2 і 3 схем «трикутника» й «зірки» повинні бути рівними між собою. У схемі «зірки» (рис. 2.8) струм по резистору R_1 не проходить. Тому між вузлами 2 і 3 буде включена ділянка, яка складається з послідовно з'єднаних двох променів «зірки», загальний опір яких дорівнює $R_2 + R_3$.

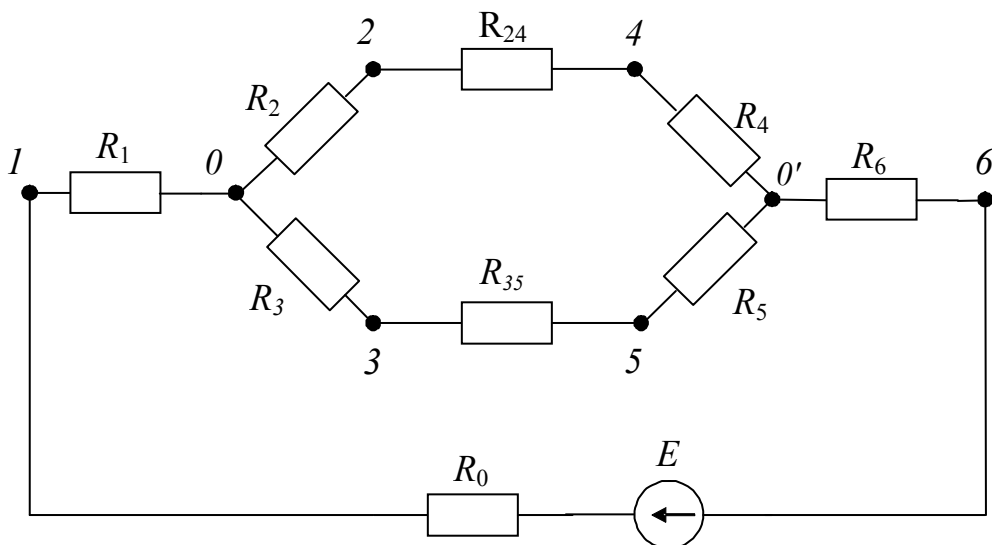


Рис.2.8 - Еквівалентна схема з двома ділянками з'єднання опорів у зірку

У схемі «трикутника» між вузлами 2 і 3 є дві паралельні гілки, до однієї з яких включений резистор з опором R_{23} , а до іншої - два послідовно з'єднаних резистори з опорами R_{31} і R_{12} . Загальний опір цього кола

$$\frac{R_{23}(R_{31} + R_{12})}{R_{23} + R_{31} + R_{12}}$$

За умовою еквівалентності

$$R_2 + R_3 = \frac{R_{23}(R_{31} + R_{12})}{R_{23} + R_{31} + R_{12}} \quad (2.51)$$

Повторюючи вищенаведені міркування для випадку, коли обривається провід, приєднаний до вузла 2, а потім до вузла 3, одержимо ще два рівняння:

$$R_3 + R_1 = \frac{R_{31}(R_{12} + R_{23})}{R_{23} + R_{31} + R_{23}} \quad (2.52)$$

$$R_1 + R_2 = \frac{R_{12}(R_{23} + R_{31})}{R_{23} + R_{31} + R_{12}} . \quad (2.53)$$

Розв'язуючи отриману систему з трьох рівнянь (2.51) - (2.53) відносно опорів «зірки», знаходимо:

$$R_1 = \frac{R_{12} \cdot R_{31}}{R_{12} + R_{23} + R_{31}} ; \quad (2.54)$$

$$R_2 = \frac{R_{23} \cdot R_{12}}{R_{12} + R_{23} + R_{31}} ; \quad (2.55)$$

$$R_3 = \frac{R_{31} \cdot R_{23}}{R_{12} + R_{23} + R_{31}} . \quad (2.56)$$

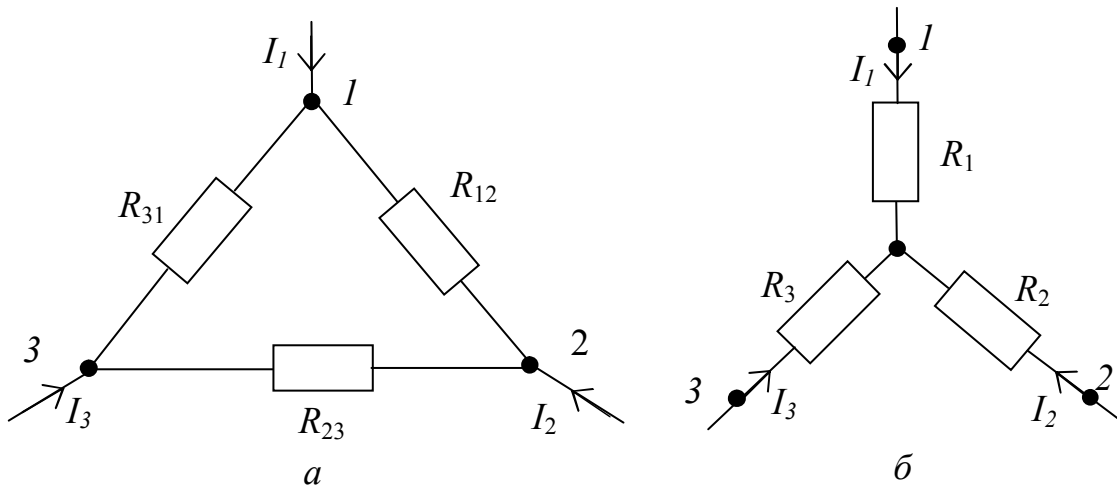


Рис. 2.9 - Еквівалентні з'єднання резисторів «трикутником» (а) і «зіркою» (б)

Отже *опір будь-якого променя еквівалентної «зірки» дорівнює добутку опорів сторін «трикутника», що прилягають до променя, поділеному на суму опорів усіх сторін «трикутника».*

У разі рівності опорів резисторів сторін «трикутника» $R_{12} = R_{23} = R_{31} = R_{\Delta}$ опори резисторів променів еквівалентної «зірки» $R_1 = R_2 = R_3 = R_Y$ будуть у три рази менші опорів резисторів сторін «трикутника»: $R_Y = R_{\Delta}/3$.

При заміні трипроменевої «зірки» еквівалентним «трикутником» опори резисторів «трикутника» R_{12} , R_{23} , R_{31} можна визначити за відомими опорами резисторів «зірки» R_1 , R_2 , R_3 , вирішуючи систему рівнянь (2.54), (2.55) і (2.56) відносно R_{12} , R_{23} , R_{31} . Для цього перемножимо попарно (2.54) на (2.55), (2.55) - на (2.56), (2.56) - на (2.54), додамо ці добутки й проведемо відповідні перетворення. У результаті одержимо

$$R_1 R_2 + R_2 R_3 + R_3 R_1 = \frac{R_{12} \cdot R_{23} \cdot R_{31}}{R_{12} + R_{23} + R_{31}} .$$

Розділивши це рівняння по черзі на (2.56), (2.55) і (2.54), знайдемо формули переходу в остаточному вигляді:

$$\left. \begin{aligned} R_{12} &= R_1 + R_2 + \frac{R_1 \cdot R_2}{R_3} \\ R_{23} &= R_2 + R_3 + \frac{R_2 \cdot R_3}{R_1} \\ R_{31} &= R_3 + R_1 + \frac{R_3 \cdot R_1}{R_2} \end{aligned} \right\} \quad (2.57)$$

З отриманих формул видно, що *опір резистора будь-якої сторони еквівалентного «трикутника» дорівнює сумі опорів резисторів променів «зірки», що примикають до цієї сторони «трикутника», і дробу, чисельник якого дорівнює добутку опорів резисторів цих променів, а знаменник - опору резистора третього променя «зірки».*

2.6. Закони Кірхгофа

У теорії електричних кіл важливе значення мають експериментально встановлені в 1847 р. німецьким фізиком Г.Р.Кірхгофом закони, що одержали назву 1-го й 2-го законів Кірхгофа.

2.6.1. Перший закон Кірхгофа. Цей закон відносять до вузлів кола й для випадку постійних струмів формулюють в такий спосіб: *алгебраїчна сума струмів, що сходяться у вузлі, дорівнює нулю*

$$\sum_{k=1}^n I_k = 0. \quad (2.58)$$

При записі рівнянь за першим законом Кірхгофа підсумовування струмів роблять алгебраїчно: струмам, що спрямовані до вузла, привласнюють один знак, наприклад позитивний, а струмам, що спрямовані від вузла, - інший знак, наприклад негативний. Тому часто зустрічається ще інше формулювання першого закону Кірхгофа: *сума струмів, що притікають до вузла, дорівнює сумі струмів, що виходять з нього.*

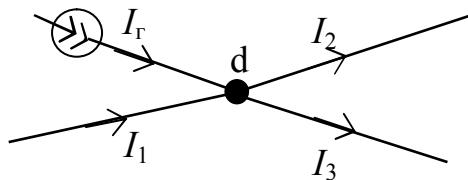
Якщо до вузла підключені кілька генераторів струму, то сума струмів, що генеруються ними, $\sum I_{\Gamma}$ повинна з відповідними знаками бути присутньою у лівій частині рівняння (2.58).

Перший закон Кірхгофа є наслідком *закону збереження кількості електрики*, відповідно до якого ні в якій точці заряди не можуть безмежно накопичуватися: *кількість електрики, що притікає до даної точки за певний проміжок часу, повинна дорівнювати кількості електрики, що відтікає від неї за той же час.*

Прийmemo для схеми на рис. 2.10 струми, що входять до вузла d, позитивними (I_{Γ} і I_1), а струми, що виходять з вузла – негативними (I_2 і I_3). Тоді можемо записати наступне рівняння за першим законом Кірхгофа

$$I_{\Gamma} + I_1 - I_2 - I_3 = 0, \quad (2.59)$$

що відповідатиме 1-му формулюванню першого закону Кірхгофа, або у вигляді



$$I_{\Gamma} + I_1 = I_2 + I_3, \quad (2.60)$$

що відповідає 2-му формулюванню першого закону Кірхгофа, або легко отримується шляхом перетворення співвідношення (2.59).

Рис.2.10 - Схема ділянки мережі

2.6.2. Другий закон Кірхгофа. Цей закон є наслідком закону збереження енергії, внаслідок якого зміна потенціалу в замкнутому контурі дорівнює нулю. Зміну потенціалу між парою вузлів ділянки характеризують різницею потенціалів або рівною їй напругою.

При обході замкнутого контура по окремих ділянках потенціал кінцевого вузла t цієї ділянки підвищується щодо потенціалу його початкового вузла n на величину напруги, якщо напрямок обходу протилежний напрямку стрілки напруги, і знижується, коли напрямок обходу й напрямок стрілки напруги збігаються. Тому зміни потенціалу в замкнутому контурі можна визначити підсумовуванням напруг з урахуванням їхніх знаків. Відповідно до **другого закону Кірхгофа алгебраїчна сума напруг ділянок замкнутого контуру дорівнює нулю** (перше формулювання):

$$\sum U_{mn} = 0. \quad (2.61)$$

При цьому умовилися напруги, позитивні напрямки яких збігаються з напрямком обходу контуру, брати з позитивними знаками, а напруги, позитивні напрямки яких протилежні напрямку обходу, - з негативними знаками.

Стосовно до схем заміщення з джерелами ЕРС **другий закон Кірхгофа** формулюється в такий спосіб: **алгебраїчна сума напруг на резистивних елементах замкнутого контуру дорівнює алгебраїчній сумі ЕРС, що входять у цей контур** (друге формулювання)

$$\sum I \cdot R = \sum E. \quad (2.62)$$

2.6.3. Порядок аналізу кіл. Застосування першого й другого законів Кірхгофа для аналізу електричних кіл дозволяє виконати розрахунок практично будь-якого кола. Як правило, при дослідженні відомі ЕРС і опори усіх елементів схеми й потрібно знайти значення струмів і потужностей у гілках схеми. Порядок розрахунку розглянемо на прикладі схеми кола, що показано на рис. 2.11.

Алгоритм розрахунку:

1. На вихідній схемі довільно наносимо напрямки струмів у гілках (на рис. 2.11,б струми I_1 , I_2 і I_3). Якщо в гілці є ЕРС, то напрямком струму краще задати співпадаючим з напрямком цієї ЕРС. Наносимо позначення вузлів (вузли 1 і 2 на рис. 2.11,б).

2. Визначаємо **число вузлів n , гілок t і незалежних контурів k .**

Незалежним називають контур, до якого входить хоча б одна нова гілка. Кількість незалежних контурів дорівнює $k = t - (n - 1)$.

3. Для незалежних контурів довільно задаємося напрямком обходу (на рис. 2.11,б контури I і II , напрямком обходу за годинниковою стрілкою).

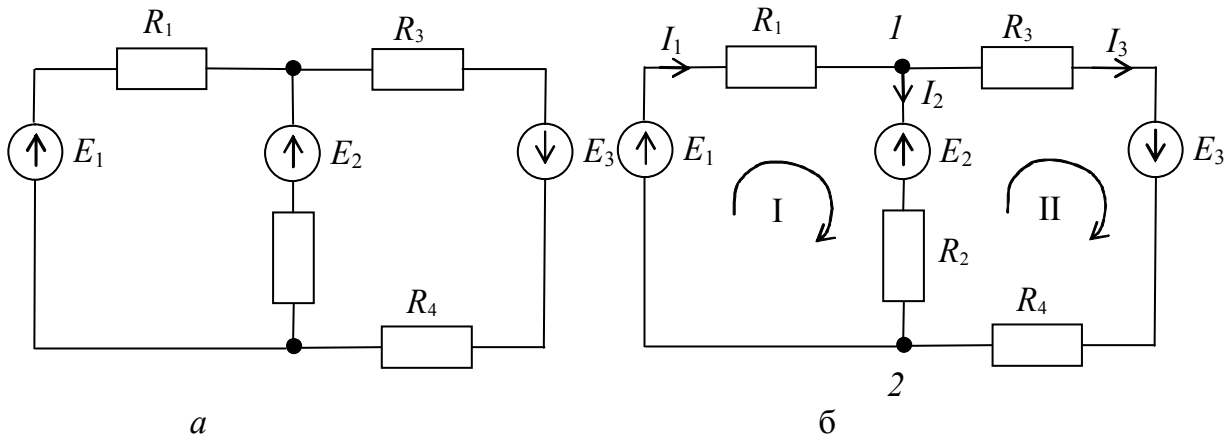


Рис. 2.11 - Схема електричного кола: а - вихідна; б - з нанесеними позначеннями вузлів, струмів і напрямків обходу контурів

Для визначення невідомих струмів у гілках треба скласти систему лінійних алгебраїчних рівнянь, кількість яких дорівнює кількості невідомих струмів. За першим законом Кірхгофа можна скласти $n-1$ незалежних рівнянь. Використати всі n рівнянь неможливо, оскільки одне з них обов'язково буде залежним.

4. Встановлюємо число незалежних рівнянь за першим законом Кірхгофа і записуємо ці рівняння.

5. Відсутні рівняння складемо за другим законом Кірхгофа. Кількість рівнянь, що складають за другим законом Кірхгофа, повинна дорівнювати кількості незалежних контурів k .

6. Вирішуємо отриману систему лінійних алгебраїчних рівнянь щодо невідомих струмів у гілках.

7. Для перевірки правильності розрахунку отриманих значень струму складають рівняння балансу потужностей джерел і приймачів електричної енергії

$$\sum E \cdot I = \sum I^2 \cdot R, \quad (2.63)$$

в якому права частина характеризує потужність пасивних приймачів електричної енергії, а ліва - потужність активних елементів кола. При складанні рівняння балансу потужностей слід мати на увазі, що в лівій його частині із знаком плюс записують ті доданки, для яких напрямки ЕРС і струму збігаються. Якщо ж напрямки ЕРС і струми протилежні (робота джерела в режимі споживання електричної енергії), то відповідні доданки записують із знаком мінус у лівій частині рівняння або із знаком плюс у правій його частині, що відповідає потужності активного приймача електричної енергії.

Схема електричного кола на рис. 2.11,а містить два вузли ($n = 2$), три гілки ($m = 3$) і два незалежних контури:

$$k = m - (n - 1) = 3 - (2 - 1) = 2.$$

За першим законом Кірхгофа для неї можна скласти одне незалежне рівняння, наприклад, для вузла 1:

$$I_1 - I_2 - I_3 = 0. \quad (2.64)$$

За другим законом Кірхгофа необхідно скласти два рівняння для двох незалежних контурів (на схемі рис. 2.11,б контури I і II). З урахуванням прийнятих напрямків обходу контурів ці рівняння мають вигляд: для контура I

$$R_1 \cdot I_1 + R_2 \cdot I_2 = E_1 - E_2 ; \quad (2.65)$$

для контура II

$$-R_2 \cdot I_2 + (R_3 + R_4) \cdot I_3 = E_2 + E_3. \quad (2.66)$$

При складанні рівнянь (2.65), (2.66) із знаком плюс записуємо ті доданки, у яких струм і ЕРС мають напрямки, що збігаються з напрямком обходу контура.

Розв'язуючи систему рівнянь (2.64), (2.65) і (2.66), можна визначити невідомі струми (три рівняння, три невідомих I_1 , I_2 , I_3). Якщо в результаті розв'язання цих рівнянь вийдуть від'ємні значення струмів, то це означає, що істинні напрямки струмів у гілках кола протилежні напрямкам, прийнятим на рис.2.11,б.

Складемо рівняння балансу потужностей і виконуємо перевірку рішення. Для нашого випадку (рис.2.11,б) рівняння балансу потужностей має вигляд

$$E_1 \cdot I_1 + E_2 \cdot I_2 + E_3 \cdot I_3 = I_1^2 \cdot R_1 + I_2^2 \cdot R_2 + I_3^2 \cdot (R_2 + R_4) .$$

Для інженерних розрахунків відносна похибка отриманого рішення $\delta = 2 \div 5 \%$ для більшості випадків вважається задовільною.

Контрольні запитання з теми 2

1. Дайте визначення закону Ома для всього кола.
2. В яких режимах може працювати джерело?
3. Що розуміють під номінальними даними електроприймача?
4. Як розраховують потужність (роботу) електричного струму?
5. Дайте визначення повної і корисної потужності, потужності втрат.
6. Запишіть основні співвідношення для визначення ККД електричного кола.
7. Поясніть закон Джоуля-Ленца.
8. При якій умові джерело віддає до зовнішнього кола максимальну потужність?
9. Поясніть загальні властивості послідовного з'єднання елементів кола.
10. Поясніть загальні властивості паралельного з'єднання елементів кола.
11. У чому суть методу еквівалентного перетворення?
12. Запишіть формули еквівалентного перетворення «зірки» до «трикутника», «трикутника» до «зірки».
13. Поясніть фізичний зміст першого (другого) закону Кірхгофа.
14. Скільки незалежних рівнянь можна скласти за першим законом Кірхгофа для схеми довільної конфігурації?
15. Скільки незалежних рівнянь можна скласти за другим законом Кірхгофа для схеми довільної конфігурації?
16. Поясніть алгоритм знаходження невідомих струмів для схеми довільної конфігурації за першим і другим законами Кірхгофа.

ТЕМА 3 МЕТОДИ РОЗРАХУНКУ СКЛАДНИХ КІЛ ПОСТІЙНОГО СТРУМУ

Ключові поняття: контурний струм, метод контурних струмів, власний опір контуру, принцип суперпозиції (метод накладання), принцип взаємності, метод еквівалентного генератора (активного двополюсника), метод вузлових напруг.

Класичним прийомом розрахунку складних кіл є безпосереднє застосування закону Ома й законів Кірхгофа. Однак у випадку сильно розгалужених кіл доводиться розв'язувати систему з великим числом рівнянь, тому природним є прагнення знайти менш трудомісткі методи розрахунку кіл. Для спрощення обчислень застосовують різні методи: вузлових потенціалів, контурних струмів, накладання, еквівалентного генератора та ін. Всі ці методи базуються на законах Ома й Кірхгофа.

Вибір методу розрахунку складної схеми залежить від наявних вихідних даних, структури досліджуваної мережі й завдань з її дослідження. В даній темі розглянуті основні методи розрахунку складних кіл постійного струму.

3.1. Застосування законів Кірхгофа для аналізу складних кіл

Розглянемо застосування законів Кірхгофа для визначення струмів гілок на прикладі схеми кола (рис. 3.1), якщо ЕРС і опори її елементів задані (алгоритм розрахунку дано в п.2.6.3).

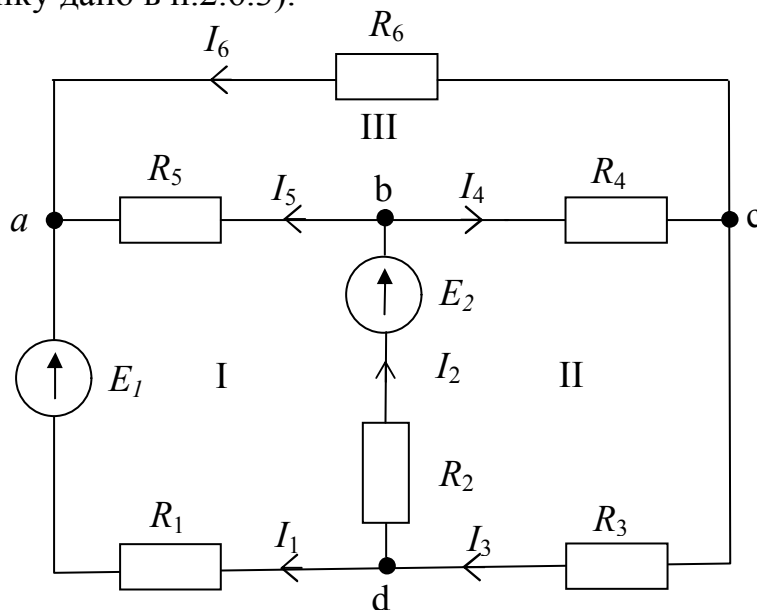


Рис.3.1 - Схема складного кола для визначення струмів гілок за законами Кірхгофа

Число невідомих струмів схеми дорівнює числу її гілок m . Тому для розв'язання задачі необхідно скласти систему, яка має $m = 6$ незалежних рівнянь.

В заданій схемі (рис. 3.1) число вузлів $n = 4$. Задамося довільним напрямком струмів окремих гілок схеми. Умовимося, що струми, спрямовані до вузлів,

мають знак "плюс", а струми, спрямовані від вузлів - знак "мінус". Вибравши вузли *b*, *c* і *d* як незалежні, можна скласти наступну систему рівнянь:

$$\left. \begin{array}{l} \text{для вузла } b: \\ \text{для вузла } c: \\ \text{для вузла } d: \end{array} \right\} \begin{array}{l} I_2 - I_4 - I_5 = 0, \\ I_4 - I_6 - I_3 = 0, \\ I_3 - I_1 - I_2 = 0. \end{array} \quad (3.1)$$

Відсутнє число рівнянь $m - (n - 1) = 6 - (4 - 1) = 3$ складаємо, користуючись другим законом Кірхгофа. Щоб кожне з рівнянь було незалежним від попередніх, треба всю схему розбити на незалежні контури. Розбивку доцільно почати з вибору найпростішого контуру (з найменшим числом гілок), а потім стежити, щоб кожний наступний контур був незалежним від попереднього, для чого до нього повинна входити хоча б одна гілка, що не ввійшла до розглянутих раніше контурів.

Виберемо три незалежних контури (на рис.3.1 позначені римськими цифрами I, II, III) і приймемо їх обхід за напрямком руху годинникової стрілки. Тоді за другим законом Кірхгофа отримуємо:

$$\left. \begin{array}{l} \text{для контуру I:} \\ \text{для контуру II:} \\ \text{для контуру III:} \end{array} \right\} \begin{array}{l} R_1 \cdot I_1 - R_5 \cdot I_5 - R_2 \cdot I_2 = E_1 - E_2, \\ R_2 \cdot I_2 + R_4 \cdot I_4 + R_3 \cdot I_3 = E_2, \\ R_5 \cdot I_5 - R_6 \cdot I_6 - R_4 \cdot I_4 = 0. \end{array} \quad (3.2)$$

Рівняння (3.1) і (3.2) дають систему лінійних алгебраїчних рівнянь

$$\left\{ \begin{array}{l} 0 \quad +I_2 \quad +0 \quad -I_4 \quad -I_5 \quad +0 \quad = \quad 0 \\ 0 \quad +0 \quad -I_3 \quad +I_4 \quad +0 \quad -I_6 \quad = \quad 0 \\ -I_1 \quad -I_2 \quad +I_3 \quad +0 \quad +0 \quad +0 \quad = \quad 0 \\ R_1 I_1 \quad -R_2 I_2 \quad +0 \quad +0 \quad -R_5 I_5 \quad +0 \quad = \quad E_1 - E_2 \\ 0 \quad +R_2 I_2 \quad +R_3 I_3 \quad +R_4 I_4 \quad +0 \quad +0 \quad = \quad E_2 \\ 0 \quad +0 \quad +0 \quad -R_4 I_4 \quad +R_5 I_5 \quad -R_6 I_6 \quad = \quad 0, \end{array} \right. \quad (3.3)$$

розв'язання якої дає значення струмів у гілках схеми.

Розглянемо вирішення задачі з розрахунку режиму мережі в загальному випадку, коли схема заміщення кола має n вузлів і m гілок, з яких m_j гілок містять джерела струму. При заданих ЕРС і опорах гілок розрахунок зводиться до знаходження струмів у m гілках.

Розглянемо спочатку розрахунок для схеми без джерел струму. Як ми вже зазначали, для розв'язання задачі необхідно скласти $n - 1$ незалежних рівнянь за першим законом Кірхгофа і $k = m - (n - 1)$ незалежних рівнянь за другим законом Кірхгофа. Отримана система лінійних алгебраїчних рівнянь у матричній формі запису має вигляд

$$\mathbf{A} \mathbf{I} = \mathbf{C}, \quad (3.4)$$

де \mathbf{A} – матриця коефіцієнтів системи; \mathbf{I} – матриця-стовпець невідомих струмів системи; \mathbf{C} – матриця-стовпець правої частини системи.

Для системи (3.3) матриці \mathbf{A} , \mathbf{I} і \mathbf{C} мають вигляд

$$\mathbf{A} = \begin{bmatrix} 0 & 0 & 0 & -1 & -1 & 0 \\ 0 & 0 & -1 & 1 & 0 & -1 \\ -1 & -1 & 1 & 0 & 0 & 0 \\ R_1 & -R_2 & 0 & 0 & R_5 & 0 \\ 0 & R_2 & R_3 & R_4 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & -R_4 & R_5 & -R_6 \end{bmatrix}, \quad \mathbf{I} = \begin{bmatrix} I_1 \\ I_2 \\ I_3 \\ I_4 \\ I_5 \\ I_6 \end{bmatrix}, \quad \mathbf{C} = \begin{bmatrix} 0 \\ 0 \\ 0 \\ E_1 - E_2 \\ E_2 \\ 0 \end{bmatrix}.$$

Систему алгебраїчних рівнянь (3.4) для складних кіл звичайно розв'язують чисельними методами на ПЕОМ з використанням сучасних пакетів програм, наприклад MATLAB або MATCAD.

При розрахунку схем, в m_j гілках яких є джерела струму, порядок розв'язуваної системи зменшується. Оскільки струми m_j гілок відомі, число незалежних контурів (без джерел струму), для яких необхідно скласти рівняння за другим законом Кірхгофа, дорівнює $k = m - m_j - (n - 1)$.

3.2. Метод вузлових потенціалів

Метод вузлових потенціалів дозволяє зменшити число спільно розв'язуваних рівнянь до $n - 1$, де n - число вузлів схеми заміщення електричного кола. Метод заснований на застосуванні першого закону Кірхгофа і полягає в наступному.

1. Один вузол схеми заміщення приймають за базисний з нульовим потенціалом. Таке допущення не змінює значення струмів у гілках, тому що струм у кожній гілці залежить тільки від різниці потенціалів вузлів, а не від дійсного значення цих потенціалів.

2. Для інших $n - 1$ вузлів складають систему рівнянь за першим законом Кірхгофа, записуючи струми в гілках через потенціали вузлів.

3. Розв'язанням отриманої системи визначають потенціали $n-1$ вузлів відносно базисного, а потім струми гілок за законом Ома.

Розглянемо застосування методу вузлових потенціалів на прикладі схеми кола (рис. 3.2), що містить $n=3$ вузли. Вузол 3 приймаємо за базисний, тобто $\varphi_3 = 0$. Для вузлів 1 і 2 складемо рівняння за першим законом Кірхгофа.

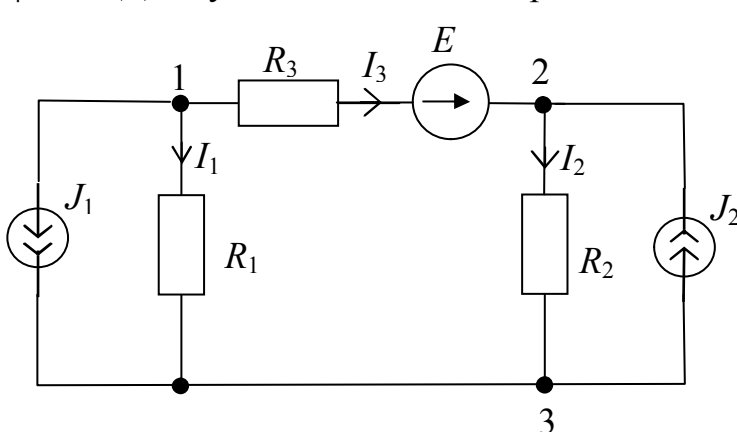


Рис.3.2 - Розрахункова схема

Для вузла 1
 $I_1 + I_3 + J_1 = 0$,
 для вузла 2
 $I_2 - I_3 - J_2 = 0$,

де
 $I_1 = (\varphi_1 - \varphi_3) / R_1 = \varphi_1 / R_1$;
 $I_2 = (\varphi_2 - \varphi_3) / R_2 = \varphi_2 / R_2$;
 $I_3 = (\varphi_1 - \varphi_2 + E) / R_3$.

Після підстановки отриманих значень струмів у рівняння для 1 і 2-го вузлів одержимо систему рівнянь

$$\begin{cases} \left(\frac{1}{R_1} + \frac{1}{R_3}\right)\varphi_1 - \frac{1}{R_3}\varphi_2 = -J_1 - \frac{E}{R_3}, \\ -\frac{1}{R_3}\varphi_1 + \left(\frac{1}{R_2} + \frac{1}{R_3}\right)\varphi_2 = J_2 + \frac{E}{R_3}. \end{cases} \quad (3.5)$$

Матрична форма запису системи (3.5) має вигляд

$$\begin{bmatrix} \frac{1}{R_1} + \frac{1}{R_3} & -\frac{1}{R_3} \\ -\frac{1}{R_3} & \frac{1}{R_2} + \frac{1}{R_3} \end{bmatrix} \times \begin{bmatrix} \varphi_1 \\ \varphi_2 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 1 & 0 \\ 0 & 1 \end{bmatrix} \times \begin{bmatrix} -J_1 & -\frac{E}{R_3} \\ J_2 & \frac{E}{R_3} \end{bmatrix}. \quad (3.6)$$

або в більш зручній формі запису

$$\begin{bmatrix} G_{11} & -G_{12} \\ -G_{21} & G_{22} \end{bmatrix} \times \begin{bmatrix} \varphi_1 \\ \varphi_2 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 1 & 0 \\ 0 & 1 \end{bmatrix} \times \begin{bmatrix} -J_1 & -G_3 E \\ J_2 & G_3 E \end{bmatrix}, \quad (3.7)$$

де G_{11} і G_{22} – власні провідності вузлів 1 і 2, які визначаються як сума провідностей гілок, що підключені відповідно до вузлів 1 і 2; G_{12} і G_{21} – взаємні провідності вузлів 1 і 2 (провідність гілки, що з'єднує вузли 1 і 2); G_3 – провідність гілки з ЕРС E . У нашому випадку $G_{12} = G_3$.

Відзначимо, що перше рівняння системи (3.7) записане відносно вузла 1, а друге – відносно вузла 2. Права частина системи містить вузлові струми, які визначаються як алгебраїчна сума струмів гілок з джерелами струмів і струмів короткого замикання гілок з джерелами ЕРС, що сходяться до розглянутого вузла, причому доданки беруть із знаком плюс (мінус), якщо струм джерела й ЕРС спрямовані до розглянутого вузла (від вузла).

У загальному випадку система (3.7) має вигляд

$$\mathbf{G}_{ik} \varphi_k = \mathbf{I}_{yi}, \quad \text{при } i, k = \overline{1, m - m_j - 1}, \quad (3.8)$$

де \mathbf{G}_{ik} – матриця власних і взаємних провідностей вузлів; φ_k – матриця-стовпець шуканих потенціалів вузлів; \mathbf{I}_{yi} – матриця-стовпець вузлових струмів.

Метод вузлових потенціалів ефективніший за метод контурних струмів у випадку, якщо число вузлів у схемі менше або дорівнює числу незалежних контурів. Він особливо ефективний при розрахунку електричних кіл з двома вузлами й великою кількістю паралельних гілок. У цьому випадку, якщо прийняти потенціал одного з вузлів рівним нулю, наприклад $\varphi_2 = 0$, то напруга між вузлами буде дорівнювати потенціалу іншого вузла:

$$U_{12} = \varphi_1 \frac{I_{y1}}{G_{i1}} = \frac{\sum_{k=1}^m E_k G_k}{\sum_{k=1}^n G_k}, \quad (3.9)$$

де n – число паралельних гілок кола; m – число гілок, що містять джерела ЕРС.

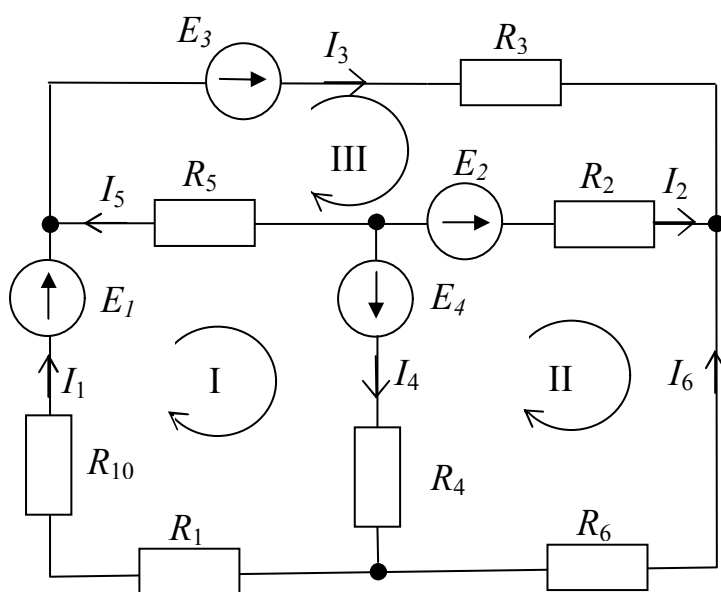
У деяких випадках метод вузлових потенціалів називають методом вузлових напруг, а його окремий випадок для двох вузлів – методом вузлової напруги.

3.3. Метод контурних струмів

Метод контурних струмів дозволяє зменшити загальне число m спільно розв'язуваних рівнянь на $(n - 1)$ і звести систему до числа $k = m - (n - 1)$ рівнянь, що складені за другим законом Кірхгофа. Даний метод використовує поняття про *контурні струми*, під якими розуміють *розрахункові (умовні) струми, що замикаються тільки у своїх контурах*.

Розглянемо схему кола на рис. 3.3. Розіб'ємо її на три дотичні контури й умовимося, що по кожному з них протікає свій контурний струм I_I, I_{II}, I_{III} . Напрямок цих струмів задамо за годинниковою стрілкою. Зіставляючи контурні струми із струмами гілок, напрямок яких також нанесено на схему, можна встановити, що величини контурних струмів збігаються з величинами дійсних струмів тільки в зовнішніх гілках:

$$I_1 = I_I, \quad I_{II} = -I_6, \quad I_{III} = I_3. \quad (3.10)$$



Струми ж суміжних гілок дорівнюють різниці контурних струмів сусідніх контурів:

$$\begin{aligned} I_2 &= I_{II} - I_{III}, \\ I_4 &= I_I - I_{II}, \\ I_5 &= I_{III} - I_I. \end{aligned} \quad (3.11)$$

Отже за відомими контурними струмами схеми можна визначити дійсні струми її гілок. Для знаходження контурних струмів даної схеми досить скласти тільки три рівняння для кожного з контурів:

Рис. 3.3 - Схема складного кола для визначення струмів за методом контурних струмів

$$\begin{cases} (R_1 + R_{10} + R_5 + R_4) \cdot I_I - R_4 \cdot I_{II} - R_5 \cdot I_{III} = E_1 + E_4; \\ (R_2 + R_6 + R_4) \cdot I_{II} - R_4 \cdot I_I - R_2 \cdot I_{III} = E_2 - E_4; \\ (R_2 + R_5 + R_3) \cdot I_{III} - R_5 \cdot I_I - R_2 \cdot I_{II} = E_3 - E_2. \end{cases} \quad (3.12)$$

Розв'язуючи отриману систему рівнянь, знайдемо контурні струми, а за ними - дійсні струми гілок.

Метод контурних струмів часто використовують для доказу інших можливих методів розрахунку, для аналізу кіл у загальному вигляді. У цьому випадку рівняння контурних струмів записують в узагальненому вигляді. Для цього *сумарний опір даного контуру позначають двома нижніми індексами, що вказують номер контуру, і називають його власним опором контуру*.

Так, власні опори трьох контурів схеми дорівнюють:

$$\begin{cases} R_{11} = R_1 + R_{10} + R_5 + R_4; \\ R_{22} = R_2 + R_6 + R_4; \\ R_{33} = R_2 + R_5 + R_3. \end{cases} \quad (3.13)$$

Загальні опори суміжних контурів розглядають як коефіцієнти при струмах і позначають двома нижніми індексами, що вказують, між якими сусідніми контурами включений цей опір. Наприклад, для розглянутої схеми

$$R_{12} = R_4, \quad R_{13} = R_5, \quad R_{23} = R_2. \quad (3.14)$$

З огляду на ці позначення рівняння (3.12) можна переписати у загальному вигляді:

$$\begin{cases} R_{11} \cdot I_I - R_{12} \cdot I_{II} - R_{13} \cdot I_{III} = E_I; \\ -R_{21} \cdot I_I + R_{22} \cdot I_{II} - R_{23} \cdot I_{III} = E_{II}; \\ -R_{31} \cdot I_I - R_{32} \cdot I_{II} + R_{33} \cdot I_{III} = E_{III}. \end{cases} \quad (3.15)$$

ЕРС у цих рівняннях

$$E_I = E_1 + E_4, \quad E_{II} = E_2 - E_4 \quad \text{і} \quad E_{III} = E_3 - E_2 \quad (3.16)$$

є контурними ЕРС, величини яких визначають алгебраїчним підсумовуванням окремих ЕРС гілок даного контуру. При цьому ЕРС, що збігаються з напрямком контурного струму, підсумовують із знаком "плюс".

Матрична форма запису системи (3.15) має вигляд

$$\begin{bmatrix} R_{11} & -R_{12} & -R_{13} \\ -R_{21} & R_{22} & -R_{23} \\ -R_{31} & -R_{32} & R_{33} \end{bmatrix} \times \begin{bmatrix} I_I \\ I_{II} \\ I_{III} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} E_I \\ E_{II} \\ E_{III} \end{bmatrix}, \quad (3.17)$$

де коефіцієнти матриці-стовпця контурних ЕРС визначають співвідношеннями (3.16). У загальному випадку для схеми довільної конфігурації система рівнянь контурних струмів має вигляд

$$\mathbf{R} \cdot \mathbf{I} = \mathbf{E}, \quad (3.18)$$

де \mathbf{R} - квадратна матриця коефіцієнтів при невідомих контурних струмах; \mathbf{I} - матриця-стовпець невідомих контурних струмів; \mathbf{E} - матриця-стовпець контурних ЕРС.

Розв'язання системи рівнянь (3.18) має вигляд

$$\mathbf{I} = \mathbf{R}^{-1} \cdot \mathbf{E}, \quad (3.19)$$

де \mathbf{R}^{-1} - матриця, зворотна матриці коефіцієнтів \mathbf{R} .

3.4. Принцип суперпозиції (метод накладання)

Принцип суперпозиції (накладання) є одним з найважливіших фізичних принципів, які використовують при розгляді явищ, що виникають під впливом декількох причин. Складні явища за цим принципом підрозділяють на більш прості, в яких діє кожна з причин окремо незалежно від інших, а результати цих впливів (відгуки), накладаючись один на одного, утворюють сумарний відгук.

Стосовно до електричних кіл **принцип суперпозиції** полягає в тому, що **вплив декількох джерел на будь-який елемент кола можна розглядати як результат підсумовування впливів на цей елемент кожної з ЕРС джерела окремо, незалежно від інших.**

Метод розрахунку кола, що використовує принцип суперпозиції, називається методом накладання. За допомогою цього методу розрахунок складного кола з декількома ЕРС зводять до розрахунку декількох кіл з одним джерелом живлення. Струм у будь-якій гілці розглядають як результат накладання струмів, що виходять від окремих ЕРС, які діють незалежно одна від одної.

Розглянемо порядок розрахунку за методом накладання на прикладі схеми на рис. 3.1. Для визначення струмів спочатку вважаємо, що в ній діє тільки ЕРС E_1 . Визначення часткових струмів I'_1, I'_2, \dots, I'_6 окремих гілок від ЕРС зводимо до розрахунку схеми кола на рис. 3.4,а. Далі повторюємо розрахунок по черзі для всіх інших ЕРС. У нашому випадку для ЕРС E_2 , за схемою кола рис. 3.4,б визначаємо часткові струми $I''_1, I''_2, \dots, I''_6$.

Алгебраїчне підсумовування часткових струмів дає значення дійсних струмів гілок, позитивні напрямки яких повинні бути попередньо нанесені на вихідну схему (рис. 3.1).

З урахуванням напрямків часткових і результуючих струмів одержимо:

$$\begin{cases} I_1 = I'_1 - I''_1, \\ I_2 = -I'_2 + I''_2, \\ \dots \dots \dots \\ I_6 = -I'_6 - I''_6. \end{cases} \quad (3.20)$$

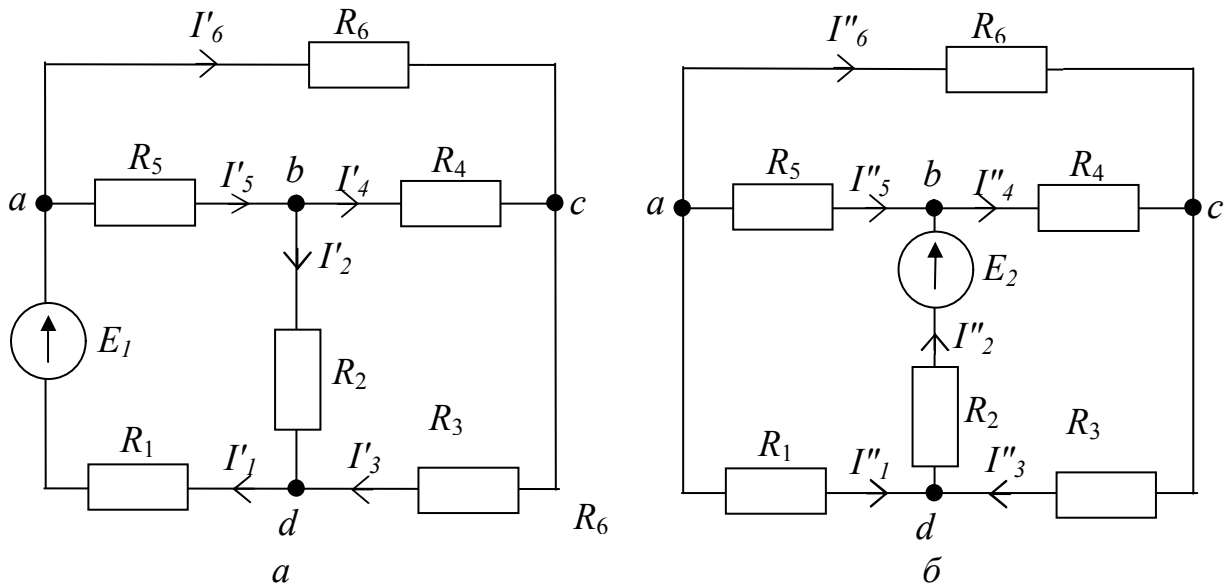


Рис. 3.4 - Схеми кола для визначення струмів за методом накладання від ЕРС E_1 (а) і E_2 (б)

Число доданків у системі рівнянь (3.20) дорівнює числу ЕРС схеми.

Необхідно звернути увагу на те, що метод накладання не можна застосувати до розрахунку потужностей, оскільки значення останніх пропорційні квадратам струмів.

3.5. Принцип взаємності

Лінійні електричні кола постійного струму з одним джерелом живлення мають властивість взаємності (оборотності). Вона полягає в тому, що коли ЕРС E гілки n кола викликає струм I_k у гілці k , то ця ж ЕРС, діючи в гілці k , викличе в гілці n струм I_k тієї ж величини $I_n = I_k$.

Розглянемо принцип взаємності на прикладі схем кіл рис. 3.5. ЕРС E першої гілки схеми на рис. 3.5,а викликає в резисторі R_5 струм I_5 , який дорівнює

третьому контурному струму $I_{III} = I_5$. Щоб знайти струм I_{III} за допомогою визначників, запишемо для кожного з контурів їхні ЕРС, власні й загальні опори.

Для контуру I:

$$E_I = E, \quad R_{11} = R_1 + R_2, \quad R_{12} = R_2, \quad R_{13} = 0.$$

Для контуру II:

$$E_{II} = 0, \quad R_{22} = R_2 + R_3 + R_4, \quad R_{21} = R_2, \quad R_{23} = R_4.$$

Для контуру III:

$$E_{III} = 0, \quad R_{33} = R_4 + R_5, \quad R_{32} = R_4, \quad R_{31} = 0.$$

Струм третього контуру ($k = 3$) від ЕРС першого контуру ($n = 1$)

$$I_3 = \sum_{n=1}^3 \frac{A_{nk}}{\Delta} E_n = \frac{A_{13}}{\Delta} E_I + \frac{A_{23}}{\Delta} E_{II} + \frac{A_{33}}{\Delta} E_{III},$$

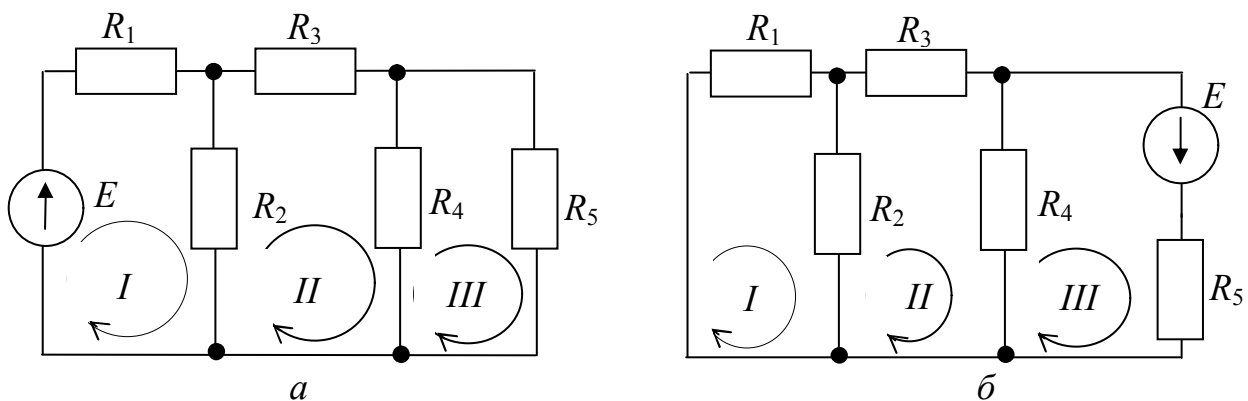


Рис. 3.5 - Схеми кола для застосування принципу взаємності для струмів I_5 (а) і I_1 (б)

або

$$I_{III} = I_5 = \frac{A_{13}}{\Delta} E_1 = \frac{A_{13}}{\Delta} E. \quad (3.21)$$

Визначник системи Δ , його мінор M_{13} і алгебраїчне доповнення A_{13} відповідно дорівнюють:

$$\Delta = \begin{vmatrix} r_{11} & -r_{12} & -r_{13} \\ -r_{21} & r_{22} & -r_{23} \\ -r_{31} & -r_{32} & r_{33} \end{vmatrix}, \quad M_{13} = \begin{vmatrix} -r_{21} & r_{22} \\ -r_{31} & -r_{23} \end{vmatrix} = r_{21}r_{23} + r_{22}r_{31},$$

$$A_{13} = (-1)^{1+3} M_{13} = M_{13}.$$

Для схеми кола на рис. 3.5,б власні й загальні опори, а, отже, і визначник Δ залишаться без зміни. Контурні ЕРС цієї схеми: $E_I = 0$, $E_{II} = 0$ і $E_{III} = E$. Тому струм першого контуру ($k = 1$) від ЕРС третього контуру ($k = 3$):

$$I_{k=1} = \sum_{n=1}^3 \frac{A_{nk}}{\Delta} E_n = \frac{A_{11}}{\Delta} E_1 + \frac{A_{21}}{\Delta} E_{II} + \frac{A_{31}}{\Delta} E_{III},$$

або

$$I_I = \frac{A_{31}}{\Delta} E_{III} = \frac{A_{31}}{\Delta} E. \quad (3.22)$$

Міnor M_{31} одержуємо з визначника Δ викреслюванням в ньому третього рядка й першого стовпця:

$$M_{31} = \begin{vmatrix} -r_{12} & -r_{13} \\ r_{22} & -r_{23} \end{vmatrix} = r_{12}r_{23} + r_{22}r_{13}.$$

Алгебраїчне доповнення

$$A_{31} = (-1)^{3+1} M_{13} = M_{31}.$$

Значення $A_{13} = A_{31}$, тому згідно з (3.21) і (3.22) $I_1 = I_{III} = I_5$.

3.6. Метод еквівалентного генератора

У деяких випадках буває необхідним досліджувати режими роботи однієї з гілок складного електричного кола при зміні опору цієї ж гілки. При цьому немає потреби робити громіздкий розрахунок всього кола яким-небудь з розглянутих вище методів, а доцільніше скористатися методом еквівалентного генератора. Відповідно до цього методу *вплив усіх джерел складного електричного кола на досліджувану гілку можна замінити впливом послідовно з'єднаного з гілкою еквівалентного генератора*, що має ЕРС $E_{\text{екв}}$ і внутрішній опір $R_{\text{екв}}$.

Покажемо можливість такої заміни для визначення струму в гілці резистора з опором R , що змінюється (схема кола на рис. 3.6,а). Нехай ЕРС E_1, E_2, E_3 і опори R_1, R_2, R_3 резисторів цієї схеми задані. Для встановлення залежності струму від опору R виділимо цю гілку, а іншу частину схеми укладемо в пунктирний прямокутник, показавши затискачі a й b , за допомогою яких вона з'єднується з досліджуваною гілкою (рис. 3.6,б). Виділена частина схеми, що має два затискачі, є активним двополюсником А. Буква А у прямокутнику схеми на рис. 3.6,б показує, що результуючий вплив ЕРС E_1, E_2 і E_3 на досліджувану гілку не дорівнює нулю.

Включимо до досліджуваної гілки дві рівні за величиною й протилежні за напрямком ЕРС E' і E'' (рис. 3.6,в). Струм I гілки від цього не зміниться й буде дорівнювати струму вихідної схеми на рис. 3.6,б.

Струм I схеми на рис. 3.6,в розглядаємо як результат накладання струмів I_a схеми рис. 3.6,г від дії ЕРС E', E_1, E_2, E_3 і струму I_b схеми на рис. 3.6,д від дії ЕРС E'' . Гілки частини схеми на рис. 3.6,д, укладеної в прямокутник, є пасивними, тому вони позначені буквою П.

Щоб струм I досліджуваної гілки дорівнював струму I_b схеми на рис. 3.6,д, у схемі на рис. 3.6,г ЕРС E' вибираємо такої величини, щоб струм I_a дорівнював нулю. Ця умова може бути дотримана, якщо ЕРС E' дорівнюватиме напрузі холостого ходу між затискачами a й b схеми: $E' = U_{ab,xx}$.

Значення ЕРС E' для цих умов можна визначити й аналітично. У цьому випадку для схеми на рис. 3.6,г складемо рівняння для струму, користуючись законом Ома для ділянки з ЕРС E' і напругою U_{ab} :

$$I_a = \frac{U_{ab} - E'}{R}.$$

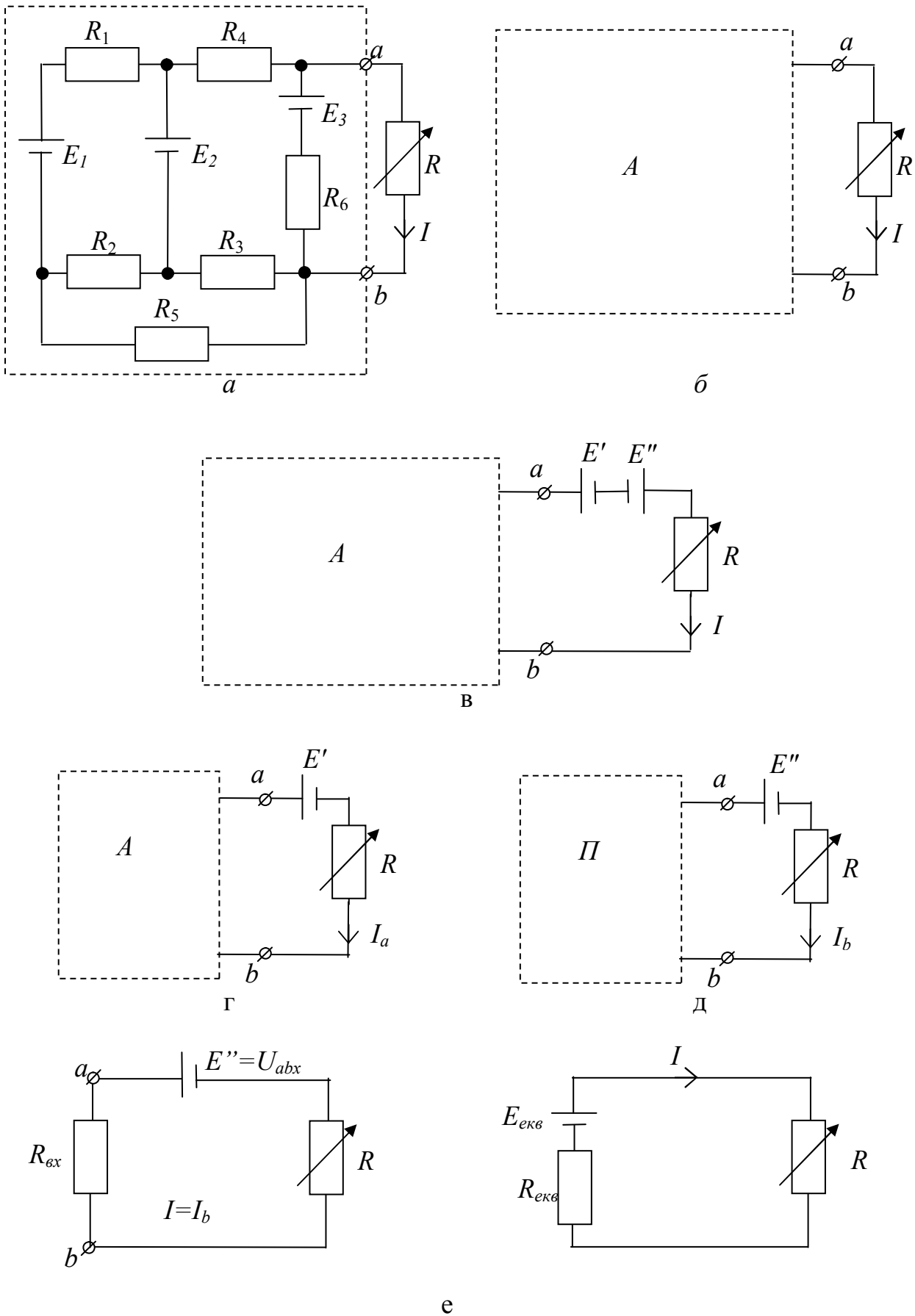


Рис.3.6 - Схема мережі для розрахунку за методом еквівалентного генератора

З цього рівняння видно, що при струмі I_a рівному нулю, ЕРС E' дорівнює напрузі холостого ходу $U_{ab,xx}$ між затискачами a й b схеми.

Таким чином, для визначення струму I вихідної схеми досить розглянути тільки схему на рис. 3.6,д з діючою у ній ЕРС $E'' = E' = U_{ab,xx}$. Ця схема складається з послідовно з'єднаних резистивного елемента з опором R досліджуваної гілки й резистивного елемента з опором іншої частини кола щодо затискачів a і b (рис. 3.6,е).

Для визначення вхідного опору щодо затискачів лівої частини схеми на рис. 3.6,д необхідно виконати перетворення опорів пасивного двополюсника на еквівалентний опір, що дорівнює вхідному опору R_{ab} . Послідовність перетворень показана на рис.3.7. Визначаємо еквівалентний опір між точками 1-2:

$$R_{12} = \frac{R_1 \cdot R_2}{R_1 + R_2} .$$

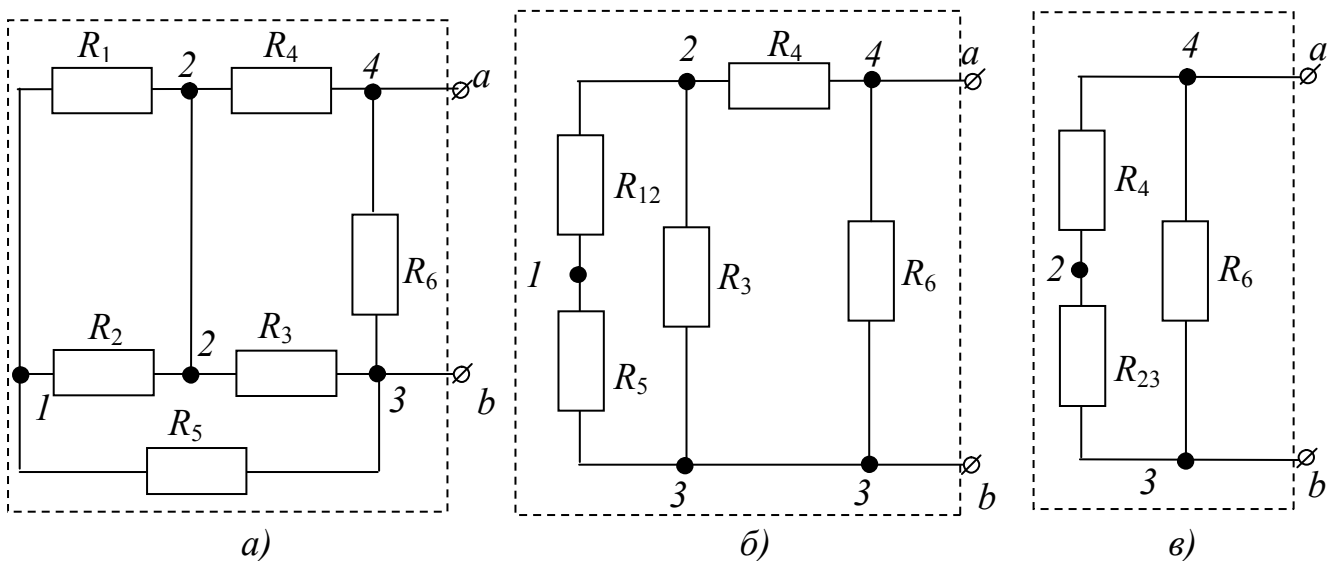


Рис.3.7 - Послідовність перетворення опорів пасивного двополюсника

Еквівалентний опір між точками 2-3

$$R_{23} = \frac{R_3(R_{12} + R_5)}{R_3 + R_{12} + R_5} .$$

Вхідний опір схеми:

$$R_{BX} = R_{43} = \frac{R_6(R_4 + R_{23})}{R_6 + R_4 + R_{23}} . \quad (3.23)$$

Вплив ЕРС $E'' = U_{ab,xx}$ на опір R схеми на рис. 3.6,е можна представити як вплив еквівалентного генератора з ЕРС $E_{екв}$, що дорівнює напрузі холостого ходу між затискачами ab , до яких підключена досліджувана гілка:

$$E_{екв} = E'' = U_{ab,xx} . \quad (3.24)$$

Внутрішній опір еквівалентного генератора дорівнює вхідному опору іншої пасивної частини кола щодо затискачів a і b , до яких приєднана досліджувана гілка:

$$R_{екв} = R_{ex} . \quad (3.25)$$

Знаючи ЕРС $E_{\text{екв}}$ і внутрішній опір $R_{\text{екв}}$ еквівалентного генератора (рис. 3.6,е), можна визначити струм досліджуваної гілки:

$$I = \frac{E_{\text{екв}}}{R + R_{\text{екв}}} \quad (3.26)$$

Описаний метод визначення струму в одній гілці складного електричного кола називають **методом еквівалентного генератора або методом активного двополюсника**. Методом еквівалентного генератора він називається тому, що вплив на досліджувану гілку всієї іншої частини кола замінюють впливом еквівалентного генератора. Методом активного двополюсника його називають тому, що стосовно досліджуваної гілки іншу частину кола, приєднану до досліджуваної гілки з двома вихідними затискачами a й b , називають двополюсником. Загальний опір гілок, що утворюють пасивний двополюсник (рис. 3.6,д) щодо затискачів a й b , називають **вхідним опором двополюсника**. Він дорівнює внутрішньому опору еквівалентного генератора.

Контрольні запитання з теми 3

1. Чому дорівнює число незалежних вузлів (контурів) схеми довільної конфігурації?
2. Як вибирають базисний вузол у методі вузлових потенціалів?
3. Скільки рівнянь складають за методом вузлових потенціалів?
4. Поясніть порядок розрахунку схеми методом вузлових потенціалів.
5. Поясніть матричну форму запису рівнянь за методом вузлових потенціалів.
6. Поясніть переваги методу вузлових потенціалів.
7. Що розуміють під контурним струмом?
8. Як вибирають напрямки обходу контурів у методі контурних струмів?
9. Поясніть матричну форму запису рівнянь за методом контурних струмів.
10. Поясніть суть принципу суперпозиції.
11. Поясніть суть принципу взаємності.
12. Поясніть суть методу еквівалентного генератора.
13. В яких випадках краще застосовувати метод еквівалентного генератора?

Задачі до тем 2 і 3 і приклади їхнього розв'язання

Задача 3.1. Для електричного кола на рис. 3.7 визначити струм I , напругу на затискачах споживача $U_{\text{н}}$, потужність джерела живлення P_1 і потужність $P_{\text{н}}$ зовнішнього кола, ККД джерела живлення. Побудувати зовнішню характеристику $U(I)$ джерела живлення. Вихідні дані для розрахунку: ЕРС джерела живлення E , внутрішній опір джерела живлення R_0 , опір навантаження $R_{\text{н}}$ - подані в табл. 3.1.

Таблиця 3.1

Параметр	Варіант завдання										
	К	0	1	2	3	4	5	6	7	8	9
E, B	10	10	10	10	12	12	12	15	15	15	15
$R_0, \text{Ом}$	1	1	0,5	0,5	1	1	0,5	1	1	0,5	0,5
$R_H, \text{Ом}$	4	6	3,5	5,5	5	7	7,5	4	5	5,5	6,5

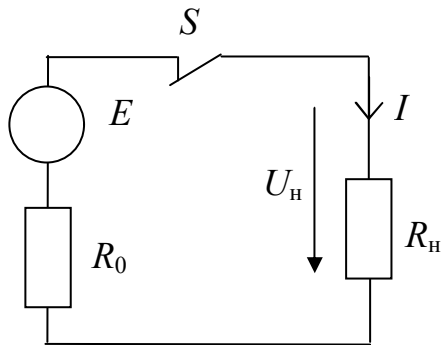


Рис.3.7 - Схема кола до задачі 3.1

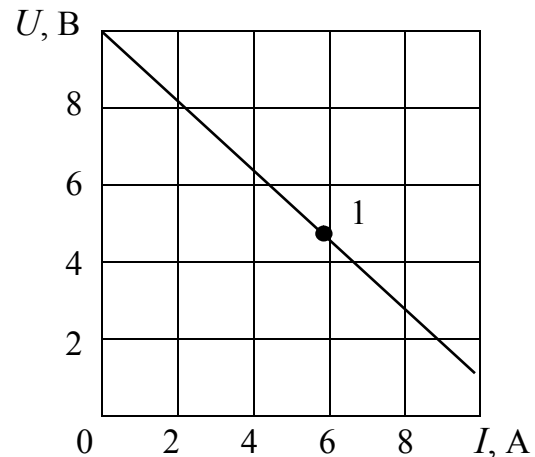


Рис.3.8 - Зовнішня характеристика джерела живлення

Розв'язання задачі для варіанта К.

За законом Ома для всього кола визначаємо величину струму навантаження:

$$I = \frac{E}{R_0 + R_H} = \frac{10}{1 + 4} = 2 \text{ A.}$$

Напруга на затискачах джерела живлення й споживача:

$$U = U_H = R_H \cdot I = 4 \cdot 2 = 8 \text{ В.}$$

Потужність джерела живлення: $P_1 = E \cdot I = 10 \cdot 2 = 20 \text{ Вт.}$

Потужність зовнішнього кола (на навантаженні): $P_H = U_H \cdot I = 8 \cdot 2 = 16 \text{ Вт.}$

Втрати потужності усередині джерела: $P_0 = I^2 \cdot R_0 = 2^2 \cdot 1 = 4 \text{ Вт.}$

ККД: $\eta = P_H / P_1 = 16 / 20 = 0,8$ або 80%.

Зовнішня характеристика джерела живлення $U(I)$ при постійних значеннях E і P_{XX} :

при холостому ході (контакти вимикача S розімкнуті) $I = I_{XX} = 0$;
 $U = U_{XX} = E = 10 \text{ В};$

при короткому замиканні (вимикач S замкнений і $R_H = 0$) $I = I_{KЗ} = E / R_0 = 10 / 1 = 10 \text{ А};$
 $U_{KЗ} = R_{KЗ} \cdot I_{KЗ} = 0.$

Залежність $U(I)$ є лінійною, тому дані режимів холостого ходу й короткого замикання визначають зовнішню характеристику джерела живлення (рис. 3.8). З неї і значень струму навантаження I можна визначити відповідну напругу U джерела. Наприклад, для точки 1 при $I = 6 \text{ А}$, напруга $U = 10 - 6 = 4 \text{ В}$, оскільки за другим законом Кірхгофа $U = E - R_0 I$.

Рівняння балансу потужностей (потужність джерела живлення дорівнює потужності, виділеній у вигляді теплоти в опорах R_0 і R_H):

$$E I = R_0 \cdot I^2 + R_H I^2; \quad 10 \cdot 2 = 1 \cdot 2^2 + 4 \cdot 2^2; \quad 20 = 20 \text{ Вт.}$$

Задача 3.2. Для умов задачі 3.1 побудувати залежність напруги U на затискачах джерела живлення, потужності джерела живлення P_1 , втрат потужності P_0 і ККД η установки від струму I при зміні опору навантаження в межах $R_H = 0 \div \infty$. ЕРС джерела живлення вважати незмінним.

Розв'язання задачі для варіанта К.

Порядок розрахунку для $R_H = 4$ Ом наведений у задачі 3.1. Для інших значень навантаження результати розрахунку подані в табл. 3.2.

На рис. 3.9. наведені графіки зміни відповідних величин у функції струму навантаження.

Таблиця 3.2

R_H	0	0,5	1	2	4	6	7	9	∞
I, A	10	6,7	5	3,3	2	1,4	1,2	1	0
U, B	0	3,3	5	6,7	8	8,6	8,8	9	10
$P_1, Bт$	100	66,7	50	33,3	20	14,3	12,5	10	0
$P_2, Bт$	0	22,2	25	22,2	16	12,3	10,9	1	0
$P_0, Bт$	100	44,4	25	11,1	4	2,1	1,6	1	0
η	0	0,3	0,3	0,7	0,8	0,85	0,88	0,9	1

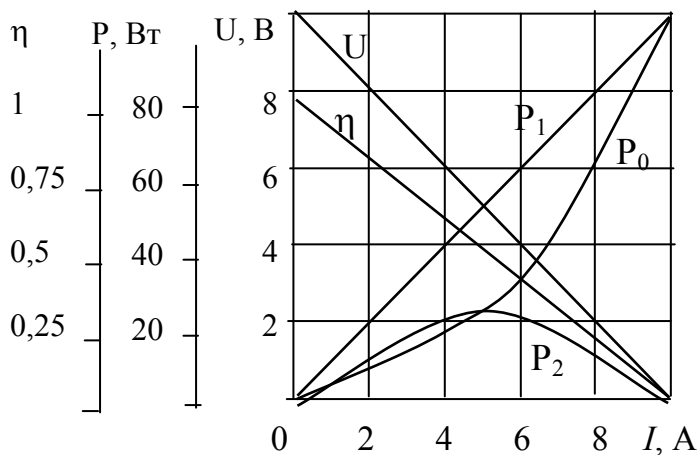


Рис.3.9 - Розрахункові графіки

Задача 3.3. Для електричного кола постійного струму (рис. 3.10) визначити еквівалентний опір споживача $R_{12екв}$, струм навантаження, напругу на затискачах споживача U_{12} , потужність споживача P_{12} і потужність джерела живлення P_1 , ККД установки, скласти баланс потужностей. Вихідні дані: положення вимикачів S1 – S4, ЕРС джерела E, внутрішній опір джерела R_0 , опори резисторів $R_1 – R_4$ для від-

повідних варіантів наведені в табл. 3.3.

Таблиця 3.3

Параметр	Варіант завдання										
	К	0	1	2	3	4	5	6	7	8	9
Замкнуті вимикачі	S1	S1	S2	S3	S4		S1	S2	S3	S4	
E, B	12	10	10	10	10	10	8	8	8	8	8
$R_0, Ом$	0,5	0,6	0,6	0,6	0,6	0,6	0,4	0,4	0,4	0,4	0,4
$R_1, Ом$	6	5	5	5	7	7	6	5	5	5	5
$R_2, Ом$	6	4	5	5	5	6	5	6	5	6	6
$R_3, Ом$	5	6	6	5	6	7	5	5	4	4	5
$R_4, Ом$	5	5	5	5	7	6	5	5	4	5	4

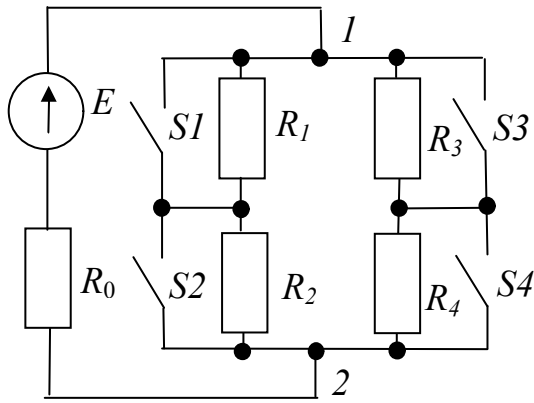


Рис.3.10 - Схема кола до задачі 3.3

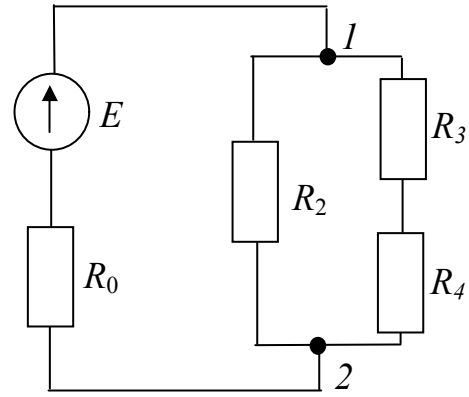


Рис.3.11 - Схема кола за варіантом К

Розв'язання задачі для варіанта К.

З урахуванням того, що вимикач *S1* для нашого варіанта замкнутий, схема кола має вигляд, показаний на рис. 3.11.

Еквівалентний опір споживача

$$R_{12\text{екв}} = \frac{R_2 \cdot (R_3 + R_4)}{R_2 + R_3 + R_4} = \frac{6 \cdot (5 + 5)}{6 + 5 + 5} = 3,75 \text{ Ом.}$$

Струм навантаження

$$I = \frac{E}{R_0 + R_{12\text{екв}}} = \frac{12}{0,5 + 3,75} \approx 2,82 \text{ А.}$$

Напруга на затискачах споживача

$$U_{12} = I \cdot R_{12\text{екв}} = 2,82 \cdot 3,75 \approx 10,59 \text{ В.}$$

Потужність споживача

$$P_H = I \cdot U_{12} = 2,82 \cdot 10,59 = 29,9 \text{ Вт.}$$

Потужність джерела живлення

$$P_{\text{джс}} = I \cdot E = 2,82 \cdot 12 = 33,84 \text{ Вт.}$$

ККД установки

$$\eta = \frac{P_H}{P_{\text{джс}}} = \frac{29,9}{33,84} \approx 0,88$$

Баланс потужностей

$$\begin{aligned} P_{\text{джс}} &= \Delta P_{\text{джс}} + P_H = R_0 \cdot I^2 + P_H, \\ 33,84 &\approx 0,5 \cdot 2,82^2 + 29,9, \\ 33,84 &\approx 33,85. \end{aligned}$$

Абсолютна похибка розрахунку

$$\Delta = 33,85 - 33,84 = 0,01 \text{ Вт.}$$

Відносна похибка розрахунку

$$\delta = \frac{\Delta}{P_{\text{серед}}} = \frac{0,01}{(33,85 + 33,84)/2} \cdot 100\% = 0,03\%$$

Отримана точність цілком прийнятна для інженерних розрахунків.

Задача 3.4. Для електричного кола (рис. 3.12) визначити струми в гілках, напруги на всіх елементах кола, напругу U_{13} між вузлами 1-3, потужність і режим роботи джерела з ЕРС E_1 , потужність приймача з опором R_3 . Вихідні дані наведені в табл.3.4.

Таблиця 3.4

Параметр	Варіант завдання										
	К	0	1	2	3	4	5	6	7	8	9
E_1, B	12	10	10	12	12	10	12	13	14	15	10
E_2, B	13,5	12	14	14	12	10	10	11	12	10	15
$R_{01}, Ом$	0,05	0,1	0,1	0,05	0,05	0,1	0,1	0,05	0,1	0,1	0,1
$R_{02}, Ом$	0,1	0,1	0,2	0,1	0,05	0,1	0,05	0,05	0,1	0,1	0,1
$R_3, Ом$	3	4	5	4	4	3	4	4	5	6	4
$R_4, Ом$	4	4	3	5	4	3	5	5	5	4	6
$R_5, Ом$	4	3	3	5	4	3	5	5	5	4	6

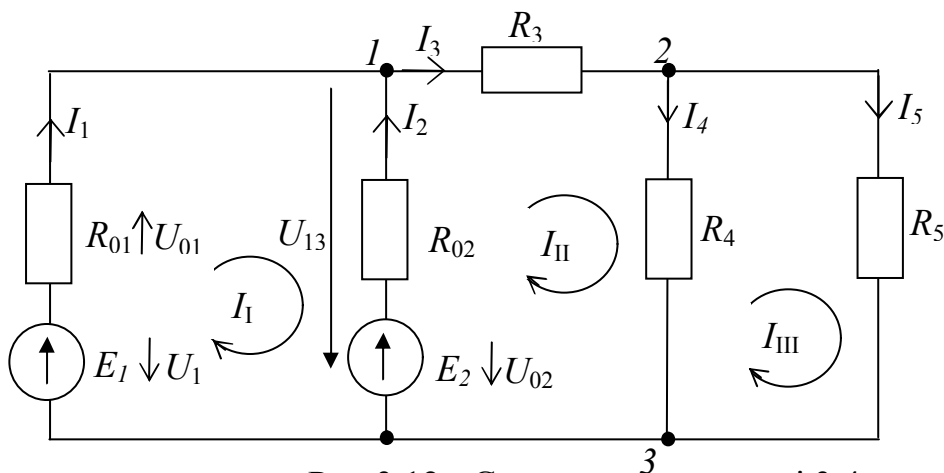


Рис.3.12 - Схема кола до задачі 3.4

Розв'язання задачі для варіанта К.

Схема кола має три вузли й п'ять гілок. Для знаходження струмів у гілках потрібно скласти п'ять рівнянь: два рівняння за 1-м законом Кірхгофа й три рівняння за 2-м законом Кірхгофа.

Задаємося напрямками струмів у гілках і обходу контурів (I, II і III-го) і наносимо їх на схему.

Записуємо рівняння за 1-м законом Кірхгофа для вузлів 1 і 2 і за 2-м законом Кірхгофа для обраних контурів. Система має вигляд:

$$\begin{aligned} \text{для вузла 1} \quad & I_1 + I_2 - I_3 = 0, \\ \text{для вузла 2} \quad & I_3 - I_4 - I_5 = 0, \\ \text{для контуру I} \quad & R_{01} \cdot I_1 + R_{02} \cdot I_2 = E_1 - E_2, \\ \text{для контуру II} \quad & R_{02} \cdot I_2 + R_3 \cdot I_3 + R_4 \cdot I_4 = E_2, \\ \text{для контуру III} \quad & -R_4 \cdot I_4 + R_5 \cdot I_5 = 0. \end{aligned}$$

Розв'язання системи дає значення струмів у гілках:

$$I_1 = -7,93 \text{ А}; I_2 = 11,03 \text{ А}; I_3 = 3,1 \text{ А}; I_4 = I_5 = 1,55 \text{ А}.$$

Оскільки струм I_1 вийшов зі знаком мінус, то його дійсний напрямок протилежний прийнятому на схемі (рис. 3.12).

Напруги на резисторах визначаємо за законом Ома:

$$U_3 = R_3 \cdot I_3 = 2 \cdot 3,1 = 6,2 \text{ В}; \quad U_4 = R_4 \cdot I_4 = 4 \cdot 1,55 = 6,2 \text{ В};$$

$$U_5 = R_5 \cdot I_5 = 4 \cdot 1,55 = 6,2 \text{ В}.$$

Напругу між вузлами 1 і 3 знаходимо використовуючи другий закон Кірхгофа:

$$E_2 = U_{02} + U_{13}; \quad U_{13} = E_2 - U_{02} = E_2 - R_{02} \cdot I_2 = 13,5 - 0,1 \cdot 11 = 12,4 \text{ В}.$$

Потужність джерела ЕРС E_2

$$P_2 = E_2 \cdot I_2 = 13,5 \cdot 11 = 148,5 \text{ Вт}.$$

Потужність приймача

$$P_3 = R_3 \cdot I_3^2 = U_3 \cdot I_3 = 6,2 \cdot 3,1 = 19,2 \text{ Вт}.$$

У джерелі ЕРС E_1 струм і ЕРС спрямовані назустріч. Це означає, що при заданих умовах завдання, воно споживає електричну енергію.

Оскільки джерело ЕРС E_1 працює в режимі споживання електричної енергії, тобто є електроприймачем, то рівняння балансу потужностей має вигляд

$$E_2 \cdot I_2 = E_1 \cdot I_1 + R_{01} \cdot I_1^2 + R_{02} \cdot I_2^2 + R_3 \cdot I_3^2 + R_4 \cdot I_4^2 + R_5 \cdot I_5^2.$$

Після підстановки отриманих значень маємо

$$13,5 \cdot 11 = 12 \cdot 7,9 + 0,05 \cdot 7,9^2 + 0,1 \cdot 11^2 + 2 \cdot 3,1^2 + 4 \cdot 1,55^2.$$

$$148,5 \text{ Вт} = 148,5 \text{ Вт}.$$

Отримана рівність підтверджує правильність розрахунку.

Задача 3.5. Для схеми електричної мережі й вихідних даних завдання 3.4 визначити струми в гілках електричного кола методом контурних струмів.

Розв'язання задачі для варіанта К.

Система рівнянь контурних струмів для заданої схеми (рис.3.12) має вигляд

$$\begin{cases} R_{11} I_I - R_{12} \cdot I_{II} - R_{13} \cdot I_{III} = E_I; \\ -R_{21} \cdot I_I + R_{42} \cdot I_{II} - R_{23} \cdot I_{III} = E_{II}; \\ -R_{31} \cdot I_I - R_{32} \cdot I_{II} + R_{33} \cdot I_{III} = E_{III}, \end{cases}$$

де опори й контурні ЕРС мають наступні значення:

$$R_{11} = R_{01} + R_{01} = 0,15 \text{ Ом}; \quad R_{22} = R_{02} + R_2 + R_4 = 6,1 \text{ Ом};$$

$$R_{33} = R_4 + R_5 = 8 \text{ Ом}; \quad R_{12} = R_{21} = -R_{02} = -0,1 \text{ Ом};$$

$$R_{13} = R_{31} = 0; \quad R_{23} = R_{32} = -R_4 = -4 \text{ Ом};$$

$$E_I = E_1 - E_2 = -1,5 \text{ В}; \quad E_{II} = E_2 = 13,5 \text{ В}; \quad E_{III} = 0.$$

Розв'язавши отриману систему рівнянь контурних струмів, одержимо їхні значення $I_I = -7,93 \text{ А}$, $I_{II} = 3,1 \text{ А}$, $I_{III} = 1,55 \text{ А}$.

Далі знаходимо струми в гілках:

$$I_1 = I_I = -7,93 \text{ А}, \quad I_2 = I_{II} - I_I = 11,03 \text{ А}, \quad I_3 = I_{II} = 3,1 \text{ А},$$

$$I_4 = I_{II} - I_{III} = 1,55 \text{ А}, \quad I_5 = I_{III} = 1,55 \text{ А}.$$

Як ми відзначали раніше, знак мінус у струмів I_I і I_1 означає, що їхні дійсні напрямки протилежні прийнятим на схемі заміщення.

Задача 3.6. Для схеми електричної мережі й вихідних даних завдання 3.4 визначити струми в гілках електричного кола методом вузлових потенціалів.

Розв'язання задачі для варіанта К.

Визначаємо значення коефіцієнтів матриці провідностей системи вузлових потенціалів (3.8):

$$G_{11} = \frac{1}{R_{01}} + \frac{1}{R_{02}} + \frac{1}{R_3} = \frac{1}{0,05} + \frac{1}{0,1} + \frac{1}{2} = 30,5 \text{ См},$$

$$G_{22} = \frac{1}{R_3} + \frac{1}{R_4} + \frac{1}{R_5} = \frac{1}{0,05} + \frac{1}{2} + \frac{1}{4} + \frac{1}{4} = 1 \text{ См}, \quad G_{12} = G_{21} = -\frac{1}{R_3} = -\frac{1}{2} = -0,5 \text{ См}.$$

Значення струмів вузлів

$$I_{y1} = \frac{E_1}{R_{01}} + \frac{E_2}{R_{02}} = \frac{12}{0,05} + \frac{13,5}{0,1} = 375 \text{ А}, \quad I_{y2} = 0.$$

Отримана система має вигляд

$$\begin{bmatrix} 30,5 & -0,5 \\ -0,5 & 1 \end{bmatrix} \times \begin{bmatrix} \varphi_1 \\ \varphi_2 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 375 \\ 0 \end{bmatrix}.$$

Розв'язуючи систему одержуємо $\varphi_1 = 12,4 \text{ В}$, $\varphi_2 = 6,2 \text{ В}$.

Визначаємо струми в гілках:

$$I_1 = \frac{E_1 + (\varphi_3 - \varphi_1)}{R_{01}} = \frac{12 + (0 - 12,4)}{0,05} = -7,98 \text{ А},$$

$$I_2 = \frac{E_2 + (\varphi_3 - \varphi_1)}{R_{02}} = \frac{13,5 + (0 - 12,4)}{0,1} = 11,08 \text{ А}, \quad I_3 = \frac{(\varphi_1 - \varphi_2)}{R_2} = \frac{12,4 - 6,2}{2} = 3,1 \text{ А},$$

$$I_4 = \frac{(\varphi_2 - \varphi_3)}{R_4} = \frac{6,2}{4} = 1,55 \text{ А}, \quad I_5 = \frac{(\varphi_2 - \varphi_3)}{R_5} = \frac{6,2}{4} = 1,55 \text{ А}.$$

Задача 3.7. Для схеми електричної мережі і вихідних даних задачі 3.4, користуючись методом еквівалентного генератора розрахувати й побудувати залежності струму в гілці з резистором R_3 і напруги U_{12} між вузлами 1 і 2 від величини опору резистора R_3 при зміні його опору від нуля до 12 Ом.

Розв'язання задачі для варіанта К.

У цьому випадку внутрішній опір еквівалентного генератора простіше розрахувати, не визначаючи струм короткого замикання. При розімкнутих затискачах 1 і 2 і закорочених джерелах ЕРС вихідна схема прийме вигляд, показаний на рис.3.13,в.

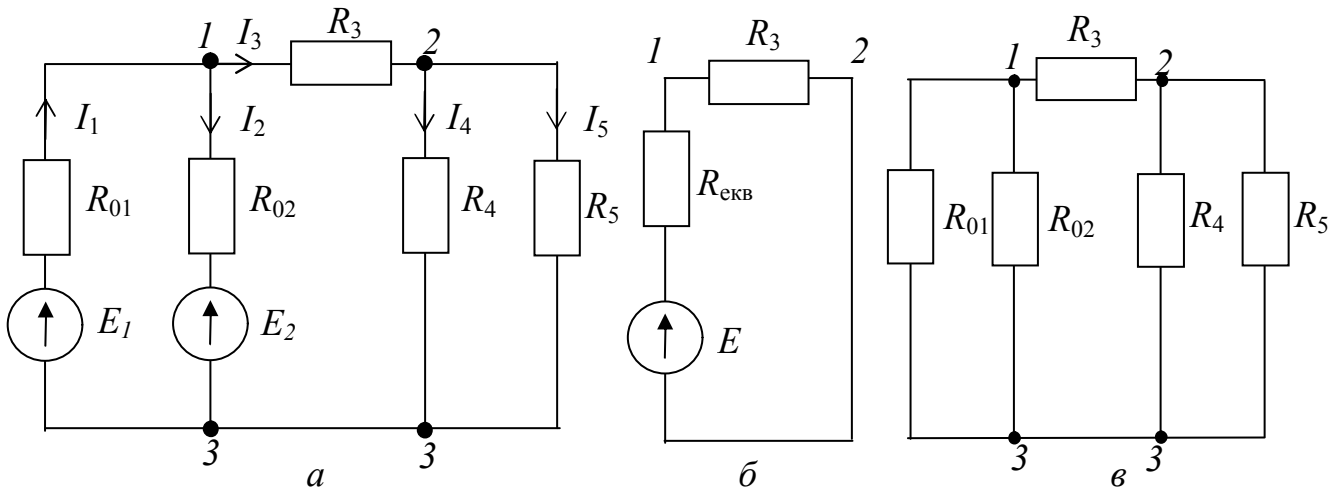


Рис.3.13 - Перетворення схеми за методом еквівалентного генератора

Знаходимо еквівалентні опори гілок, підключених до вузлів 1-3 і 2-3 (рис.3.13,в):

$$R_{13} = \frac{R_{01} \cdot R_{02}}{R_{01} + R_{02}} = \frac{0,05 \cdot 0,1}{0,05 + 0,1} = 0,033 \text{ Ом}, \quad R_{23} = \frac{R_4 \cdot R_5}{R_4 + R_5} = \frac{4 \cdot 4}{4 + 4} = 2 \text{ Ом}.$$

Відносно вузлів 1 і 2 резистори R_{13} і R_{23} включені послідовно, отже внутрішній опір еквівалентного генератора $R_{\text{екв}} = 2,033 \text{ Ом}$.

Для визначення ЕРС еквівалентного генератора необхідно розрахувати потенціали вузлів 1 і 2. У нашому випадку їх простіше визначити користуючись методом вузлових потенціалів. Так, якщо прийняти потенціал вузла 3 рівним нулю, то при розімкнутих затискачах струми в гілках з резисторами R_4 і R_5 дорівнюють нулю. Отже потенціал вузла 2 також дорівнює нулю.

Потенціал вузлу 1 знаходимо з рівняння (3.9):

$$\varphi_1 = \frac{I_{y1}}{G_{11}} = \frac{375}{30} = 12,5 \text{ В},$$

де $G_{11} = \frac{1}{R_{01}} + \frac{1}{R_{02}} = \frac{1}{0,05} + \frac{1}{0,1} = 30 \text{ См}, \quad I_{y1} = \frac{E_1}{R_{01}} + \frac{E_2}{R_{02}} = \frac{12}{0,05} + \frac{13,5}{0,1} = 375 \text{ А}.$

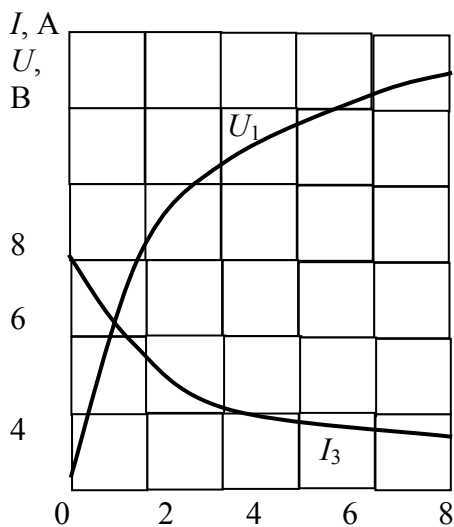


Рис.3.14 - Шукані залежності струму і напруги

ЕРС еквівалентного генератора

$$E_r = \varphi_1 - \varphi_2 = \varphi_1 = 12,5 \text{ В}.$$

Струм I_3 у гілці з резистором R_3 і напруга між вузлами 1 і 2

$$I_3 = E_r / (R_3 + R_{\text{екв}}),$$

$$U_{12} = R_3 \cdot I_3.$$

З отриманих співвідношень побудуємо шукані графіки (рис.3.14).

Розв'язання даного завдання іншими методами вимагає більших витрат часу.

ЕЛЕКТРИЧНІ КОЛА ЗМІННОГО СТРУМУ

ТЕМА 4 ФІЗИЧНІ ПРОЦЕСИ В КОЛАХ ЗМІННОГО СТРУМУ

Ключові поняття: змінний струм, періодичний змінний струм, діюче значення напруги (ЕРС, струму), середнє значення напруги (ЕРС, струму), фаза, початкова фаза, кутова частота, кут зрушення фаз, векторна діаграма, комплексне значення, вектор комплексного значення.

4.1. Основні відомості про змінний струм

Кола із змінними струмами в порівнянні з колами постійного струму мають ряд особливостей. Ці особливості визначаються тим, що змінні струми й напруги окремих елементів електротехнічних пристроїв породжують у них змінні електричне й магнітне поля. У результаті зміни цих полів в електричному колі виникають явища самоіндукції, взаємної індукції і струмів зсуву, які надають істотного впливу електромагнітним процесам, аналіз яких ускладнюється.

У даний час змінний струм знаходить широке застосування, оскільки він легко трансформується і передається на великі відстані при високій напрузі та малих втратах. Крім того, електричні машини та інші електротехнічні пристрої призначені для роботи в колах змінного струму, відносно прості й надійні в експлуатації.

Електричний струм, що змінюється з часом, називають змінним. Якщо миттєві значення і напрямки струму через рівні проміжки часу (періодично) повторюються, то такий струм називають таким, що **періодично змінюється**.

Електричні кола періодичного змінного струму класифікують залежно від форми кривої струму і його частот, характеру параметрів, складності електричних схем заміщення, призначення.

Розрізняють наступні види електричних кіл змінного струму: однофазні й багатofазні; лінійні й нелінійні; із зосередженими й розподіленими параметрами; з взаємоіндуктивностями й без взаємоіндуктивностей; прості й складні (до складного можна віднести багатofазні кола).

В Україні, як і в більшості країн світу, виробництво й передачу електричної енергії здійснюють за допомогою трифазного синусоїдального струму частотою 50 Гц (у США і Японії з частотою 60 Гц).

При аналізі кіл змінного струму використовують електричні схеми заміщення, що складені з ідеальних елементів. Кожний з цих елементів відбиває певне явище і вводиться до схеми заміщення, коли це явище хочуть врахувати.

Ідеальні елементи R , L , C (рис. 4.1, а, б, в) є пасивними, тому позитивні напрямки струмів і напруг у них збігаються. У джерелі живлення на рис. 4.1 збігаються позитивні напрямки струму й ЕРС. Позитивний напрямок напруги джерела протилежний позитивному напрямку його ЕРС. При цих напрямках позитивні значення миттєвих потужностей приймача $p = ui$ та джерела $p = ei$ означають, що перший з них

працює приймачем, а другий - джерелом. При негативних значеннях миттєвих потужностей перший перебуває в режимі джерела, а другий - в режимі приймача.

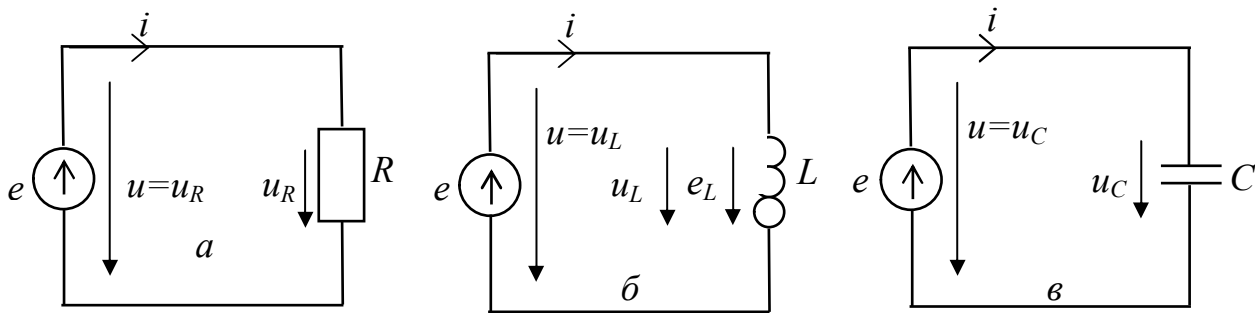


Рис. 4.1 - Позитивні напрямки ЕРС, струму й напруги ідеальних резистивного (а), індуктивного (б) і ємнісного (в) елементів

4.2. Елементи схем заміщення із змінними струмами

4.2.1. Резистивний елемент є пасивним елементом схеми заміщення, що характеризує наявність в елементі, який заміщують, необоротних процесів перетворення електричної енергії на теплову. Параметром резистивного елемента є його активний опір R . В резистивному елементі розсіюється теплова енергія, що виділяється у провіднику.

Напруга u і струм i резистивного елемента зв'язані між собою рівнянням, складеним за законом Ома для миттєвих значень:

$$u = R i . \quad (4.1)$$

Рівняння (4.1) вказує на досить важливу властивість резистивного елемента: крива u повторює форму кривої струму, тобто криві напруги і струму резистивного елемента подібні.

Миттєва потужність резистивного елемента визначається за формулою

$$p = u \cdot i = R i^2 , \quad (4.2)$$

вона не залежить від знака струму й завжди позитивна. Позитивний знак потужності вказує на те, що в резистивному елементі незалежно від напрямку струму енергія завжди надходить від джерела.

4.2.2. Індуктивний елемент схем заміщення. Індуктивний елемент схеми заміщення реального кола із змінним струмом характеризує наявність змінного магнітного поля, створеного цим струмом.

У колах із змінним струмом люба зміна струму I в елементі кола відповідно до закону електромагнітної індукції супроводжується наведенням ЕРС e у цьому елементі. Це явище називають *самоіндукцією*, а наведені при цьому ЕРС - ЕРС самоіндукції.

Закон електромагнітної індукції (закон Фарадея) формулюють в такий спосіб: величина ЕРС e , наведена в замкнутому провіднику, пропорційна швидкості зміни магнітного потоку Φ , що пронизує цей контур

$$e = \frac{-d\Phi}{dt} . \quad (4.3)$$

Знак мінус, відповідно до закону Ленца [2.9], показує, що індуктований струм завжди прагне протидіяти зміні магнітного потоку контуру.

За законом електромагнітної індукції ЕРС самоіндукції визначається швидкістю зміни власного потокозчеплення:

$$e_L = -\frac{d\Psi_L}{dt}, \quad (4.3)$$

де власне потокозчеплення індуктивного елемента Ψ_L пропорційне величині струму i у ньому: $\Psi_L = L \cdot i$.

Формула для ЕРС самоіндукції може бути записана в такому вигляді:

$$e_L = -L \cdot \frac{di}{dt}. \quad (4.4)$$

З (4.3) і (4.4) видно, що **індуктивність L** елемента кола можна розглядати як **коефіцієнт пропорційності між потокозчепленням Ψ_L і струмом i** , або як коефіцієнт пропорційності між швидкістю зміни струму елемента кола di/dt і ЕРС самоіндукції e , наведеної в цьому елементі.

При дослідженні кіл з ЕРС самоіндукції умовилися позитивний напрямок ЕРС самоіндукції брати співпадаючим з позитивним напрямком струму, що наводить цю ЕРС. Тому стрілка ЕРС e і стрілка струму i на схемі рис. 4.1,б мають однаковий напрямок. Відповідно до цього дійсний напрямок ЕРС збігається з напрямком, що позначений на схемі стрілкою при збільшенні струму в колі, коли $di/dt < 0$, а $e > 0$; зростаючий у колі струм наводить ЕРС e , дійсний напрямок якої протилежний напрямку, позначеному стрілкою.

Для того, щоб у котушці індуктивності без втрат був змінний струм, між її выводами повинна бути напруга, яка дорівнює за абсолютною величиною і в кожний момент часу протилежна за напрямком ЕРС самоіндукції:

$$u = -e = L \frac{di}{dt} = \frac{d\Psi}{dt}. \quad (4.5)$$

Основна одиниця виміру потокозчеплення й магнітного потоку в системі SI - вебер (Вб), $1 \text{ Вб} = 1 \text{ В} \cdot \text{с}$; індуктивності - генрі (Гн), $1 \text{ Гн} = 1 \text{ Вб/А} = 1 \text{ В} \cdot \text{А/с}$.

Розглянемо зміни струму в індуктивному елементі схеми на рис. 4.1,б. Якщо протягом якогось інтервалу часу миттєве значення струму є позитивним ($i > 0$) і визначається зростаючою ділянкою кривої ($di/dt > 0$), то напруга на індуктивному елементі буде також позитивною ($u > 0$). Це означає, що у вказаному інтервалі часу напрямок напруги u збігається з позитивним напрямком цієї напруги, позначеним на схемі стрілкою.

Миттєва потужність індуктивного елемента $p = u \cdot i$ буде позитивною ($p > 0$). Отже енергія в цей інтервал часу надходить від джерела до кола і переходить в енергію магнітного поля $L \cdot i^2/2$.

Коли позитивний струм в котушці ($i > 0$) збуває ($di/dt < 0$) значення напруги й миттєвої потужності негативні ($u < 0, p < 0$). Енергія з магнітного поля повертається назад у джерело. Таким чином, у процесі зростання і збування струму в індуктивному елементі має місце обмін енергією між джерелом і магнітним полем.

4.2.3. Ємнісний елемент схем заміщення. Ємнісний елемент (конденсатор) вводять до схеми заміщення реального кола із змінним струмом, коли хочуть врахувати вплив змінного електричного поля елементів кола.

Якщо між обкладками конденсатора прикладена змінна напруга u_C (рис.4.1,в), то на його обкладках накопичується заряд

$$q = C \cdot u_c, \quad (4.6)$$

де коефіцієнт пропорційності C називають **ємністю** конденсатора.

Напруга й струм ємнісного елемента зв'язані рівнянням

$$i = \frac{dq}{dt} = C \frac{du_c}{dt} . \quad (4.7)$$

Якщо напруга u_c зростає, то струм позитивний ($i > 0$). Це означає, що в цей момент часу струм має напрямок, що збігається з умовним позитивним напрямком напруги u_c (рис. 4.1,в). Заряд і енергія електричного поля $W_e = C u_c^2 / 2 = q u_c / 2$ при цьому зростають. Енергія від джерела передається електричному полю.

Коли напруга u_c убуває, убуває і заряд, а енергія з поля повертається назад у джерело. Отже в ємнісному елементі кола має місце обмін енергією між джерелом і електричним полем. Якщо заданий закон зміни струму в ємнісному елементі, то напруга на ньому може бути визначена з рівняння

$$u_c = \frac{1}{C} \int i dt + const \quad (4.8)$$

При розгляді процесів у колах із змінними струмами *постійну* $const$ у рівнянні (4.8) звичайно вважають рівною нулю, тому що напруга u_c не має при цьому постійної складової ($u_c = const = 0$).

4.3. Діючі й середні значення періодичних напруг і струмів

4.3.1. Діючі значення періодичних напруг і струмів. Для оцінки ефективності дії періодичного струму використовують його теплову або електродинамічну дію і порівнюють з аналогічною дією постійного струму за той самий інтервал часу, рівний одному періоду.

Значення періодичного струму, що дорівнює такому значенню постійного струму, яке протягом одного періоду робить той же тепловий або електродинамічний ефект, що й періодичний струм, називають діючим значенням періодичного струму. Діючі значення струму, напруги й ЕРС позначають прописними буквами без індексів: I , U , E .

При оцінці періодичного струму i , користуючись тепловим ефектом, приймають, що постійний струм I і періодичний струм i того самого резистивного елемента з активним опором R виділяють однакову кількість тепла за час T , який дорівнює одному періоду

$$R \cdot I^2 \cdot T = \int_0^T R i^2 dt .$$

З цього рівняння одержують діюче значення струму:

$$I = \sqrt{\frac{1}{T} \int_0^T i^2 dt} , \quad (4.9)$$

яке дорівнює середньоквадратичному значенню періодичного струму.

Аналогічно діючі значення напруги й ЕРС є середньоквадратичними значеннями періодичних напруги й ЕРС:

$$U = \sqrt{\frac{1}{T} \int_0^T u^2 dt} \quad \text{і} \quad E = \sqrt{\frac{1}{T} \int_0^T e^2 dt} . \quad (4.10)$$

4.3.2. Середні значення періодичних напруг, струмів і потужності. У загальному випадку під середнім значенням періодичних функцій розуміють їхні середні арифметичні значення за період.

Середнє значення потужності за період визначається рівнянням

$$P_{\text{сеп}} = \frac{1}{T} \int_0^T p dt = \frac{1}{T} \int_0^T u i dt . \quad (4.11)$$

Якщо позитивні й негативні напівхвилі кривої потужності не рівні, то середнє значення визначають різницею площ, що обмежені кривими напівхвиль і віссю абсцис.

Як правило, негативні напівхвилі періодичних струмів, напруг і ЕРС повторюють їхні позитивні напівхвилі. Тому під середніми значеннями періодичних струмів напруг і ЕРС розуміють середні значення їхніх напівхвиль:

$$\left\{ \begin{array}{l} I_{\text{сеп}} = \frac{2}{T} \int_0^{T/2} i dt \\ U_{\text{сеп}} = \frac{2}{T} \int_0^{T/2} u dt \\ E_{\text{сеп}} = \frac{2}{T} \int_0^{T/2} e dt \end{array} \right. . \quad (4.12)$$

4.4. Комплексна форма подання синусоїдальних напруг і струмів

При розрахунках електричних кіл з синусоїдальними ЕРС, напругами й струмами досить ефективним є комплексний метод аналізу. При зображенні обертових векторів синусоїдальних величин на комплексній площині вісь абсцис площини декартових координат сполучають з віссю дійсних величин (вісь +1) комплексної площини. Тоді миттєві значення синусоїдальних величин одержують на осі уявних величин (вісь +j).

Для того, щоб подати синусоїдальну ЕРС

$$e = E_m \sin(\omega t + \psi) \quad (4.15)$$

з початковою фазою ψ , проведемо на комплексній площині (рис. 4.2) з початку координат під кутом ψ до осі дійсних величин вектор, довжина якого в масштабі побудови дорівнює амплітуді ЕРС E_m . Кінець цього вектора перебуває в точці, якій відповідає певне комплексне число - комплексна амплітуда ЕРС:

$$\dot{E}_m = E_m e^{j\psi} = E_m \angle \psi . \quad (4.16)$$

При збільшенні в часі фази ЕРС $\omega t + \psi$ кут між вектором і віссю дійсних величин зростає, тобто виходить обертовий вектор

$$E_m e^{j(\omega t + \psi)} = E_m \cos(\omega t + \psi) + j E_m \sin(\omega t + \psi) .$$

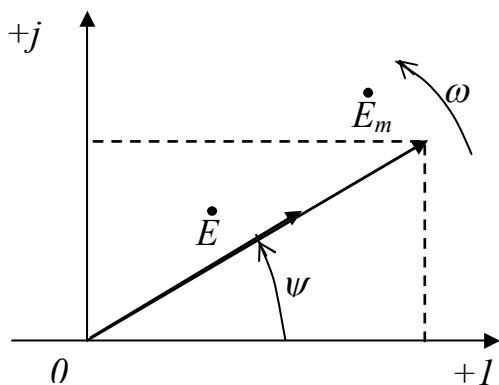


Рис. 4.2 - Зображення синусоїдальної ЕРС обертовим вектором на комплексній площині

Як бачимо, уявна складова обертового вектора дорівнює заданій синусоїдальній ЕРС.

Вектор на комплексній площині, довжина якого в масштабі побудови дорівнює діючому значенню синусоїдальної ЕРС, називається **комплексним діючим значенням синусоїдальної ЕРС**

$$\dot{E} = \frac{\dot{E}_m}{\sqrt{2}} = E e^{j\psi} = E \angle \psi \quad (4.17)$$

Так само позначається і сам вектор на комплексній площині (рис.4.2).

Використовують три форми запису комплексного значення синусоїдальних ЕРС, струмів і потужностей. Розглянемо їх на прикладі синусоїдальної ЕРС.

Алгебраїчна форма запису $\dot{E} = \text{Re} \dot{E} + j \text{Im} \dot{E}$, або в іншому позначенні $\dot{E} = E' + jE''$, де $E' = \text{Re} \dot{E} = E \cos \psi$ й $E'' = \text{Im} \dot{E} = E \sin \psi$ - дійсна й уявна складові комплексного значення синусоїдальної ЕРС,

$$E = \sqrt{(\text{Re} \dot{E})^2 + (\text{Im} \dot{E})^2} ; \quad \psi = \text{arctg} \frac{\text{Im} \dot{E}}{\text{Re} \dot{E}}$$

Алгебраїчна форма запису більш зручна при додаванні й відніманні комплексних чисел.

Тригонометрична форма запису є похідною від алгебраїчної і зручна при переході від показової до алгебраїчної форми запису. З урахуванням того, що $\cos \psi = E' / E$, $\sin \psi = E'' / E$ тригонометрична форма запису має вигляд $\dot{E} = E \cos \psi + jE \sin \psi$.

Показова форма запису є похідною від тригонометричної й має вигляд $\dot{E} = E e^{j\psi} = E \angle \psi$. Ця форма запису більш зручна при множенні, діленні, добуванні кореню комплексних чисел.

Перехід від показової форми запису синусоїдальних величин до тригонометричної виконують за допомогою формули Ейлера:

$$e^{j\psi} = \cos \psi + j \sin \psi$$

При аналізі кіл синусоїдального струму застосовують головним чином комплексні діючі значення синусоїдальних величин, скорочено їх називають **комплексними значеннями**, а відповідні вектори на комплексній площині – **векторами комплексних значень**.

Користуючись векторною діаграмою, додавання і віднімання комплексних значень можна замінити додаванням і відніманням відповідних векторів. Це спрощує розрахунки і робить їх наочними.

Напрямок синусоїдальних величин у колі періодично змінюється, але один з двох напрямків приймають за позитивний. Цей напрямок вибирають довільно й показують стрілкою на схемі відповідної ділянки кола.

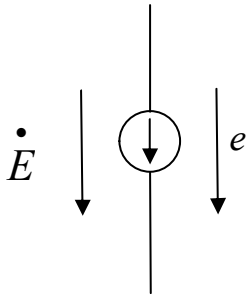


Рис.4.3 - Вибір позитивного напрямку синусоїдальної ЕРС

При обраному позитивному напрямку синусоїдальну величину представляють миттєвим значенням (наприклад, для напруги $e = E_m \sin(\omega t + \psi)$) і відповідним комплексним значенням ($\dot{E} = E \angle \psi$ -рис. 4.3).

Отже взаємно однозначному поданню синусоїдальних струмів, напруг та інших величин у вигляді миттєвих і комплексних значень відповідають їхні однакові позитивні напрямки (рис. 4.3).

4.5. Діючі й середні значення синусоїдальних напруг і струмів

Для встановлення діючого значення синусоїдального струму скористаємося формулою (4.9), підставивши до неї замість миттєвих значень синусоїдального струму його вираз

$$I = \sqrt{\frac{1}{T} \int_0^T i^2 dt} = \sqrt{\frac{1}{T} \int_0^T I_m^2 \sin^2 \omega t dt} .$$

Оскільки

$$\int_0^T I_m^2 \sin^2 \omega t dt = I_m^2 \int_0^T \frac{1 - \cos 2\omega t}{2} dt = \frac{I_m^2 T}{2} ,$$

діюче значення синусоїдального струму менше його амплітуди в $\sqrt{2}$ разів:

$$I = I_m / \sqrt{2} = 0,707 I_m . \quad (4.18)$$

Аналогічно знаходимо діючі значення синусоїдальної напруги й ЕРС:

$$U = U_m / \sqrt{2} \quad \text{і} \quad E = E_m / \sqrt{2} . \quad (4.19)$$

Під середнім значенням синусоїдальних струмів розуміють їхні середні значення за напівперіод. Якщо струм $i = I_m \sin \omega t$, то його середнє значення

$$I_{\text{сеп}} = \frac{\int_0^T i dt}{T/2} = \frac{2}{T} \int_0^T I_m \sin \omega t dt = \frac{2}{\pi} I_m . \quad (4.20)$$

Отже середнє значення синусоїдального струму становить $2/\pi$ його амплітудного значення. Аналогічно знаходять середні значення синусоїдальної напруги й ЕРС:

$$U_{\text{сеп}} = \frac{2}{\pi} U_m , \quad E_{\text{сеп}} = \frac{2}{\pi} E_m .$$

4.6. Комплексна форма запису законів Кірхгофа

У загальному випадку за першим законом Кірхгофа в комплексній формі алгебраїчна сума комплексних значень струмів гілок, що сходяться у вузлі, дорівнює нулю:

$$\sum_{k=1}^n \dot{I}_k = \sum_{k=1}^n I'_k + j \sum_{k=1}^n I''_k = 0, \quad (4.21)$$

де \dot{I}_k - комплексне значення струму в k -й гілці має дві форми запису:

$$\dot{I}_k = I'_k + jI''_k = I_{ak} + jI_{pk},$$

де $I'_k = I_{ak}$ - активна складова струму k -ї гілки (в теорії комплексних чисел – дійсна складова); $I''_k = I_{pk}$ - реактивна складова струму k -ї гілки (в теорії комплексних чисел – уявна складова); n – число гілок, що сходяться у вузлі.

Відповідно до другого закону Кірхгофа для будь-якого замкнутого контуру алгебраїчна сума комплексних значень падінь напруг на його ділянках дорівнює алгебраїчній сумі комплексних значень ЕРС, що діють у контурі:

$$\sum_{k=1}^n \dot{U}_k = \sum_{k=1}^m \dot{E}_k, \quad (4.22)$$

де \dot{U}_k - комплексне значення падіння напруги на k -й ділянці контуру; \dot{E}_k - комплексне значення ЕРС k -ї ділянки контуру; n - число ділянок з пасивними елементами; m - число ділянок з ЕРС.

Для напруг і ЕРС, як і у випадку з комплексними струмами, мають місце дві форми запису:

$$\dot{U}_k = U'_k + jU''_k = U_{ak} + jU_{pk}, \quad (4.23)$$

$$\dot{E}_k = E'_k + jE''_k = E_{ak} + jE_{pk}, \quad (4.24)$$

де $U'_k = U_{ak}$ й $E'_k = E_{ak}$ - активна складова падіння напруги й ЕРС в k -й гілці; $U''_k = U_{pk}$, $E''_k = E_{pk}$ - реактивна складова падіння напруги й ЕРС в k -й гілці.

Розглянемо запис законів Кірхгофа на прикладі схеми електричного кола (рис. 4.4,а), в якій діють синусоїдальні ЕРС, миттєві значення яких задані рівняннями

$$\begin{aligned} e_1 &= E_{1m} \sin(\omega t + \psi_1), \\ e_2 &= E_{2m} \sin(\omega t + \psi_2). \end{aligned}$$

Під дією цих ЕРС у всіх гілках кола з'являться синусоїдальні струми, а на окремих ділянках його виникнуть синусоїдальні падіння напруги.

Для визначення струмів даної схеми при заданих значеннях ЕРС e_1 і e_2 і опорів (резистивних $R_1 \div R_5$, індуктивного L_4 і ємнісного C_5) за законами Кірхгофа потрібно скласти систему з п'яти рівнянь. Порядок складання рівнянь той же, що й у випадку з постійним струмом (див. розділ 2.6).

Рівняння за першим законом Кірхгофа, складені для вузлів а і б, будуть мати вигляд

$$\text{для вузла а:} \quad \dot{I}_1 - \dot{I}_3 - \dot{I}_4 - \dot{I}_5 = 0; \quad (4.25)$$

$$\text{для вузла б:} \quad -\dot{I}_1 - \dot{I}_2 + \dot{I}_3 = 0. \quad (4.26)$$

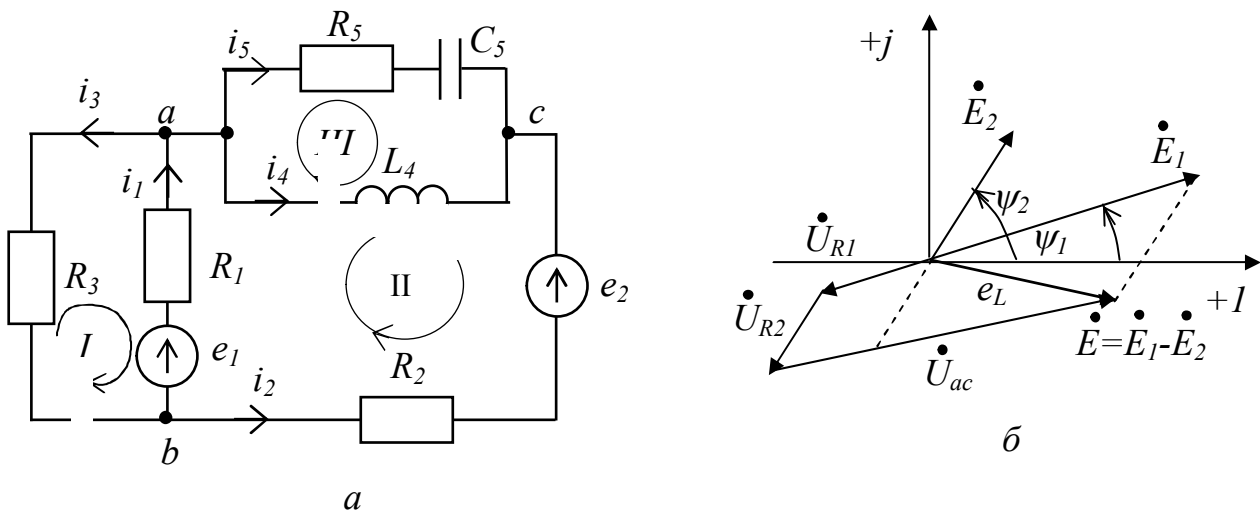


Рис.4.4 - Схема електричного кола змінного струму (а) і векторна діаграма ЕРС і напруг II-го контуру (б)

Рівняння, складені для контурів (I), (II) і (III) за другим законом Кірхгофа при завданні обходу контурів за годинниковою стрілкою, будуть мати вигляд

$$\text{для контуру I:} \quad -R_1 \dot{I}_1 - R_3 \dot{I}_3 = -\dot{E}_1; \quad (4.27)$$

$$\text{для контуру II:} \quad R_1 \dot{I}_1 + jX_4 \dot{I}_4 + R_2 \dot{I}_2 = \dot{E}_1 - \dot{E}_2; \quad (4.28)$$

$$\text{для контуру III:} \quad (R_5 - jX_5) \dot{I}_5 - jX_4 \dot{I}_4 = 0. \quad (4.29)$$

Таким чином, отримані рівняння (4.25) - (4.29) представляють закони Кірхгофа, що записані в комплексній формі для схеми електричного кола на рис. 4.4,а.

На рис. 4.4,б як приклад показано векторну діаграму ЕРС і напруг контуру II, що наочно ілюструє другий закон Кірхгофа в комплексній формі.

Контрольні запитання з теми 4

1. Що розуміють під змінним струмом? Періодичним струмом?
2. Дайте характеристику резистивного (індуктивного, ємнісного) елемента електричного кола.
3. Що розуміють під індуктивністю?
4. У чому різниця фізичних процесів в індуктивному елементі при проходженні через нього постійного і змінного струму?
5. Що розуміють під ємністю?
6. У чому відмінність фізичних процесів у ємнісному елементі при його роботі в колах постійного й змінного струму?
7. Що розуміють під діючим значенням періодичного струму? Напруги?
8. Що розуміють під середнім значенням періодичного синусоїдального струму?
9. Поясніть параметри синусоїдального струму. Напруги.
10. Що розуміють під векторною діаграмою? У чому її перевага при аналізі електричного кола?
11. Які форми запису комплексних значень синусоїдальних струмів застосовують на практиці?
12. Запишіть закони Кірхгофа в комплексній формі запису й дайте їм пояснення.

ТЕМА 5 ЕЛЕКТРИЧНІ КОЛА ОДНОФАЗНОГО ЗМІННОГО СТРУМУ

Ключові поняття: опір (активний, індуктивний, ємнісний), комплексний опір (повний, активний, реактивний, індуктивний, ємнісний), потужність активна (реактивна, повна), «трикутник» опорів, резонанс напруг, провідність активна (реактивна, повна), активна і реактивна складові струму, резонанс струмів, коефіцієнт потужності.

5.1. Електричне коло з резистивним елементом

Нехай на вхід кола з резистивним елементом, що має активний опір R (рис. 5.1,а), подано синусоїдальну напругу:

$$u = U_m \sin(\omega t + \psi_u). \quad (5.1)$$

Струм у колі можна визначити, користуючись законом Ома для миттєвих значень:

$$i = u/R = U_m \sin(\omega t + \psi_u)/R,$$

або

$$i = I_m \sin(\omega t + \psi_i), \quad \psi_i = \psi_u. \quad (5.2)$$

Із зіставлення рівнянь (5.2) з (5.1) бачимо, що синусоїда струму має ту ж частоту, що й синусоїда напруги і збігається з нею за фазою.

Амплітуда струму пов'язана з амплітудою напруги співвідношенням

$$I_m = U_m/R. \quad (5.3)$$

Якщо ліву й праву частини виразу (5.3) розділити на $\sqrt{2}$, то одержимо нову формулу для діючих значень струму й напруги:

$$I = U/R, \quad (5.4)$$

яка виражає закон Ома для кола з резистивним елементом.

Миттєве значення потужності цього кола дорівнює добутку миттєвих значень напруги й струму:

$$p = ui = U_m I_m \sin^2(\omega t + \psi_u) = U_m I_m \frac{1 - \cos 2(\omega t + \psi_u)}{2},$$

або

$$P = I \cdot U \cos(\omega t + \psi_u). \quad (5.5)$$

Середнє за період значення потужності

$$P = \frac{1}{T} \int_0^T p dt = \frac{1}{T} UI \int_0^T dt - \frac{1}{T} UI \int_0^T \cos 2(\omega t + \psi_u) dt,$$

або

$$P = I \cdot U.$$

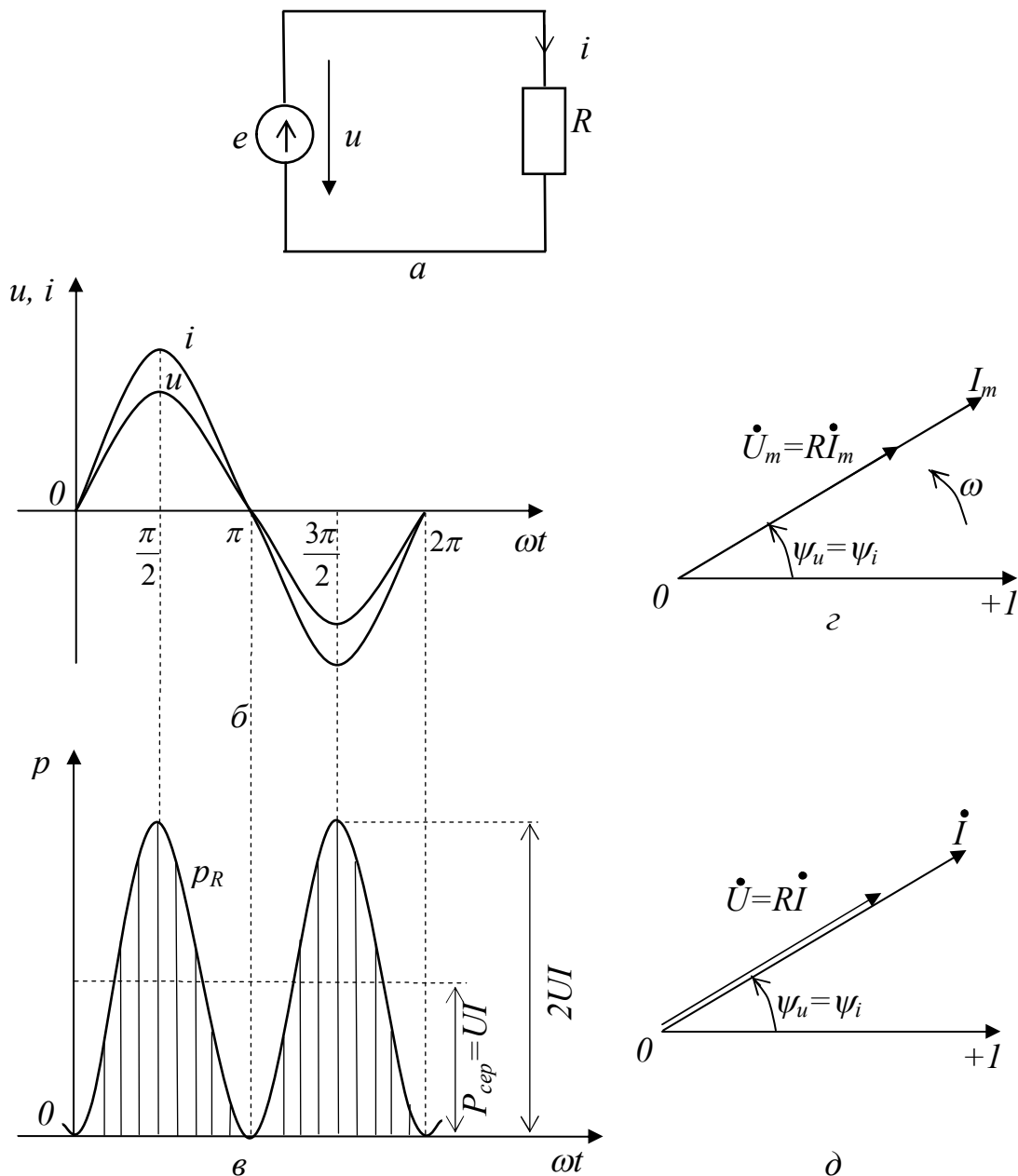


Рис. 5.1 - Коло з резистивним елементом:

а - схема; **б** - графіки миттєвих значень напруги й струму; **в** - графіки миттєвих значень потужності; **г** - векторні діаграми комплексних амплітуд; **д** - векторні діаграми комплексних значень струму й напруги

Якщо у вираз для середньої потужності замість напруги підставити її значення $U = R \cdot I$ з (5.4), одержимо, **що середнє значення потужності в колі дорівнює її активній потужності**:

$$P = I \cdot U = R \cdot I^2 . \quad (5.6)$$

Для ілюстрації змін напруги, струму й потужності в резисторі на рис. 5.1,б і в за рівняннями (5.1), (5.2) і (5.5) побудовані графіки p , u і i для випадку, коли початкова фаза $\psi_u = 0$.

Із графіків видно, що миттєва потужність в резисторі пульсує від нуля до $2P = 2UI$, залишаючись весь час додатною. Це означає, що **при будь-якому на-**

прямку струму в резистивному елементі енергія надходить від джерела до кола і перетворюється на теплову енергію. Величину перетвореної енергії за період можна характеризувати заштрихованою площею, обмеженою кривою потужності й віссю абсцис.

Для побудови векторної діаграми напруги й струму кола на комплексній площині запишемо їхні комплексні амплітуди відповідно до рівнянь (5.1) і (5.2):

$$\dot{U}_m = U_m e^{j\psi_u} ; \quad \dot{I}_m = I_m e^{j\psi_i} = I_m e^{j\psi_u} . \quad (5.7)$$

Але амплітуду напруги з формули (5.3) можна виразити через амплітуду струму, тому комплексну амплітуду напруги можна записати інакше:

$$\dot{U}_m = U_m e^{j\psi_u} = R \cdot I_m e^{j\psi_u} = R \cdot \dot{I}_m . \quad (5.8)$$

З виразу (5.8) випливає, що вектор, який зображує синусоїду напруги на резисторі, збігається за напрямком з вектором, який зображує синусоїду струму. Векторна діаграма комплексних амплітуд напруги й струму побудована на рис. 5.1,г.

Однак при розрахунку кіл синусоїдального струму замість векторів комплексних амплітуд прийнято будувати вектори комплексних діючих значень напруги \dot{U} й струму \dot{I} . Ці вектори відповідно збігаються за напрямком з векторами \dot{U}_m й \dot{I}_m і відрізняються від них тільки за величиною:

$$\dot{I} = \frac{\dot{I}_m}{\sqrt{2}} = I e^{j\psi_u} , \quad \dot{U} = \frac{\dot{U}_m}{\sqrt{2}} = R \cdot I e^{j\psi_u} = R \cdot \dot{I} . \quad (5.9)$$

На рис. 5.1,д побудовано векторну діаграму комплексних значень напруги й струму резистивного елемента. З діаграми випливає, що **вектор напруги на резисторі збігається за напрямком з вектором струму й дорівнює комплексному значенню струму, помноженому на активний опір резистора.**

З (5.9) можна одержати вираз

$$\dot{I} = \frac{\dot{U}}{R} , \quad (5.10)$$

що визначає закон Ома в комплексній формі для кола з резистивним елементом. Відповідно до цього закону **комплексне значення струму в колі з резистором дорівнює комплексному значенню напруги, поділеній на активний опір резистора.**

5.2. Електричне коло з ідеальною індуктивною котушкою

Нехай по ідеальній котушці з індуктивністю L (рис. 5.2,а) проходить синусоїдальний струм:

$$i = I_m \sin(\omega t + \psi_i) , \quad (5.11)$$

який наводить у ній ЕРС самоіндукції

$$e_L = -L \frac{di}{dt} = E_m \sin\left(\omega t + \psi_i - \frac{\pi}{2}\right) , \quad (5.12)$$

де $E_{Lm} = \omega \cdot L \cdot I_m$ – амплітуда синусоїдальної ЕРС.

З (5.11) і (5.12) випливає, що синусоїда ЕРС самоіндукції відстає за фазою від синусоїди струму на кут зрушення фаз $\pi/2$.

Зовнішня напруга джерела $u = u_L$ урівноважується ЕРС самоіндукції e .
Синусоїда цієї напруги

$$u = U_{Lm} \sin(\omega t + \psi_i + \frac{\pi}{2}) . \quad (5.13)$$

З (5.13) видно, що синусоїда напруги ідеальної котушки випереджає за фазою синусоїду струму на кут зрушення фаз $\pi/2$.

Амплітуда синусоїди напруги на котушці

$$U_{Lm} = \omega \cdot L \cdot I_m . \quad (5.14)$$

Діюче значення цієї напруги

$$U_L = \omega \cdot L \cdot I . \quad (5.15)$$

Комплексні амплітуди струму й напруги:

$$\dot{I}_m = I_m e^{j\psi_i} ,$$

$$\dot{U}_{Lm} = U_{Lm} e^{j(\psi_i + \pi/2)} = \omega L I_m e^{j\psi_i} e^{j\pi/2} = \omega L \dot{I}_m ,$$

або

$$\dot{U}_{Lm} = j\omega L \dot{I}_m .$$

Комплексні значення струму й напруги котушки

$$\dot{I} = I e^{j\psi_i} , \quad \dot{U}_L = j\omega L \dot{I} . \quad (5.16)$$

На рис. 5.2,б наведені графіки синусоїд напруги u , струму i і ЕРС самоіндукції e , а на рис 5.2,г – відповідні цим синусоїдам вектори їхніх комплексних значень \dot{U}_L , \dot{I} і \dot{E}_L для випадку $\psi_i = 0$.

Добуток ωL має розмірність опору:

$$[\omega L] = 1/\text{с} \cdot \text{Гн} = 1/\text{с} \cdot \text{Ом} \cdot \text{с} = \text{Ом} .$$

Його позначають X_L і називають індуктивним опором котушки:

$$X_L = \omega \cdot L = 2\pi f L . \quad (5.17)$$

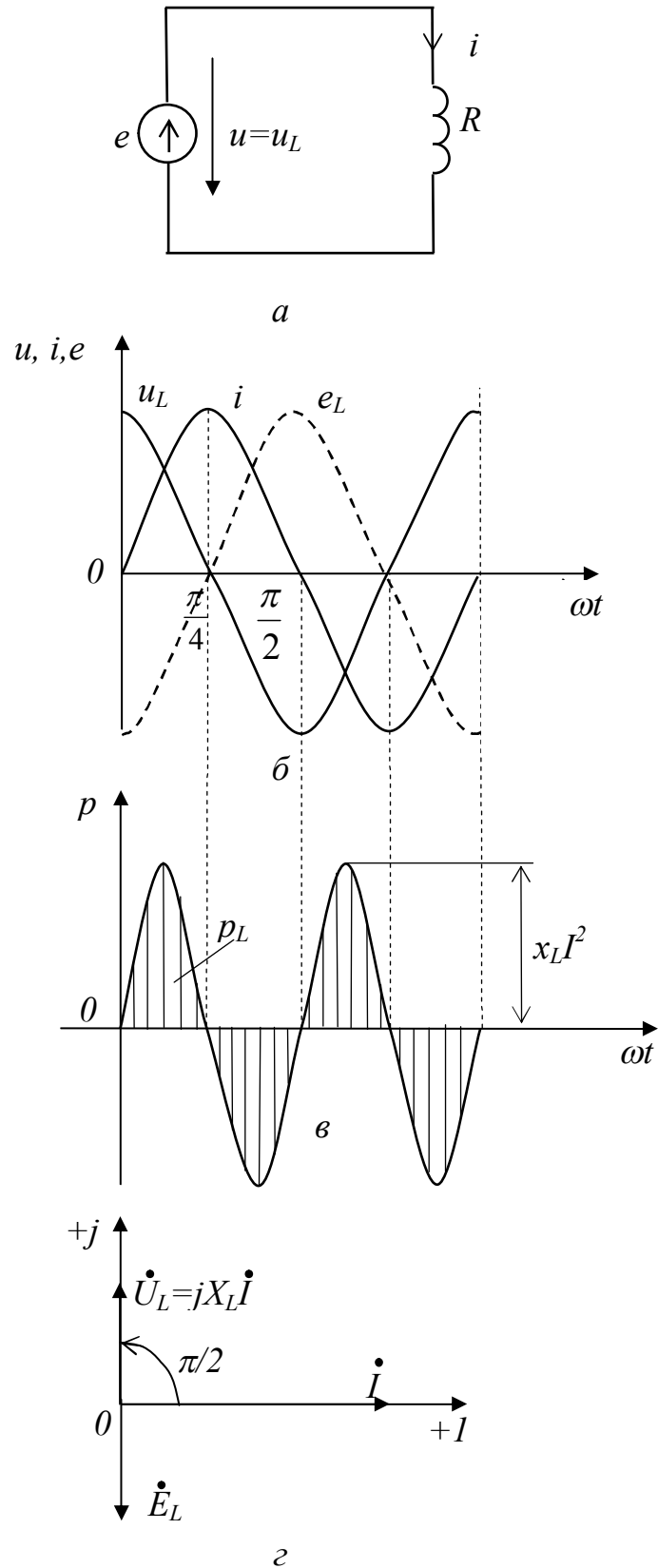


Рис.5.2 - Схема (а), графіки миттєвих значень (б, в) і векторна діаграма (г) кола з ідеальною котушкою

Величину $j\omega \cdot L = jX_L$ називають **комплексним індуктивним опором ідеальної котушки або комплексом індуктивного опору**.

З рівнянь (5.16) видно, що **вектор напруги на ідеальній котушці випереджає за фазою вектор струму на кут зрушення фаз $\pi/2$.**

З рівнянь (5.16) можна одержати також формулу для комплексного значення струму

$$\dot{I} = \frac{\dot{U}_L}{j\omega L} = \frac{\dot{U}_L}{jX_L}, \quad (5.18)$$

яка виражає закон Ома в комплексній формі для кола з ідеальною індуктивною котушкою. Тобто відповідно до закону Ома **комплексне значення струму \dot{I} в колі з ідеальною котушкою дорівнює комплексному значенню напруги \dot{U}_L на котушці поділеному на комплексне значення індуктивного опору котушки jX_L .**

Миттєве значення потужності в колі з ідеальною котушкою

$$\begin{aligned} p_L &= u_L i = U_{Lm} I_m \sin(\omega t + \psi_i + \pi/2) \sin(\omega t + \psi_i) = \\ &= U_{Lm} I_m \frac{1}{2} [\cos(+\pi/2) - \cos(2\omega t + 2\psi_i + \pi/2)] = \\ &= -U_L I \cos(2\omega t + 2\psi_i + \pi/2), \end{aligned}$$

або

$$p_L = U_L I \sin(2\omega t + 2\psi_i). \quad (5.19)$$

Графік цієї потужності для випадку $\psi_i = 0$ приведений на рис. 5.2,в.

У першу чверть періоду, коли струм і напруга додатні, потужність також додатна. Енергія $W_L = L i^2/2$ від джерела переходить у коло і витрачається на створення магнітного поля. До кінця першої чверті періоду поле має максимальну енергію $L I_m^2/2$, що пропорційна заштрихованій площі, обмеженої віссю абсцис і першою напівхвилею синусоїди потужності.

У другу чверть періоду струм i убуває, але залишається додатним. Напруга u і потужність p - від'ємні. Енергія магнітного поля повертається назад у джерело. До кінця другої чверті періоду весь запас енергії $L \cdot I_m^2/2$ буде повернутий джерелу. Тому середнє за період значення потужності кола з ідеальною котушкою дорівнює нулю:

$$P_L = \frac{1}{T} \int_0^T p_L dt = 0.$$

Таким чином, **в колі з ідеальною котушкою відбувається безперервне коливання (обмін) енергії між джерелом і магнітним полем котушки без витрати енергії джерела.**

За аналогією з активною потужністю в колі з ідеальним резистором, у колі з ідеальною котушкою вводиться поняття **реактивної індуктивної потужності:**

$$Q_L = U_L \cdot I = X_L \cdot I^2. \quad (5.20)$$

Реактивна індуктивна потужність має ту ж розмірність, що й активна потужність. Але з метою зручності для одиниць виміру реактивної потужності прийняте інше найменування - вольт-ампер реактивний (Var).

5.3. Електричне коло з ідеальним конденсатором

Нехай до конденсатора (рис. 5.3,а), діелектрик якого ідеальний і не має втрат енергії, підведена синусоїдальна напруга

$$u_C = U_{Cm} \sin(\omega t + \psi_u). \quad (5.21)$$

Струм у конденсаторі (4.7)

$$i = C \frac{du_C}{dt} = \omega \cdot C \cdot U_{Cm} \cos(\omega t + \psi_u),$$

або

$$i = I_m \sin(\omega t + \psi_u + \pi/2), \quad (5.22)$$

де I_m - амплітуда струму

$$I_m = \omega \cdot C \cdot U_{Cm}. \quad (5.23)$$

Діюче значення струму

$$I = \omega \cdot C \cdot U_C = \frac{U_C}{\frac{1}{\omega \cdot C}} = \frac{U_C}{X_C}. \quad (5.24)$$

Величина

$$X_C = \frac{1}{\omega \cdot C} = \frac{1}{2\pi \cdot f \cdot C} \quad (5.25)$$

має розмірність опору:

$$[X_C] = \frac{c \cdot B}{\text{Кл}} = \frac{B \cdot c}{A \cdot c} = \text{Ом}$$

і називається **реактивним опором конденсатора** або **ємнісним опором**.

Зіставляючи рівняння (5.21) і (5.22), бачимо, що **синусоїда ємнісного струму випереджає за фазою синусоїду напруги на конденсаторі на кут зрушення фаз $\pi/2$** .

За рівняннями (5.21) і (5.22) на рис. 5.3,б побудовані графіки i , u_C , а на рис. 5.3, з - вектори діючих значень струму й напруги на конденсаторі для випадку, коли початкова фаза $\psi_u = 0$.

Комплексні амплітуди напруги й струму, що відповідають рівнянням (5.21) і (5.22), дорівнюють:

$$\begin{aligned} \dot{U}_{Cm} &= U_{Cm} e^{j\psi_u}, \\ \dot{I}_m &= I_m e^{j(\psi_u + 90^\circ)} = \frac{U_{Cm} e^{j\psi_u}}{X_C} e^{j90^\circ} = j \frac{U_{Cm} e^{j\psi_u}}{X_C} = j \frac{\dot{U}_{Cm}}{X_C} = \frac{\dot{U}_{Cm}}{-jX_C}. \end{aligned}$$

Розділивши праву й ліву частини останнього виразу на $\sqrt{2}$, одержимо рівняння, що зв'язує комплексні значення струму й напруги:

$$\dot{I} = \frac{\dot{U}_C}{-jX_C}, \quad (5.26)$$

де $-jX_C$ - комплекс ємнісного опору.

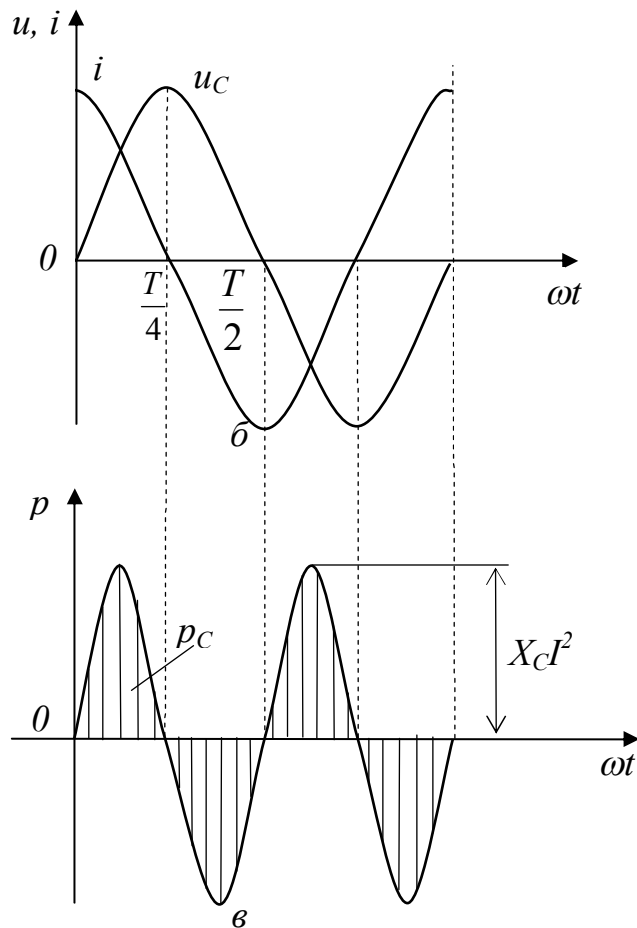
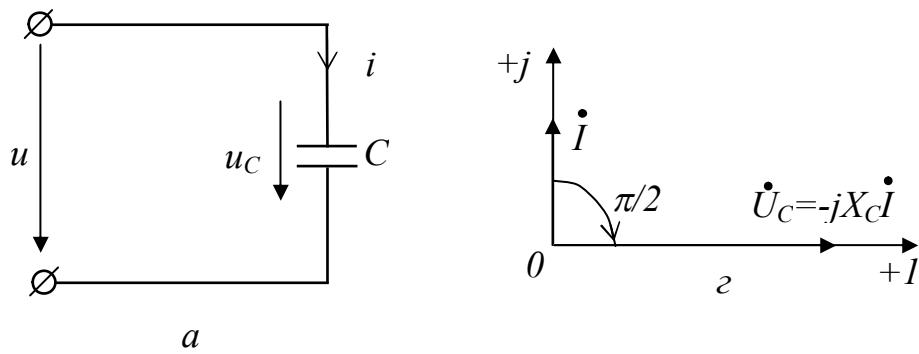


Рис. 5.3 - Схема (а), графіки миттєвих значень (б, в) і векторна діаграма цього кола (z) кола з ідеальним конденсатором

Рівняння (5.26) виражає закон Ома в комплексній формі для ділянки кола з ідеальним конденсатором: **комплекс струму конденсатора дорівнює комплексу напруги, поділеному на комплекс ємнісного опору конденсатора.**

Напруга на конденсаторі, визначена з формули (5.26), дорівнює добутку його струму й комплексу ємнісного опору:

$$\dot{U}_C = -jX_C \cdot \dot{I}. \quad (5.27)$$

З рівняння (5.27) або з векторної діаграми на рис. 5.3,з випливає, що **вектор напруги на ідеальному конденсаторі відстає за фазою від вектора струму на кут зрушення фаз $\pi/2$.**

Миттєве значення потужності

$$p_C = u_C i = U_{Cm} I_m \sin(\omega t + \psi_u) \sin(\omega t + \psi_u + \pi / 2),$$

або
$$p_C = U_C \sin 2(\omega t + \psi_u). \quad (5.28)$$

Середнє за період значення потужності кола з ідеальним конденсатором дорівнює нулю:

$$P_C = \frac{1}{T} \int_0^T p_C dt = 0. \quad (5.29)$$

Як і в колі з ідеальною котушкою, тут спостерігається процес коливання енергії $W_C = C \cdot u_C^2 / 2$ і чередування проміжків часу, протягом яких енергія від джерела запасується в електричному полі конденсатора, з проміжками часу, коли енергія з кола повертається назад до джерела. Для ілюстрації цього процесу на рис. 5.3,в побудований графік зміни потужності в колі для випадку $\psi_C = 0$. Зіставляючи його з графіками зміни напруги й струму, бачимо, що в першу чверть періоду значення u_C , i і p_C позитивні, конденсатор заряджається. У цей час має місце накопичення енергії в електричному полі конденсатора за рахунок енергії, що надходить від джерела живлення. До кінця першої чверті періоду поле запасує максимальну енергію $C \cdot U_{Cm}^2 / 2$. Протягом другої чверті періоду напруга u_C убуває, конденсатор розряджається. Струм i і потужність p_C негативні. Енергія з поля повертається назад у джерело.

Амплітуду коливання потужності в колі з конденсатором називають **реактивною ємнісною потужністю** й позначають Q_C . Відповідно до рівняння (5.28) значення цієї потужності

$$Q_C = U_C \cdot I = X_C \cdot I^2.$$

Як і реактивна індуктивна потужність, реактивна ємнісна потужність вимірюється у вольт-амперах реактивних (Var).

5.4. Електричне коло з реальною індуктивною котушкою

Нехай у реальній індуктивній котушці з індуктивністю L і активним опором R (схема заміщення подана на рис. 5.4,а) протікає струм

$$i = I_m \sin(\omega t + \psi_i). \quad (5.30)$$

Визначимо закон зміни напруги u на її затискачах.

Миттєве значення напруги u запишемо виходячи з другого закону Кірхгофа

$$u = u_R + u_L = R \cdot i + L \cdot di/dt, \quad (5.31)$$

де u_R , u_L - відповідно напруги на резистивному і індуктивному елементах котушки (рис. 5.4,а).

У пунктах 5.1 і 5.2 було показано, що кожна з напруг u_R і u_L є синусоїдальною і має частоту, яка дорівнює частоті струму i . Тому напруга u теж синусоїдальна і може бути записана як рівняння

$$u = U_m \sin(\omega t \pm \psi_u). \quad (5.32)$$

Запишемо рівняння (5.31) у комплексній формі

$$\dot{U} = \dot{U}_R + \dot{U}_L. \quad (5.33)$$

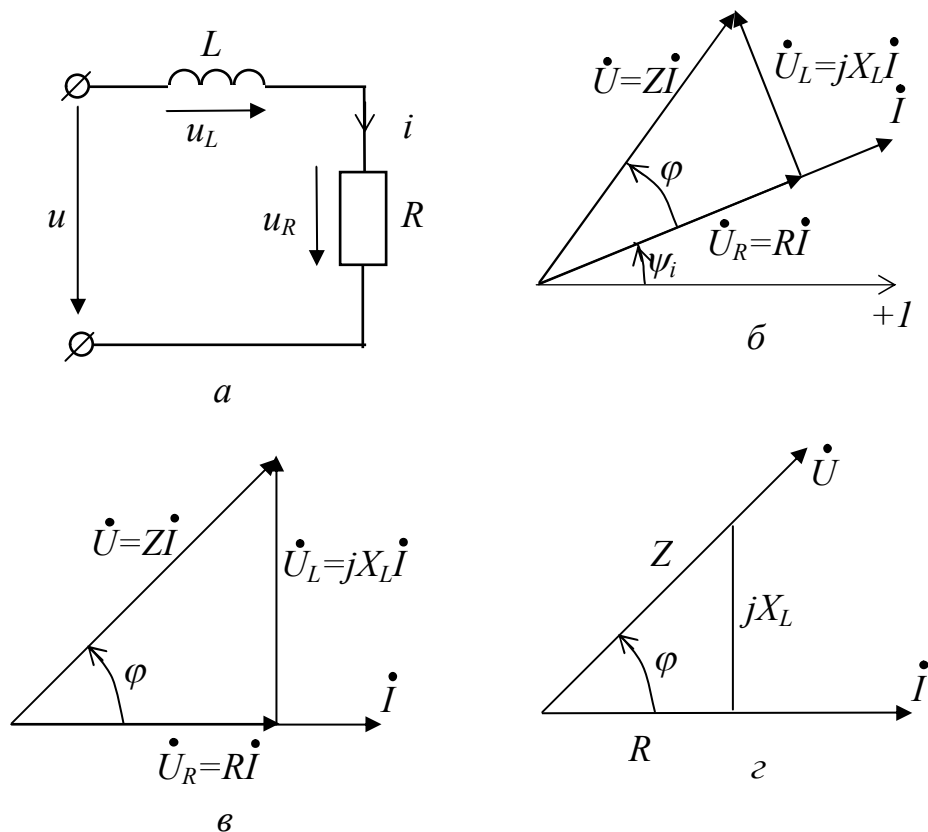


Рис. 5.4 - Схема (а), «трикутники» напруг і опорів котушки з активним опором і індуктивністю (б, в, г)

Тоді рівняння напруги на вході схеми буде мати вигляд

$$\dot{U} = R \cdot \dot{I} + jX_L \cdot \dot{I} = (R + jX_L) \cdot \dot{I} = \underline{Z} \cdot \dot{I} \quad (5.34)$$

Комплексна величина \underline{Z} , має розмірність опору і є коефіцієнтом пропорційності між комплексними значеннями напруги й струму кола. Тому $\underline{Z} = R + jX_L$ називають **комплексом повного опору індуктивної котушки**. Дійсною частиною його є активний опір R , а уявною частиною - комплекс індуктивного опору котушки - jX_L .

У формулах, до яких величина \underline{Z} входить або як множник або як дільник, зручно користуватися не алгебраїчною, а показовою формою її запису:

$$\underline{Z} = R + jX_L = Z \cdot e^{j\varphi_L}, \quad (5.35)$$

де $Z = \sqrt{R^2 + X_L^2}$ - модуль комплексу повного опору індуктивної котушки, а $\varphi_L = \arctg X_L/R$ - його аргумент.

Підставляючи до (5.34) значення Z із (5.35), отримаємо

$$\dot{U} = Z e^{j\varphi_L} \cdot I e^{j\psi_i} = Z \cdot I e^{j(\psi_i + \varphi_L)} = U e^{j\psi_u}, \quad (5.36)$$

де

$$U = Z \cdot I, \quad \psi_u = \psi_i + \varphi_L. \quad (5.37)$$

Початкова фаза ψ_u позитивна, тому в рівнянні (5.32) вона повинна бути взята із знаком "плюс".

Оскільки значення U і ψ_u відомі, рівняння (5.32) можна записати в остаточному вигляді:

$$u = Z \cdot I_m \sin(\omega t + \psi_i + \varphi_L). \quad (5.38)$$

Зіставляючи рівняння (5.38) і (5.30), бачимо, що синусоїда напруги на вході котушки випереджає за фазою синусоїду струму на кут зрушення фаз $\varphi = \varphi_L$.

На рис. 5.4,б наведено векторну діаграму схеми рис. 5.4,а. При побудові цієї діаграми за вихідний взятий вектор струму \dot{I} , розташований під кутом ψ_i до осі +1. Вектор напруги на резисторі $\dot{U}_R = R \cdot \dot{I}$ збігається за фазою з вектором струму, а вектор напруги на індуктивному елементі $\dot{U}_L = jX_L \cdot \dot{I}$ випереджає за фазою вектор струму на кут зрушення фаз $\pi/2$. Вектор напруги \dot{U} дорівнює геометричній сумі векторів: $\dot{U} = \dot{U}_R + \dot{U}_L$. Він випереджає за фазою вектор струму на кут зрушення $\varphi = \varphi_L$.

Векторну діаграму на рис. 5.4,б називають «трикутником» напруг. Для спрощення діаграми початкову фазу струму ψ_i дорівнюють нулю, тоді вектор струму збігається з віссю +1 і «трикутник» напруг розташовується на площині, як показано на рис. 5.4,в.

Якщо кожен із сторін «трикутника» напруг (рис. 5.4,в) розділити на \dot{I} , то одержимо «трикутник» комплексів опорів (рис. 5.4,г). Із цього рисунка видно, що модуль Z комплексу повного опору \underline{Z} є гіпотенузою прямокутного «трикутника» комплексних опорів, сторонами якого є активний R і індуктивний jX_L опори. З нього ж можна визначити кут зрушення фаз між напругою і струмом:

$$\cos \varphi_L = R/Z. \quad (5.39)$$

5.5. Потужність індуктивної котушки

Нехай початкова фаза струму в котушці (рис. 5.4,а) $\psi_i = 0$. Тоді миттєве значення струму (5.30) може бути записане як $i = I_m \sin \omega t$, а напруга на індуктивній котушці $u = U_m \sin(\omega t + \varphi_L)$. На рис. 5.5,а наведені графіки миттєвих значень напруги й струму цієї котушки.

Миттєве значення потужності дорівнює добутку миттєвих значень напруги й струму:

$$\begin{aligned} p &= u \cdot i = U_m I_m \sin(\omega t + \varphi_L) \sin \omega t = \\ &= U_m \cdot I_m [\cos \varphi_L - \cos(2\omega t + \varphi_L)]/2. \end{aligned} \quad (5.40)$$

На рис. 5.5,б наведений графік миттєвого значення потужності, побудований за рівнянням (5.40).

Середнє за період значення потужності

$$P_{\text{сеп}} = P = \frac{1}{T} \int_0^T p dt = \frac{UI}{T} \int_0^T [\cos \varphi_L - \cos(2\omega t + \varphi_L)] dt,$$

або

$$P_{\text{сеп}} = U \cdot I \cos \varphi_L.$$

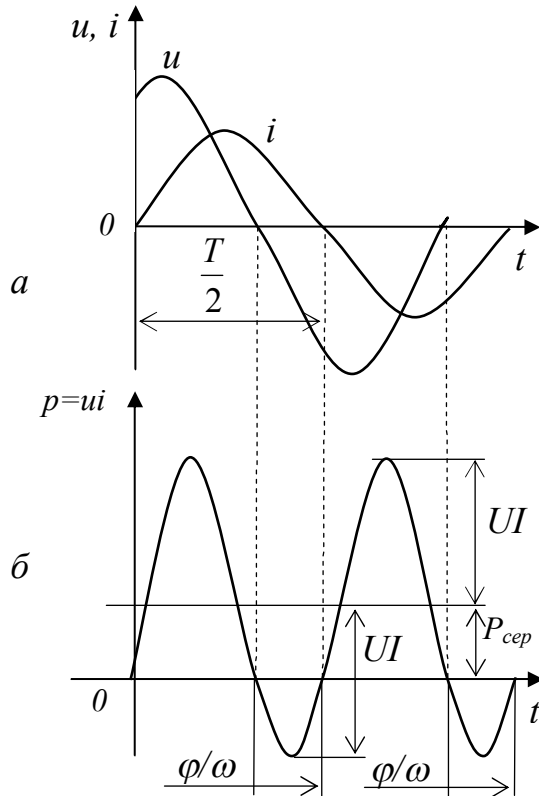
Оскільки $U = Z \cdot I$, а $\cos \varphi_L = R/Z$, то середнє значення потужності можна визначити інакше:

$$P_{\text{сеп}} = U \cdot I \cos \varphi_L = Z \cdot I \cdot I \cdot R/Z = R \cdot I^2 = P. \quad (5.41)$$

З отриманого співвідношення видно, що **середнє значення потужності кола дорівнює його активній потужності**.

Найбільше значення активної потужності, що може бути отримане при даних значеннях напруги й струму, називають **повною потужністю** і позначають S . З рівняння (5.46) випливає, що при $\cos \varphi = 1$ повна потужність

$$P_{\text{max}} = S = U \cdot I. \quad (5.42)$$



Величина

$$X_L \cdot I^2 = X_L \cdot I \cdot I = U_L \cdot I = U \cdot I \sin \varphi_L$$

називається **реактивною індуктивною потужністю** кола:

$$Q_L = X_L \cdot I^2 = U \cdot I \sin \varphi_L. \quad (5.43)$$

Активна, реактивна й повна потужності зв'язані співвідношеннями:

$$P^2 + Q_L^2 = (U \cdot I \cos \varphi_L)^2 + (U \cdot I \sin \varphi_L)^2 = (U \cdot I)^2 (\cos^2 \varphi_L + \sin^2 \varphi_L) = (U \cdot I)^2 = S,$$

або
$$S = \sqrt{P^2 + Q^2}. \quad (5.44)$$

Хоча всі три потужності кола (активна, реактивна й повна) мають однакову розмірність, для їхнього розрізнення введені одиниці різних найменувань: для активної потужності - вати (Вт), для реактивної потужності - вольт-ампери реактивні (Вар), для повної потужності - вольт-ампери (ВА).

Для більш докладного аналізу енергетичного процесу напругу u представимо активною й реактивною складовими $u = u_R + u_L$ і підставимо до формули для миттєвої

Рис.5.5 - Графіки миттєвих значень напруги, струму й потужності для схеми рис.5.4,а

$$p = u \cdot i = (u_R + u_L) \cdot i = p_R + p_L.$$

Перший доданок являє собою миттєве значення активної потужності, графік якої побудований на рис. 5.1,б. Другий доданок є реактивною індуктивною потужністю, графік якої побудований раніше на рис. 5.2,в. Для побудови графіків цих потужностей на рис. 5.6,а побудовано синусоїду струму, перенесену з рис. 5.5,а, й графіки потужностей p_R і p_L , як на рис. 5.1,в і 5.2,в. Підсумовуванням ординат кривих p_R і p_L отримана крива результуючої потужності p , що аналогічна кривій цієї потужності на рис. 5.5,б.

Із зіставлення графіків рис. 5.6 видно, що в першу чверть періоду струм позитивний і зростає. Всі потужності p_R , p_L і p також позитивні. Це означає, що в цей проміжок часу енергія джерела витрачається на теплову енергію і на енергію, що запасується в магнітному полі котушки. До кінця першої чверті пе-

ріоду магнітне поле запасає максимальну енергію $L \cdot I_m^2 / 2$. У другу чверть періоду струм убуває. Убуває також магнітне поле й запас енергії котушки. Частина енергії магнітного поля повертається назад до джерела ($p < 0$).

Протягом часу від $t = T/4$ до $t = T/2 - \varphi_L/\omega$ потужність джерела p менша за активну потужність p . У цей час частина енергії, що розсіюється у вигляді теплової енергії в резисторі R , частково надходить від джерела й частково з магнітного поля. У момент часу $t = T/2 - \varphi_L/\omega$ вся тепла енергія покривається за рахунок енергії, що надходить у коло з магнітного поля ($p = 0, p_L = p_R$).

У перебіг часу від $t = T/2 - \varphi_L/\omega$ до $t = T/2$ потужність $p_L < 0$, потужність $p_R > 0$, але ординати кривої p чисельно дорівнюють сумі ординат кривих p_R і p_L . Це означає, що енергія, яка надходить з магнітного поля назад до джерела, частково витрачається на теплову енергію, а частково повертається назад до джерела. Протягом часу $\Delta t = \varphi_L/\omega$ до джерела повернеться енергія, яка дорівнює заштрихованій на рисунку площі, що обмежена ділянкою кривої p на цьому відрізку часу й віссю абсцис.

У наступні дві чверті періоду енергетичний процес повториться при іншому напрямку струму.

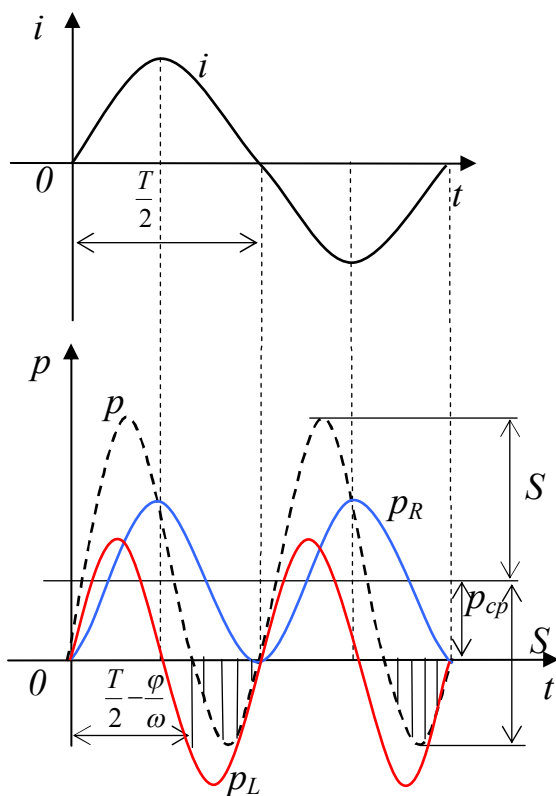


Рис.5.6 - Графіки миттєвих значень струму, потужностей ділянок p_L, p_R і повної потужності p схеми рис. 5.4,а

З розглянутого вище випливає, що графічно **повна потужність S характеризує амплітуду коливання потужності $S = U \cdot I$ біля середнього значення потужності**. Потужність P коливається від додатного значення $U \cdot I + P$ до від'ємного значення $U \cdot I - P$.

Активна потужність P є середньою потужністю перетворення електричної енергії на інші види. Величина P залежить не тільки від струму й напруги, але також і від $\cos \varphi$, який називають коефіцієнтом потужності:

$$\cos \varphi = P/S. \quad (5.45)$$

Коефіцієнт потужності залежить від співвідношення між активним і індуктивним опорам. Його величина показує яку частину повної потужності кола становить активна потужність.

Реактивна потужність Q_L характеризує амплітуду коливання потужності обміну енергією між джерелом і магнітним полем котушки.

Активну, реактивну й повну потужності можна одержати за комплексними значеннями напруги $\dot{U} = Ue^{j\psi_u}$ й струму $\dot{I} = Ie^{j\psi_i}$. Для цього необхідно взяти

сполучений комплекс струму (позначають зірочкою) $I = I^{-j\psi_i}$ і помножити його на комплекс напруги \dot{U} :

$$\dot{U} \cdot I^* = U e^{j\psi_u} \cdot I^{-j\psi_i} = U \cdot I e^{j(\psi_u - \psi_i)} = S e^{j\varphi_L} .$$

Цей добуток позначають буквою S і називають комплексом повної потужності

$$\underline{S} = \dot{U} \cdot I^* = S e^{j\varphi_L} = S \cos \varphi_L + j S \sin \varphi_L = P + j Q_L . \quad (5.46)$$

З рівняння (5.46) видно, що **дійсною частиною комплексу повної потужності є активна потужність P , уявною частиною - комплекс реактивної потужності jQ .**

5.6. Послідовне з'єднання резистора і ідеального конденсатора

Припустимо, що в колі (рис. 5.7,а), яке складається з послідовно з'єднаних резистора й ідеального конденсатора, протікає синусоїдальний струм $i = I_m \sin(\omega t + \psi_i)$. Напруга на вході цього кола відповідно до другого закону Кірхгофа в комплексній формі

$$\dot{U} = \dot{U}_R + \dot{U}_C .$$

Комплексне значення струму можна записати за заданим рівнянням миттєвого значення струму:

$$\dot{I} = \frac{I_m}{\sqrt{2}} e^{j\psi_i} = I e^{j\psi_i} .$$

Тоді комплекси активної і ємнісної напруг

$$\dot{U}_R = R \cdot \dot{I} \quad \text{і} \quad \dot{U}_C = -j X_C \cdot \dot{I} .$$

Комплекс напруги на вході кола

$$\dot{U} = R \cdot \dot{I} - j X_C \cdot \dot{I} = (R - j X_C) \cdot \dot{I} = \underline{Z} \cdot \dot{I} . \quad (5.47)$$

Комплекс повного опору ємнісного кола

$$\underline{Z} = R - j X_C = \sqrt{R^2 + X_C^2} e^{-j\varphi_C} = Z e^{-j\varphi_C} , \quad (5.48)$$

де $Z = \sqrt{R^2 + X_C^2}$ - модуль комплексу повного опору кола, а $\varphi_C = \arctg X_C / R$ - його аргумент.

Якщо вираз (5.47) переписати у вигляді

$$I e^{j\psi_i} = \frac{U e^{j\psi_u}}{Z e^{-j\varphi_C}} ,$$

з нього можна дістати два співвідношення:

$$I = U / Z , \quad (5.49)$$

$$\text{і} \quad \psi_i = \psi_u + \varphi_C . \quad (5.50)$$

Рівняння (5.49) являє собою співвідношення між модулями діючих значень напруги й струму на вході досліджуваного кола (рис.5.7,а).

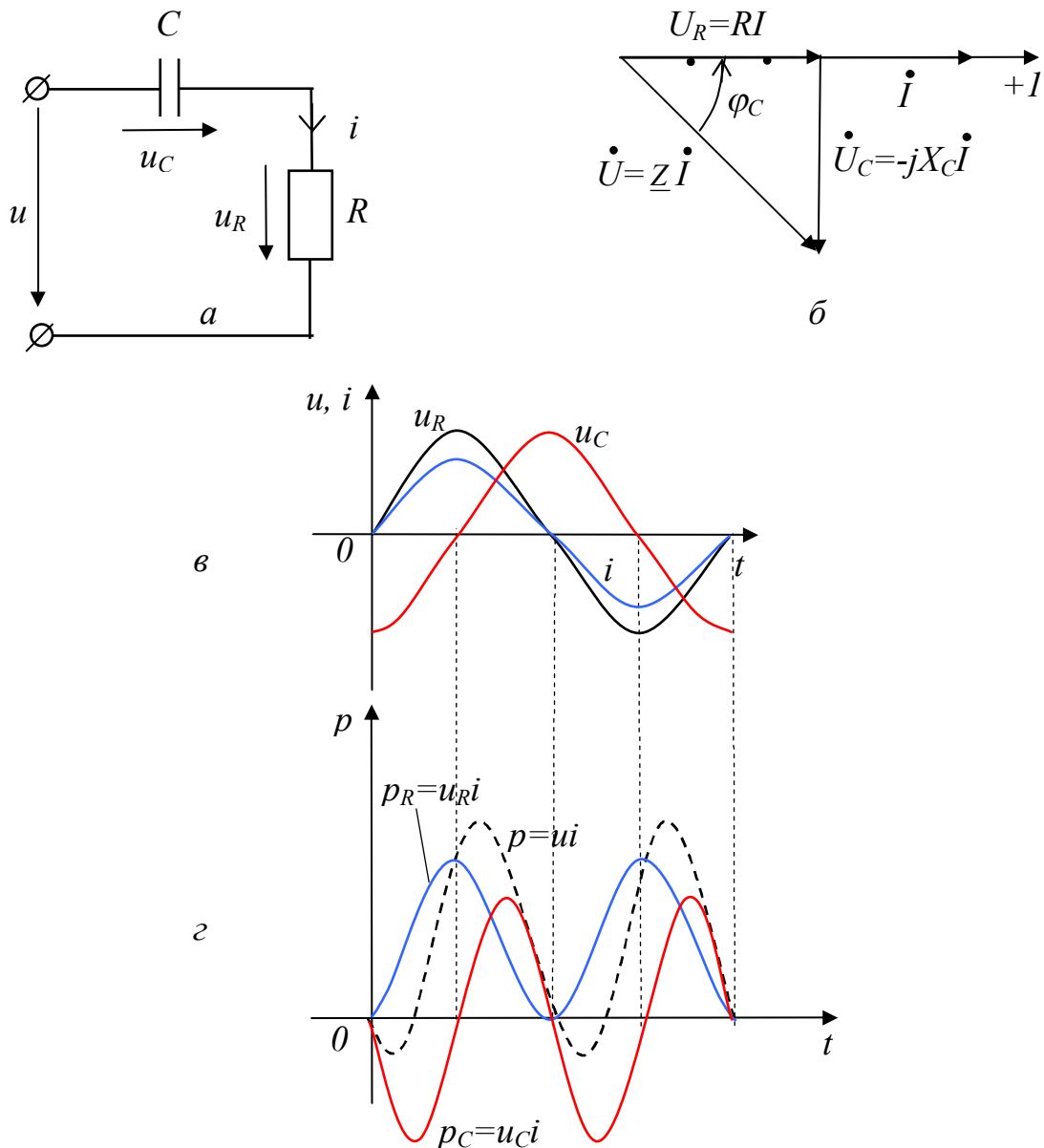


Рис. 5.7 - Схема (а), графіки миттєвих значень напруг, струми й потужності (в, г), векторна діаграма (б) кола послідовно з'єднаних резистора і ємності

З виразу (5.50) випливає, що початкова фаза напруги ψ_u менша за початкову фазу струму ψ_i на кут зрушення фаз φ_c . Отже напруга на вході розглянутого ємнісного кола відстає за фазою від струму на кут зрушення фаз φ_c . Це можна проілюструвати «трикутником» напруг, що побудований на рис. 5.7,б для заданого ємнісного кола. Для спрощення побудови початкова фаза струму ψ_i прийнята рівною нулю. Вектор струму \dot{I} спрямований за віссю $+I$. З ним збігається за фазою вектор активної напруги \dot{U}_R й відстає від нього за фазою на кут зрушення фаз $\pi/2$ вектор напруги на конденсаторі \dot{U}_C . Результуючий вектор напруги \dot{U} на вході кола відстає за фазою від вектора струму на кут зрушення фаз φ_c . Миттєве значення цієї напруги $u = U_m \sin(\omega t + \varphi_c)$.

Миттєва потужність розглянутого ємнісного кола (рис.5.7,а)

$$p = u \cdot i = U_m \cdot I_m \sin(\omega t - \varphi_C) \sin \omega t ,$$

або

$$p = U \cdot I [\cos \varphi_C - \cos(2\omega t - \varphi_C)] .$$

Середнє за період значення потужності

$$P = \frac{1}{T} \int_0^T p dt = U \cdot I \cdot \cos \varphi_C .$$

Як і для індуктивного кола (рис.5.4,а), середнє значення потужності ємнісного двополюсника дорівнює його активній потужності, оскільки

$$P = U \cdot I \cdot \cos \varphi_C = Z \cdot I \cdot I \cdot \frac{R}{Z} = R \cdot I^2 .$$

Реактивна потужність, яка характеризує амплітуду коливання потужності обміну енергією між колом і електричним полем конденсатора,

$$Q = X_C \cdot I^2 = U \cdot I \sin \varphi_C . \quad (5.51)$$

Повна потужність

$$S = U \cdot I = \sqrt{P^2 + Q^2} . \quad (5.52)$$

Комплекс повної потужності

$$\underline{S} = \dot{U} \cdot \dot{I}^* = U e^{j\psi_u} \cdot I e^{-j\psi_i} = U \cdot I e^{j(\psi_u - \psi_i)} = U \cdot I e^{-j\varphi_C} ,$$

або

$$\underline{S} = S e^{-j\varphi_C} = S \cos \varphi_C - j S \sin \varphi_C = P - j Q_C . \quad (5.53)$$

Відповідно до рівняння (5.53) комплекс реактивної ємнісної потужності є від'ємною уявною частиною комплексу повної потужності.

На рис. 5.8,б і г побудовані графіки миттєвих значень струму i , активної u_R і ємнісної u_C напруг, а також активної $p_R = u_R i$, реактивної (ємнісної) $p_C = u_C i$ і повної $p = u i$ потужностей. З рисунка видно, що в проміжки часу, коли $p_C > 0$, відбувається одночасне перетворення енергії, що надходить від джерела живлення, на теплову енергію й на енергію електричного поля конденсатора. У проміжки часу, коли $p_C < 0$, енергія з електричного поля конденсатора повертається назад у коло. При $p_C > p$ частина цієї енергії повертається до джерела, а частина перетворюється на теплову енергію. Потужність в цей час від'ємна. При $p_C < p_R$ перетворення електричної енергії на теплову здійснюється за рахунок енергії, що надходить від джерела живлення і з електричного поля конденсатора.

5.7. Послідовне з'єднання індуктивної котушки і конденсатора

Реальні елементи електричних кіл містять індуктивну, ємнісну й резистивну складові опору й можуть бути представлені схемою заміщення, що включає послідовно з'єднані R , L і C (рис. 5.8,а). Якщо в такому колі проходить струм $i = I_m \sin(\omega t + \varphi_i)$, комплексне значення якого $\dot{I} = I e^{j\psi_i}$, то відповідно до другого закону Кірхгофа в комплексній формі для напруги на вході кола можна записати рівняння

$$\dot{U} = \dot{U}_R + \dot{U}_L + \dot{U}_C . \quad (5.54)$$

Якщо комплекси напруги резистивної, індуктивної і ємнісної ділянок замінити добутками комплексів опору й струму, то рівняння (5.59) можна переписати в такий спосіб:

$$\dot{U} = R \cdot \dot{I} + jX_L \cdot \dot{I} - jX_C \cdot \dot{I} = (R + jX_L - jX_C) \cdot \dot{I} = \underline{Z} \cdot \dot{I}, \quad (5.55)$$

де - \underline{Z} комплекс повного опору кола, обумовлений співвідношенням:

$$\underline{Z} = R + jX_L - jX_C = R + j(X_L - X_C) = R \pm jX, \quad (5.56)$$

де $X = X_L - X_C$ – реактивний опір кола.

Залежно від співвідношення між індуктивним і ємнісним опором розглянутого кола його загальний реактивний опір X може бути: індуктивним ($X_L > X_C$), ємнісним ($X_L < X_C$) і чисто активним ($X_L = X_C$).

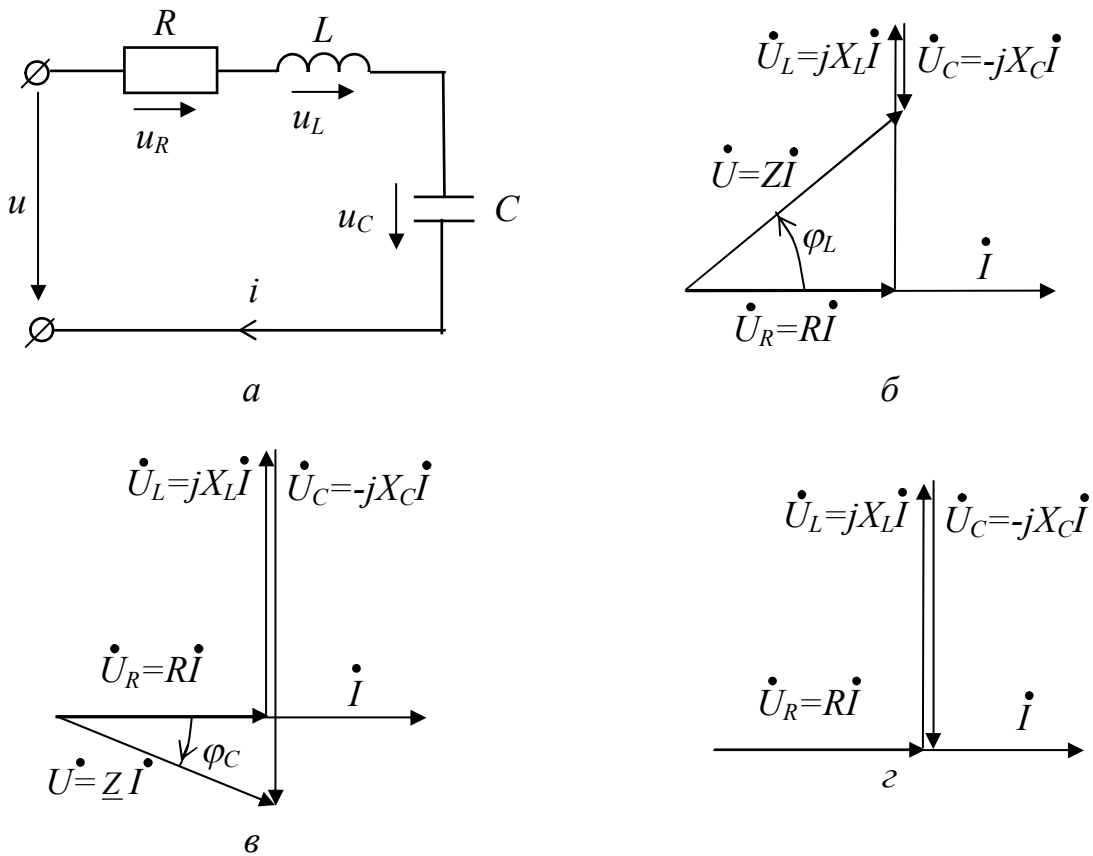


Рис. 5.8 - Схема (а) і векторні діаграми (б, в, г) кола, що складається з послідовно з'єднаних елементів R , L і C

На рис. 5.8 побудовані векторні діаграми для зазначених трьох випадків: рис.5.8,б - для $X_L > X_C$, рис.5.8,в - для $X_L < X_C$ і рис.5.8,г - для $X_L = X_C$. Початкова фаза струму ψ_i на цих діаграмах прийнята рівною нулю.

Комплекс повного опору кола для всіх трьох випадків записують у вигляді

$$\underline{Z} = R + jX_L - jX_C = R + jX. \quad (5.57)$$

Модуль повного опору кола

$$Z = \sqrt{(R^2 + (X_L - X_C)^2)} = \sqrt{R^2 + X^2}. \quad (5.58)$$

Аргумент або кут зрушення фаз φ між векторами напруги й струму

$$\operatorname{tg} \varphi = (X_L - X_C)/R = X/R. \quad (5.59)$$

Додатне значення цього кута означає, що реактивний опір має індуктивний характер. Вектор напруги при цьому випереджає за фазою вектор струму на кут φ (рис. 5.8,б). Від'ємне значення кута φ означає, що реактивний опір X має ємнісний характер. Вектор напруги в цьому випадку відстає за фазою від вектора струму на кут φ (рис. 5.8,в). Коли $\varphi = 0$, вектори напруги й струму кола збігаються за фазою (рис. 5.8,г).

Явище, при якому в послідовному колі з елементів R , L і C загальна напруга кола збігається за фазою з його струмом, називають **резонансом напруг**.

Резонанс напруг виникає, коли реактивний опір кола дорівнює нулю ($X = 0$), тобто коли індуктивний опір дорівнює ємнісному опору кола ($X_L = X_C$). У цьому випадку індуктивна і ємнісна напруги компенсують одна одну ($\dot{U}_C - \dot{U}_L = 0$), тому що вони рівні за величиною й протилежні за фазою. Значення струму й потужності максимальні, від джерела до кола надходить тільки активна енергія.

Однакові за величиною амплітуди коливання реактивних потужностей p_L і p_C при резонансі напруг перебувають у протифазі. Що ж стосується енергій електричного й магнітного полів, в ті моменти часу, коли енергія запасється в електричному полі конденсатора, цей запас здійснюється за рахунок енергії магнітного поля котушки. В інші моменти часу має місце зворотний перехід енергії з електричного поля до магнітного.

Комплекс повної потужності розглянутого кола

$$\underline{S} = \dot{U} \cdot \dot{I}^* = \underline{Z} \cdot \dot{I} \cdot \dot{I}^* = (R + jX_L - jX_C) \cdot I^2 = R \cdot I^2 + jX_L \cdot I^2 - jX_C \cdot I^2,$$

або
$$\underline{S} = P + jQ_L - jQ_C, \quad (5.60)$$

де $Q_L = X_L \cdot I^2$ - реактивна потужність, що обумовлена наявністю в колі індуктивності; $Q_C = X_C \cdot I^2$ - реактивна потужність, що обумовлена наявністю в колі ємності.

5.8. Коло змінного струму з паралельно з'єднаними приймачами

Розглянемо схему кола на рис. 5.9,а, що складається з двох паралельних гілок, параметри яких R_1 , L_1 , R_2 і C_2 задані. Нехай відомі напруга U і частота f джерела й необхідно визначити струми, потужності кола і його еквівалентний опір відносно вхідних затискачів.

Розрахунок можна почати з вибору початкової фази загальної напруги, для чого вектор напруги зручно направити за однією з осей $+I$ або $+j$. Прийнемо $\dot{U} = U$, що відповідає напрямку вектора \dot{U} за віссю $+1$.

Задані параметри гілок дозволяють записати їхні комплекси повних опорів:

$$\begin{aligned} \underline{Z}_1 &= R_1 + j\omega L_1 = Z_1 e^{j\varphi_1} \\ \underline{Z}_2 &= R_2 - j \frac{1}{\omega C_2} = Z_2 e^{-j\varphi_2} \end{aligned}$$

Знаючи комплексні значення \dot{U} , \underline{Z}_1 і \underline{Z}_2 , можна знайти струми гілок, користуючись законом Ома в комплексній формі:

$$\dot{I}_1 = \dot{U} / \underline{Z}_1 \quad \text{і} \quad \dot{I}_2 = \dot{U} / \underline{Z}_2. \quad (5.61)$$

Загальний струм нерозгалуженої частини кола визначимо за першим законом Кірхгофа:

$$\dot{I} = \dot{I}_1 + \dot{I}_2. \quad (5.62)$$

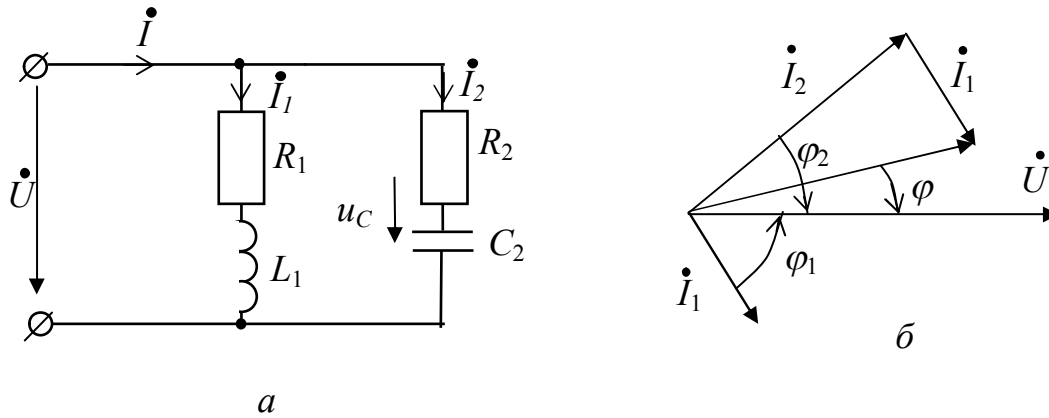


Рис. 5.9 - Схема (а) і векторна діаграма (б) кола, що складається з двох паралельних гілок

Складемо баланс потужності кола, за яким комплекс повної потужності джерела

$$\underline{S}_{дж} = \dot{U} \cdot \dot{I}^* \quad (5.63)$$

повинен дорівнювати сумі комплексів повних потужностей його окремих гілок:

$$\underline{S}_1 + \underline{S}_2 = \dot{U} \dot{I}_1^* + \dot{U} \dot{I}_2^* . \quad (5.64)$$

Потужності гілок можуть бути підраховані й за іншими формулами:

$$\underline{S}_1 = \underline{Z}_1 \cdot I_1^2 = R_1 \cdot I_1^2 + jX_1 \cdot I_1^2 = P_1 + jQ_{L1};$$

$$\underline{S}_2 = \underline{Z}_2 \cdot I_2^2 = R_2 \cdot I_2^2 - jX_2 \cdot I_2^2 = P_2 - jQ_{C2}.$$

Сумарна потужність гілок

$$\underline{S} = \underline{S}_1 + \underline{S}_2 = P_1 + P_2 + jQ_{L1} - jQ_{C2}$$

повинна дорівнювати потужності, що підрахована за формулою (5.63).

Для визначення комплексу еквівалентного повного опору \underline{Z} схеми скористаємось рівнянням (5.62) і замість струмів підставимо їхні значення, виражені через напругу \dot{U} й опори \underline{Z} , \underline{Z}_1 і \underline{Z}_2 :

$$\frac{\dot{U}}{\underline{Z}} = \frac{\dot{U}}{\underline{Z}_1} + \frac{\dot{U}}{\underline{Z}_2} .$$

Звідси

$$\frac{1}{\underline{Z}} = \frac{1}{\underline{Z}_1} + \frac{1}{\underline{Z}_2} . \quad (5.65)$$

Якщо є n паралельних гілок, то замість формули (5.65) можна записати загальну формулу для визначення еквівалентного опору:

$$\frac{1}{\underline{Z}} = \sum_{k=1}^n \frac{1}{\underline{Z}_k} \quad (5.66)$$

Побудуємо векторну діаграму струмів заданого кола (рис. 5.9,б). За вихідний візьмемо вектор напруги, загальний для всіх гілок. Направимо цей вектор за віссю +1 і відкладемо відносно нього вектори струмів \dot{I}_1 і \dot{I}_2 гілок. Вектор струму \dot{I}_1 відстає за фазою від вектора напруги на кут φ_1 , а вектор струму \dot{I}_2 випереджає за фазою вектор напруги на кут φ_2 . Вектор струму \dot{I} нерозгалуженої ділянки дорівнює геометричній сумі векторів струмів гілок і випереджає за фазою вектор напруги на кут φ .

5.9. Активні й реактивні складові провідності й струму

У колах синусоїдального струму величину, зворотну комплексу повного опору \underline{Z} , називають **комплексом повної провідності** й позначають буквою \underline{Y} :

$$\underline{Y} = \frac{1}{\underline{Z}} \quad (5.67)$$

Як і всяке комплексне число, комплекс провідності має дійсну частину, що позначають буквою G і називають **активною провідністю**, і уявну частину, позначувану буквою B і названу **реактивною провідністю**.

Якщо коло активно-індуктивне, то його комплекс опору $\underline{Z} = R + jX_L$ й комплекс провідності

$$\underline{Y} = \frac{1}{R + jX_L} = \frac{R - jX_L}{R^2 + X_L^2} = \frac{R}{Z^2} - j \frac{X_L}{Z^2}, \quad (5.68)$$

або

$$\underline{Y} = G - jB_L, \quad (5.69)$$

де активна G і реактивна B_L провідності визначаються співвідношеннями

$$G = R / Z^2 \quad \text{і} \quad B_L = X_L / Z^2. \quad (5.70)$$

Якщо коло активно-ємнісне, то його комплекс опору $\underline{Z} = R - jX_C$, а комплекс провідності

$$\underline{Y} = \frac{1}{R - jX_C} = \frac{R + jX_C}{R^2 + X_C^2} = \frac{R}{Z^2} + j \frac{X_C}{Z^2}, \quad (5.71)$$

або

$$\underline{Y} = G + jB_C. \quad (5.72)$$

Порівняння виразів (5.68) і (5.71) показує, що активну G і реактивну B провідності активно-ємнісного й активно-індуктивного кіл визначають за однаковими формулами. Відмінність в тому, що **уявна частина комплексу провідності додатна для ємнісного кола й від'ємна для індуктивного кола**.

При використанні векторних діаграм для аналізу явищ у колах синусоїдального струму користуються також розкладанням вектора струму на його активну \dot{I}_a й реактивну \dot{I}_p складові. Це розкладання можна провести графічно або аналітично.

Розглянемо *графічний спосіб розкладання* струму. Візьмемо схему кола на рис. 5.9,а, що складається з двох паралельних гілок, і на рис. 5.10,а повторимо її векторну діаграму, що була побудована раніше на рис. 5.9,б.

Кожний з векторів струму на діаграмі розкладений на дві складові: активну, співпадаючу за фазою з вектором напруги, і реактивну, перпендикулярну до вектора напруги. Оскільки струми збігаються за фазою з напругою тільки в активних елементах, а відстають або випереджають за фазою напругу на $\pi/2$ тільки в реактивних елементах, *складові струму* \dot{I}_a й \dot{I}_p називають **активною і реактивною**.

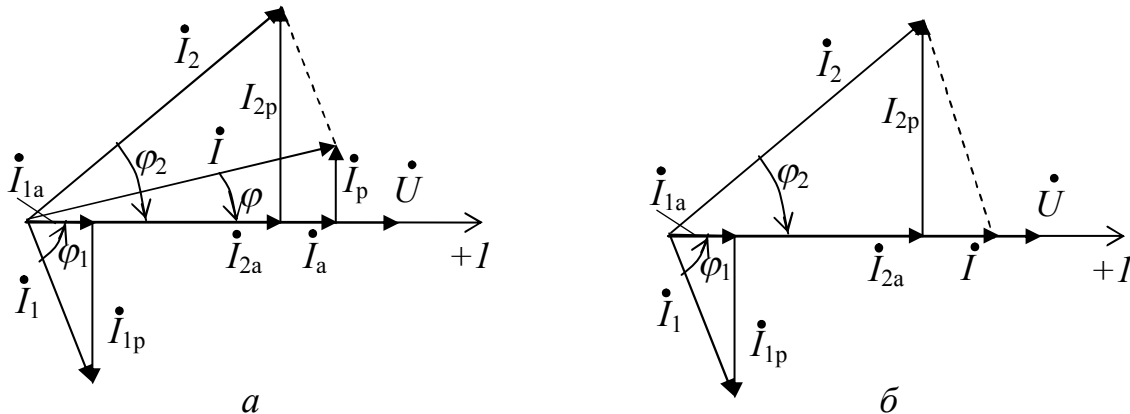


Рис. 5.10 - Розкладання загального вектора струму розгалуженого кола на активні й реактивні складові

Модулі активних і реактивних складових струмів \dot{I}_1 і \dot{I}_2

$$\begin{aligned} I_{1a} &= I_1 \cos \varphi_1, & I_{1p} &= I_1 \sin \varphi_1, \\ I_{2a} &= I_2 \cos \varphi_2, & I_{2p} &= I_2 \sin \varphi_2. \end{aligned}$$

Складові струму й провідності можна використати для визначення потужності кола:

$$\begin{aligned} P &= U \cdot I \cdot \cos \varphi = U \cdot I_a = G \cdot U^2, \\ Q_L &= U \cdot I \cdot \sin \varphi_L = U \cdot I_{Lp} = B_L \cdot U^2, \\ Q_C &= U \cdot I \cdot \sin \varphi_C = U \cdot I_{Cp} = B_C \cdot U^2. \end{aligned}$$

При *аналітичному способі розкладання* струм будь-якої гілки представляють добутком комплексних значень напруги й провідності:

$$\dot{I} = \underline{Y} \cdot \dot{U} = (G + jB) \cdot \dot{U} = G \cdot \dot{U} + jB \cdot \dot{U} = \dot{I}_a + \dot{I}_p. \quad (5.73)$$

У співвідношенні (5.73) величину $\dot{I}_a = G \cdot \dot{U}$ називають **активною**, а величину $\dot{I}_p = jB \cdot \dot{U}$ - **реактивною складовою струму**.

Користуючись активною і реактивними складовими провідності й струму, зручно проводити аналіз режимів розгалуженого кола. Як приклад, повернемося до розгляду кола, що складається з двох паралельних гілок (рис. 5.9,а).

Комплекс еквівалентної повної провідності цього кола

$$\underline{Y} = \underline{Y}_1 + \underline{Y}_2 = G_1 - jB_L + G_2 + jB_C,$$

або

$$\underline{Y} = G_1 + G_2 - j(B_L - B_C) = G_{\text{екв}} \pm jB_{\text{екв}}.$$

Якщо реактивна провідність індуктивної гілки більша за реактивну провідність ємнісної гілки ($B_L > B_C$), то $\underline{Y} = G_{екв} - jB_{екв}$, і коло є активно-індуктивним. Струм нерозгалуженої ділянки такого кола дорівнює струму джерела живлення і відстає за фазою від напруги джерела. При $B_L < B_C$ коло є активно-ємнісним, і струм випереджає за фазою напругу на цій ділянці.

У паралельному колі з індуктивними і ємнісними приймачами (рис. 5.9,а) можливе явище, коли загальний струм кола (струм нерозгалуженої ділянки) і напруга на вході кола збігаються за фазою. Це явище називають **резонансом струму**.

Реактивні складові струмів індуктивної і ємнісної гілок при резонансі струмів рівні за величиною і протилежні за фазою (рис. 5.11,б). Отже, при резонансі струмів будь-якого паралельного кола його реактивний індуктивний струм \dot{I}_{Lp} і реактивний ємнісний струм \dot{I}_{Cp} взаємно компенсуються. Коло являє собою активний опір, еквівалентна провідність якого дорівнює сумі активних провідностей гілок (рис.5.9,а):

$$\underline{Y} = G_{екв} = G_1 + G_2 .$$

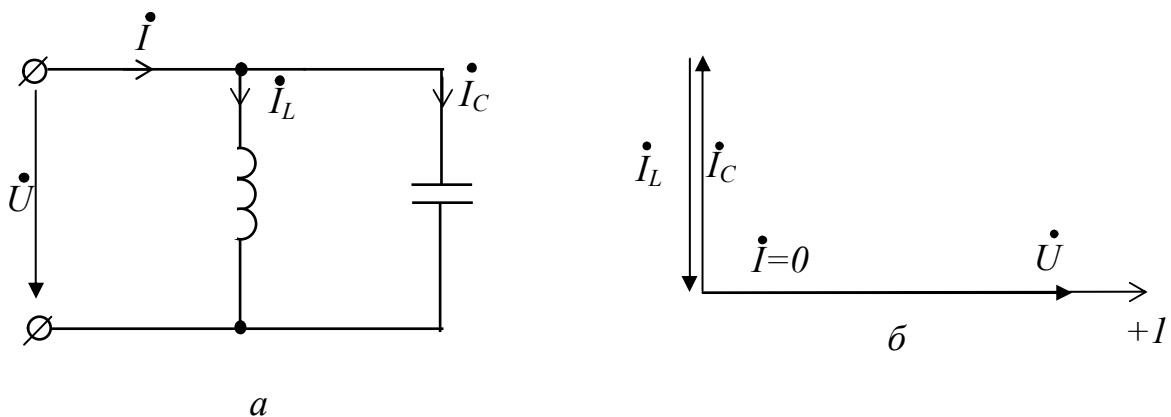


Рис. 5.11 - Еквівалентна схема паралельного з'єднання двох ідеальних індуктивного і ємнісного елементів (а) і її векторна діаграма (б)

Коло має тільки активні складові струмів

$$\dot{I} = \dot{I}_{1a} + \dot{I}_{2a}$$

і споживає тільки активну енергію, тому що реактивні потужності пропорційні реактивним складовим їхніх струмів:

$$Q_L = U \cdot I_{Lp} \quad \text{і} \quad Q_C = U \cdot I_{Cp} ,$$

а коливання цих потужностей перебувають у протифазі.

Отже коло при резонансі струмів не споживає від джерела реактивної енергії. У ньому має місце взаємний обмін енергіями між електричним і магнітним полями. Джерело живлення тільки компенсує втрату енергії в активних опорах гілок.

Якщо коло складається з двох паралельно з'єднаних ідеальних індуктивного і ємнісного елементів (рис. 5.11,а). Умови резонансу струмів такого кола

$\dot{I}_{Lp} = \dot{I}_{Cp}$ або $B_L = B_C$, або $1/X_L = 1/X_C$ зводяться до умови $X_L = X_C$. Внаслідок відсутності активних опорів, загальний струм цього кола дорівнює нулю ($\dot{I} = 0$), хоча в кожній з гілок проходить струм $\dot{I}_{Lp} = \dot{I}_{Cp}$ (рис. 5.11,б).

5.10. Підвищення коефіцієнта потужності в колах змінного струму

Більшість сучасних споживачів електричної енергії змінного струму являють собою індуктивні навантаження, струми яких відстають за фазою від напруг джерела живлення. Активна потужність таких споживачів визначається за формулою

$$P = U \cdot I \cdot \cos \varphi \quad (5.74)$$

тобто залежить від коефіцієнта потужності $\cos \varphi$.

Джерела живлення при номінальній напрузі U_n забезпечують певну **номінальну потужність** S_n . Із зменшенням $\cos \varphi$ споживача його струм зростає і може перевищувати номінальне значення, що є недопустимим.

Робота споживача з малим коефіцієнтом потужності приводить також до збільшення потужності втрат у лінії передачі електричної енергії від джерела до споживача. Якщо опір проводів цієї лінії R , то потужність втрат у ній

$$\Delta P = R \cdot I^2 = R \cdot \frac{P^2}{U^2 \cos^2 \varphi} \quad (5.75)$$

Потужність втрат, як видно з (5.75), тим більша, чим нижче $\cos \varphi$ установки. Отже, **чим нижче $\cos \varphi$ споживача, тим дорожче передача до нього електроенергії**.

Щоб підвищити економічність енергетичних установок, вживають заходи щодо підвищення коефіцієнта потужності споживачів. Ідея підвищення $\cos \varphi$ полягає в наступному. Загальний струм індуктивного споживача розглядають таким, що складається з активної й реактивної складових. Активна потужність споживача при даній напрузі визначається активною складовою струму: $P = U \cdot I_a$, тому при заданому значенні активної потужності вона повинна залишатися незмінною. Знизити струм споживача в цьому випадку можна тільки за рахунок зменшення індуктивної складової струму споживача. Це здійснюють шляхом паралельного підключення до навантаження будь-якого приймача з ємнісним струмом, наприклад батареї спеціальних конденсаторів.

Визначимо формулу для розрахунку ємності батарей конденсаторів, яку необхідно включити паралельно індуктивному споживачеві з $\cos \varphi$, щоб довести коефіцієнт потужності установки до заданого значення $\cos \varphi$. Активна потужність і напруга споживача задані.

На рис. 5.12,а показана еквівалентна схема споживача $R_{сп} + jX_{сп}$ і батареї конденсаторів C , а на рис. 5.12,б - її векторна діаграма. З діаграми видно, що для одержання кута зрушення фаз необхідної величини ємнісна гілка кола повинна мати струм, який дорівнює різниці реактивних складових струмів спожи-

вача до компенсації кута зрушення фаз \dot{I}_{pcn} і після компенсації кута зрушення фаз \dot{I}_p :

$$\dot{I}_c = \dot{I}_{pcn} - \dot{I}_p. \quad (5.76)$$

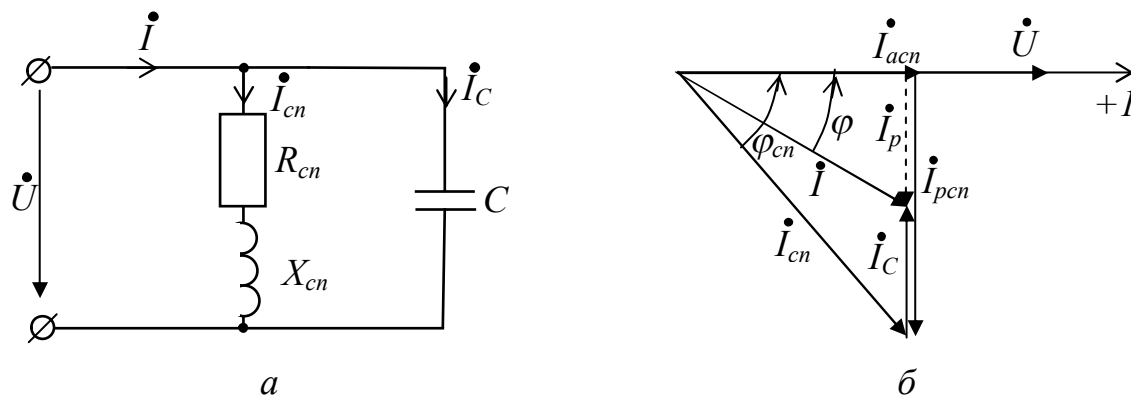


Рис. 5.12 - Еквівалентна схема споживача і батарей конденсаторів (а) і її векторна діаграма (б)

З векторної діаграми ці струми можна визначити через активну складову струму споживача \dot{I}_{acnc} :

$$I_{pcnc} = I_{acnc} \operatorname{tg} \varphi_{cn} \quad \text{і} \quad I_p = I_{acnc} \operatorname{tg} \varphi.$$

Тому вираз (5.76) можна переписати у вигляді

$$I_c = I_{acnc} (\operatorname{tg} \varphi_{cn} - \operatorname{tg} \varphi). \quad (5.77)$$

Струм I_c в цьому рівнянні може бути виражений через напругу і ємність ($I_c = U \cdot \omega C$), а струм I_{acnc} - через потужність і напругу ($I_{acnc} = P/U$). Тому замість (5.77) матимемо іншу рівність:

$$U \cdot \omega C = \frac{P}{U} (\operatorname{tg} \varphi_{cn} - \operatorname{tg} \varphi),$$

з якої можна знайти шукане значення ємності батарей конденсаторів:

$$C = \frac{P}{\omega U^2} (\operatorname{tg} \varphi_{cn} - \operatorname{tg} \varphi). \quad (5.78)$$

Найчастіше за допомогою батарей конденсаторів компенсацію кута зрушення фаз регулюють до значень $\cos \varphi$ 0,9 - 0,95.

Контрольні запитання з теми 5

1. В яких елементах електричного кола відбувається необоротне перетворення електричної енергії?
2. Поясніть, чому при постійному струмі включення до кола конденсатора рівноцінне розриву кола, а при змінному струмі коло залишається замкнутим (струм через ємність проходить)?
3. Напишіть вираз для миттєвого значення струму в колі, що складається з послідовно з'єднаних елементів R і L , якщо до затискачів кола прикладена напруга $u = U_m \cdot \sin(\omega t + \psi_u)$.
4. Напишіть вираз для миттєвого значення струму в колі, що складається з послідовно з'єднаних елементів R і C , якщо до затискачів кола прикладено напругу $u = U_m \cdot \sin(\omega t + \psi_u)$.
5. Напишіть вираз для миттєвого значення напруги на затискачах кола, що складається з котушки з активним опором R і індуктивністю L , якщо миттєве значення струму $i = I_m \cdot \sin(\omega t + \psi_i)$. Накресліть векторну діаграму для цього кола.
6. Котушка з параметрами R і L включена паралельно з конденсатором з ємністю C . Напруга на затискачах кола $u = U_m \cdot \sin(\omega t + \psi_u)$. Напишіть вираз для миттєвого значення струму в нерозгалуженій частині кола.
7. Які кути зрушення фаз між напругами R , L і C -елементів, ввімкнених послідовно?
8. Які кути зрушення фаз між струмами R , L і C -елементів, ввімкнених паралельно?
9. Визначте умови резонансу напруг в колі, накресліть для цього режиму векторну діаграму.
10. Напишіть закон Ома й закони Кірхгофа в комплексній формі.
11. Доведіть, що в колі змінного струму з послідовним включенням декількох елементів можливі умови, при яких напруга на будь-якому з елементів буде перевищувати напругу на вході кола.
12. Доведіть, що в колі змінного струму з паралельним включенням декількох елементів можливі умови, при яких струм у будь-якій гілці буде перевищувати струм нерозгалуженої ділянки.
13. Запишіть вираз еквівалентного комплексного опору для змішаного з'єднання опорів.
14. Накресліть «трикутники» опорів і провідностей, виведіть формули переходу від опорів до провідностей (від провідностей до опорів).
15. Напишіть умову настання резонансу струмів, виражену через опори паралельних гілок.
16. Побудуйте вектор напруги \dot{U} і вектор струму \dot{I} , зрушені між собою на фазовий кут $\varphi > 0$. Розкладіть той і інший вектори на активну й реактивну складові.
17. Накресліть «трикутник» потужностей, напишіть формули для сторін цього «трикутника».
18. Накресліть графік миттєвої потужності в колі при різних приймачах (активному, індуктивному, ємнісному, змішаному).
19. Що характеризує миттєва потужність кола? Доведіть, що миттєва потужність може приймати як додатні так і від'ємні значення.

Задачі до теми 5 і приклади їхнього розв'язання

Задача 5.1. Струм змінюється за законом $i = I_m \cdot \sin(\omega t + \psi_i)$ А. Визначити його комплексну амплітуду й комплексний діючий струм. Вихідні дані наведені в табл. 5.1

Таблиця 5.1

Параметр	Варіант завдання										
	К	0	1	2	3	4	5	6	7	8	9
I_m , А	8	6	4	2	3	5	7	9	5	4	3
ψ_i , рад	$\pi/18$	$-\pi/24$	$\pi/30$	$\pi/40$	$\pi/10$	$\pi/16$	$\pi/20$	$\pi/26$	$-\pi/14$	$\pi/22$	$\pi/28$

Розв'язання задачі для варіанта К.

Для синусоїдального струму з амплітудою $I_m = 8$ А і початковою фазою $\psi_i = \pi/18$ комплексна амплітуда струму й комплексний струм відповідно дорівнюють

$$I_m = 8e^{j\frac{\pi}{18}} = 8\left(\cos\frac{\pi}{18} + j\sin\frac{\pi}{18}\right) = 7,88 + j1,39,$$

$$\dot{I} = \frac{8}{\sqrt{2}}e^{j\frac{\pi}{18}} \cong 5,7\left(\cos\frac{\pi}{18} + j\sin\frac{\pi}{18}\right) = 5,57 + j0,98.$$

Задача 5.2. У мережу змінного струму при напрузі U і частоті f включені ідеальна котушка з індуктивністю L ($R_k = 0$). Визначити реактивну потужність Q котушки й енергію W_{Lm} , що запасється у магнітному полі котушки, записати вираз для миттєвих значень напруги u , струму i , ЕРС самоіндукції e , миттєвої потужності p і середньої потужності P за період, якщо початкова фаза напруги ψ_u . Побудувати часову й векторну діаграми. Вихідні дані наведені в табл. 5.2

Таблиця 5.2

Параметр	Варіант завдання										
	К	0	1	2	3	4	5	6	7	8	9
U , В	120	110	100	90	80	70	120	110	100	90	80
f , Гц	50	50	50	50	50	60	60	60	60	50	50
L , мГн	9	7	5	6	8	9	7	5	6	8	10
ψ_u , рад	$\pi/2$	$\pi/2$	$\pi/4$	$\pi/4$	$\pi/4$	$\pi/2$	$\pi/2$	$\pi/2$	$\pi/4$	$\pi/4$	$\pi/4$

Розв'язання задачі для варіанта К.

Індуктивний опір котушки: $X_L = \omega L = 2\pi f = 2 \cdot 3,14 \cdot 50 \cdot 0,009 = 3$ Ом.

Діюче значення струму: $I = U/X_L = 120/3 = 40$ А.

Реактивна потужність кола: $Q = U \cdot I = 120 \cdot 40 = 4800$ Вар.

Максимальна енергія, що запасється в магнітному полі котушки:

$$W_{Lm} = L \cdot I^2 = 0,009 \cdot 40^2 = 14,4 \text{ Дж.}$$

Амплітудне значення напруги $U_m = \sqrt{2} \cdot U = 1,41 \cdot 120 = 169,2$ В і струму $I_m = \sqrt{2} \cdot I = 1,41 \cdot 40 = 56,4$ А.

Миттєві значення:

напруги $u = u_L = U_m \cdot \sin(\omega t + \pi/2) = 169,2 \sin(3,14t + \pi/2)$ В;

струму $i = I_m \cdot \sin \omega t = 56,4 \cdot \sin 3,14 t$ А;

ЕРС самоіндукції котушки $e = -u = 169,2 \cdot \sin(3,14t - \pi/2)$ В;

потужності кола $p = u \cdot i = U_m \cdot \sin(\omega t + \pi/2) \cdot I_m \cdot \sin \omega t = U_m \cdot \cos \omega t \cdot I_m \cdot \sin \omega t = U_m \cdot I_m \cdot \sin 2\omega t / 2$, внаслідок $\sin(\omega t + \pi/2) = \cos \omega t$, а $\sin 2\omega t = 2 \sin \omega t \cdot \cos \omega t$.

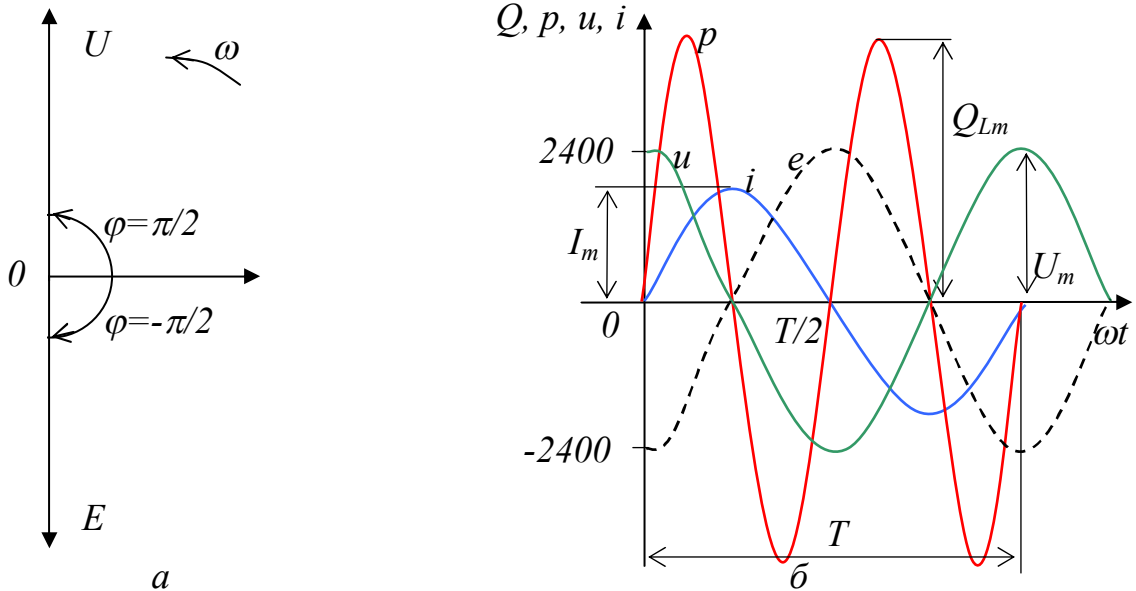


Рис.5.13 - Векторна діаграма (а) і графіки миттєвих значень (б) до задачі 5.2

Для діючих значень напруги й струму:

$$p = u \cdot i = U \cdot I \cdot \sin 2\omega t = 120 \cdot 40 \cdot \sin(2 \cdot 3,14 \cdot t) = 4800 \cdot \sin 6,28 t \text{ ВА.}$$

Середня потужність за період:

$$P = \frac{1}{T} \int_0^T p \cdot dt = \frac{1}{T} \int_0^T U \cdot I \cdot \sin 2\omega t \cdot dt = 0.$$

Векторна діаграма для діючих значень напруги й струму наведена на рис.5.13,а.

Графік зміни миттєвої потужності являє собою синусоїду з подвійною частотою й амплітудою Q_{Lm} (рис. 5.13,б). При цьому реактивна потужність

$$Q_L = \frac{U_m \cdot I_m}{2} = \frac{\sqrt{2}U \cdot \sqrt{2}I}{2} = U \cdot I = 120 \cdot 40 = 4800 \text{ Вар.}$$

Задача 5.3. До мережі змінного струму при напрузі U і частоті f включений конденсатор з ємністю C ($R_C = 0$). Визначити реактивний опір конденсатора X_C , струм i , реактивну потужність Q_C , максимальну енергію W_{Cm} , що запасється в електричному полі конденсатора. Записати вирази для миттєвих значень струму i і миттєвої потужності p . Побудувати часову й векторну діаграми. Вихідні дані наведені в табл. 5.3.

Таблиця 5.3

Параметр	Варіант завдання										
	К	0	1	2	3	4	5	6	7	8	9
$U, В$	220	220	220	210	210	210	127	127	127	120	120
$f, Гц$	50	50	50	60	60	60	60	50	50	50	50
C мкф	20	18	14	10	20	18	14	10	16	20	30
$\psi_u, рад$	0	0	0	30	30	30	60	60	60	157	157

Розв'язання задачі для варіанта К.

Реактивний опір конденсатора:

$$X_C = \frac{1}{\omega \cdot C} = \frac{1}{2\pi \cdot f \cdot C} = \frac{1}{2 \cdot 3,14 \cdot 50 \cdot 20 \cdot 10^{-6}} = 160 \text{ Ом.}$$

Струм у колі конденсатора: $I = U / X_C = 220 / 160 = 1,37 \text{ А.}$

Реактивна потужність кола: $Q_C = U \cdot I = 220 \cdot 1,37 = 302 \text{ Вар.}$

Максимальна енергія, що запасється в електричному полі конденсатора:
 $W_{Cm} = C \cdot U^2 = 20 \cdot 10^{-6} \cdot 220^2 = 968 \cdot 10^{-3} \text{ Дж.}$

Миттєве значення струму в колі:

$$i = C \frac{du}{dt} = C \frac{d(U_m \sin \omega t)}{dt} = C \cdot U_m \cdot \omega \cdot \sin(\omega t + \pi/2) = I_m \cdot \cos \omega t.$$

Миттєва потужність кола $p = u \cdot i = U_m \sin \omega t \cdot I_m \cos \omega t = U_m \cdot I_m \frac{\sin 2\omega t}{2},$

або для діючих значень струму й напруги

$$p = U \cdot I \cdot \sin 2\omega t = 220 \cdot \frac{220}{160} \cdot \sin(2 \cdot 314t) = 302 \sin 628t.$$

Векторна діаграма струму й напруги наведена на рис.5.14,а.

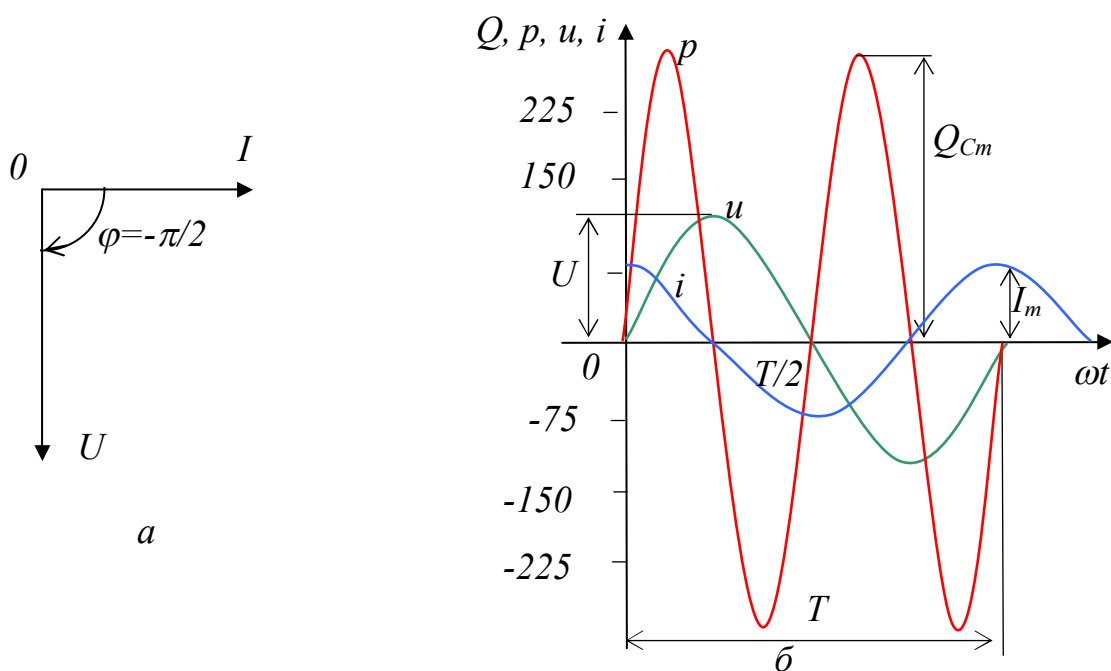


Рис.5.14 - Векторна діаграма (а) і графіки миттєвих значень (б) до задачі 5.3

Часові графіки напруги, струму й потужності наведені на рис.5.14,б. Графік зміни миттєвої потужності в часі являє собою синусоїду з подвійною частотою й амплітудою, яка дорівнює реактивній потужності:

$$Q_{cm} = \frac{U_m \cdot I_m}{2} = \frac{\sqrt{2}U \cdot \sqrt{2}I}{2} = U \cdot I = 220 \cdot 1,37 = 302 \text{ Вар.}$$

Задача 5.4. Діюче значення напруги, прикладеної до електричного кола (рис. 5.15) U , частота напруги f , опір резистора R , індуктивність котушки L , ємність конденсатора C . Користуючись комплексним методом, знайти діючі значення струмів у гілках кола й напруг на його елементах, повну S , активну P і реактивну Q потужності кола. Вихідні дані наведені в табл. 5.4.

Таблиця 5.4

Параметр	Варіант завдання										
	К	0	1	2	3	4	5	6	7	8	9
U , В	100	110	120	130	100	110	120	130	90	90	80
f , Гц	50	50	50	50	60	60	60	60	60	50	50
R , Ом	10	14	16	18	22	20	17	15	13	12	11
L , мГн	31,8	30	28	26	27	29	32	34	30	29	27
C мкф	318,5	310	300	280	260	250	270	290	300	310	305

Розв'язання задачі для варіанта К.

Прийнявши початкову фазу напруги рівною нулю, для комплексу напруги можемо записати

$$\dot{U} = 100e^{j0} = 100.$$

Комплексні опори індуктивної котушки й конденсатора:

$$\underline{Z}_L = jX_L = j\omega L = j314 \cdot 31,8 \cdot 10^{-3} = j10 = 10e^{j\frac{\pi}{2}},$$

$$\underline{Z}_C = -jX_C = -j\frac{1}{\omega C} = -j\frac{1}{314 \cdot 318,5 \cdot 10^{-6}} = -j10 = 10e^{-j\frac{\pi}{2}}$$

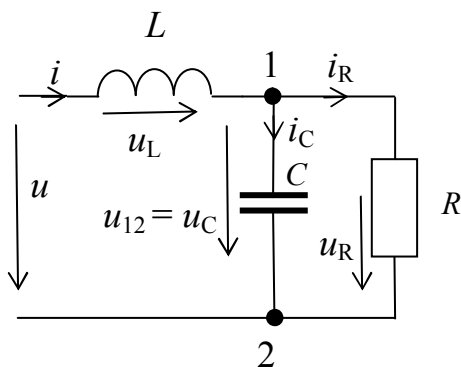


Рис.5.15 - Схема кола до задачі 5.4

де кутова частота $\omega = 2\pi f = 314 \text{ с}^{-1}$.

Для визначення комплексних струмів можна скористуватися будь-яким відомим методом розрахунку електричних кіл, наприклад, методом вузлових потенціалів. Вважаючи, що комплексний потенціал вузла 2 дорівнює нулю $\varphi_2 = 0$, маємо $\underline{Y}_{11} \cdot \dot{\varphi}_1 = \dot{I}_{11}$, звідки

$$\dot{\varphi}_1 = \frac{\dot{I}_{11}}{\underline{Y}_{11}} = \frac{-j10}{0,1} = -j100 = 100e^{-j\frac{\pi}{2}},$$

де комплексна вузлова провідність і розра-

хунковий комплексний струм у вузлі відповідно дорівнюють

$$\underline{Y}_{11} = \frac{1}{\underline{Z}_L} + \frac{1}{\underline{Z}_C} + \frac{1}{R} = \frac{1}{j10} + \frac{1}{(-j10)} + \frac{1}{10} = -j0,1 + j0,1 + 0,1 = 0,1, \quad \dot{I}_{11} = \frac{\dot{U}}{\underline{Z}_{11}} = \frac{100}{j10} = -j10.$$

Комплексні струми в гілках

$$\dot{I} = \frac{\dot{U} - \dot{\varphi}_1}{\underline{Z}} = \frac{100 + j100}{j10} = \frac{100\sqrt{2}e^{j\frac{\pi}{4}}}{10e^{j\frac{\pi}{2}}} = 10\sqrt{2}e^{-j\frac{\pi}{4}},$$

$$\dot{I}_C = \frac{\dot{\varphi}_1}{\underline{Z}_C} = \frac{-j100}{-j10} = 10, \quad \dot{I}_R = \frac{\dot{\varphi}_1}{R} = \frac{-j100}{10} = -j10 = 10e^{-j\frac{\pi}{2}}.$$

Діючі значення струмів $I = 14,1$ А, $I_R = I_C = 10$ А.

Комплексні напруги на індуктивній котушці, конденсаторі й резисторі

$$\dot{U}_L = \underline{Z}_L \cdot \dot{I} = 10e^{j\frac{\pi}{2}} \cdot 10\sqrt{2}e^{-j\frac{\pi}{4}} = 141,2e^{j\frac{\pi}{4}};$$

$$\dot{U}_R = R \cdot \dot{I}_R = 10 \cdot 10e^{-j\frac{\pi}{2}} = 100e^{-j\frac{\pi}{2}};$$

$$\dot{U}_C = \underline{Z}_C \cdot \dot{I}_C = 10e^{-j\frac{\pi}{2}} \cdot 10 = 100e^{-j\frac{\pi}{2}}.$$

Діючі значення напруг $U_L = 141,2$ В, $U_C = U_R = 100$ В.

Комплексна потужність

$$\underline{S} = \dot{U} \cdot \dot{I} = 100 \cdot 10\sqrt{2}e^{-j\frac{\pi}{4}} = 1410(\cos\frac{\pi}{4} + j\sin\frac{\pi}{4}) = 1000 + j1000.$$

Отже, повна, активна й реактивна потужності

$$S = |\underline{S}| = 1410 \text{ ВА}, \quad P = \text{Re}(\underline{S}) = 1000 \text{ Вт}, \quad Q = \text{Im}(\underline{S}) = 1000 \text{ Вар}.$$

Задача 5.5. Для електричного кола змінного струму (рис. 5.16,а) визначити показання амперметрів А, А₁, А₂, кути зрушення фаз φ , φ_1 і φ_2 між відповідними струмами \dot{I} , \dot{I}_1 і \dot{I}_2 й напругою \dot{U} , побудувати векторну діаграму струмів і напруг. Вихідні дані (напруга живлення U , активні й реактивні опори кола) наведені в табл. 5.5.

Таблиця 5.5

Параметр	Варіант завдання										
	К	0	1	2	3	4	5	6	7	8	9
U , В	120	110	100	90	80	86	94	104	114	124	136
R_1 , Ом	2	1,6	1,4	1,4	1,8	2	2,1	2,2	2,6	2,9	3,2
R_2 , Ом	1	0,8	0,6	0,7	0,9	1,3	1,5	1,6	1,4	1,1	2,0
X_L , Ом	6	5	4	5	6	7	6	5	4	7	8
X_C , Ом	9,95	9	8	7	10	12	8	9	7	10	9

Розв'язання задачі для варіанта К.

Повний опір гілок кола:

$$Z_1 = \sqrt{R_1^2 + X_1^2} = \sqrt{2^2 + 6^2} = 6,23 \text{ Ом}; \quad Z_2 = \sqrt{R_2^2 + X_2^2} = \sqrt{1^2 + 9,95^2} = 10 \text{ Ом}.$$

Кути зрушення фаз між струмами й напругами відповідних паралельних гілок:

$$\cos \varphi_1 = \frac{R_1}{Z_1} = \frac{2}{6,32} = 0,316; \quad \varphi_1 = 71^\circ 35';$$

$$\cos \varphi_2 = \frac{R_2}{Z_2} = \frac{1}{10} = 0,1; \quad \varphi_2 = -84^\circ 15'.$$

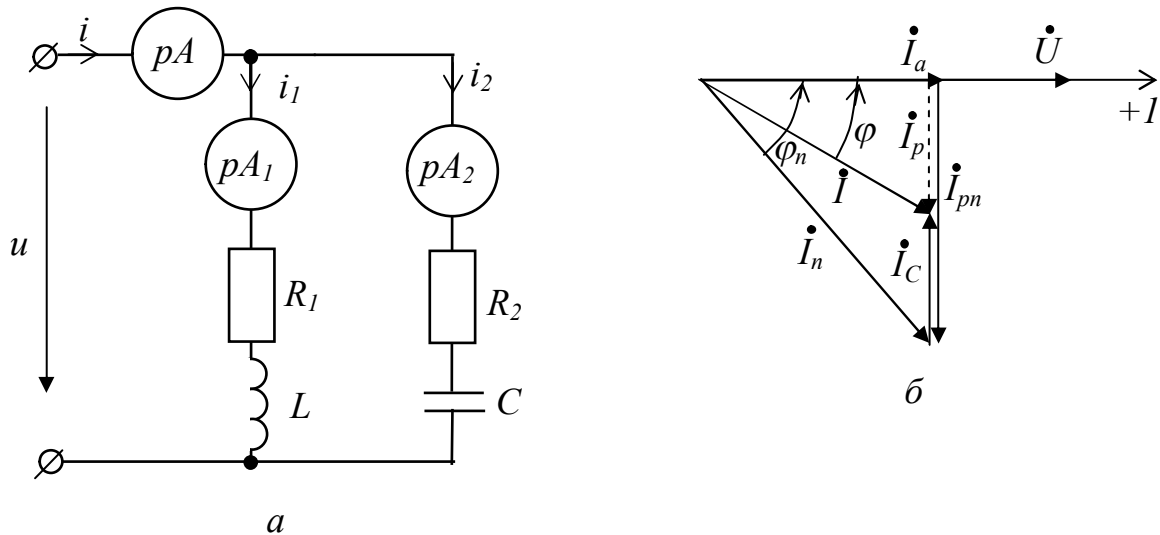


Рис.5.16 - До задачі 5.5: а - схема кола; б – векторні діаграми для варіанта К

Показання амперметрів A_1 і A_2 у паралельних гілках:

$$I_1 = U/Z_1 = 120/6,32 = 19 \text{ А}; \quad I_2 = U/Z_2 = 120/10 = 12 \text{ А}.$$

Активні складові струмів у паралельних гілках:

$$I_{a1} = I_1 \cdot \cos \varphi_1 = 19 \cdot 0,316 = 6,01 \text{ А}, \quad I_{a2} = I_2 \cdot \cos \varphi_2 = 12 \cdot 0,1 = 1,2 \text{ А}.$$

Реактивні складові струмів у паралельних гілках:

$$I_{p1} = I_1 \cdot \sin \varphi_1 = I_1 \cdot X_L/Z_1 = 19 \cdot 6/6,32 = 18,01 \text{ А};$$

$$I_{p2} = I_2 \cdot \sin \varphi_2 = I_2 \cdot X_C/Z_2 = 12 \cdot 9,95/10 = 11,93 \text{ А}.$$

Активна й реактивна складові загального струму:

$$I_a = I_{a1} + I_{a2} = 6,01 + 1,2 = 7,21 \text{ А}; \quad I_p = I_{p1} + I_{p2} = 18,01 - 11,93 = 6,08 \text{ А}.$$

Загальний струм у колі:

$$I = \sqrt{I_a^2 + I_p^2} = \sqrt{7,21^2 + 6,08^2} = 9,43 \text{ А}.$$

Кут зрушення фаз між струмом I і прикладеною напругою U :

$$\cos \varphi = I_a/I = 7,21/9,43 = 0,756; \quad \varphi = 40^\circ 10'.$$

Векторна діаграма струмів і напруг для даного варіанта розрахунку наведена на рис.5.16,б.

Задача 5.6. Визначити показання ватметра P_W в електричному колі (рис. 5.18) при замкнутому й розімкнутому вимикачі S . Напруга джерела живлення U , активний R і реактивні X_{L1} , X_{L2} і X_C опори задані в табл. 5.6.

Таблиця 5.6

Параметр	Варіант завдання										
	К	0	1	2	3	4	5	6	7	8	9
$U, \text{В}$	100	100	110	110	120	120	130	130	90	90	90
$R, \text{Ом}$	5	4	3	6	5	4	7	6	5	4	3
$X_{L1}, \text{Ом}$	5	5	4	4	6	6	5	5	4	4	6
$X_{L2}, \text{Ом}$	5	4	3	6	7	5	7	8	5	5	4
$X_C, \text{Ом}$	5	5	4	4	6	6	5	6	5	4	3

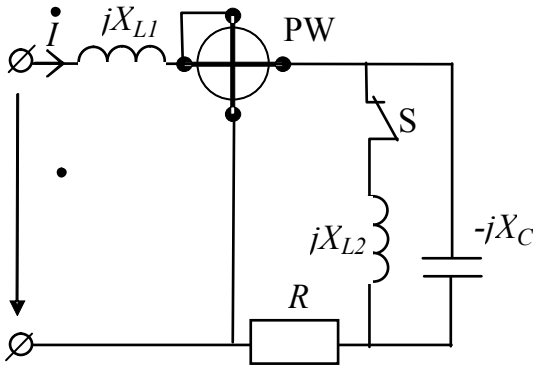


Рис.5.18 - Схема електричного кола до задачі 5.6

Розв'язання задачі для варіанта К.

У цьому випадку в електричному колі має місце резонанс напруг. Повний опір кола при розімкненому вимикачі:

$$Z = \sqrt{R^2 + (X_{L1} - X_C)^2} = \sqrt{5^2 + (5 - 5)^2} = 5 \text{ Ом.}$$

Струм у колі при розімкненому вимикачі: $I = U/Z = 100/5 = 20 \text{ А}$. Показання ватметра в цьому випадку: $P = R \cdot I^2 = 5 \cdot 20^2 = 2000 \text{ Вт} = 2 \text{ кВт}$.

Показання ватметра при замкненому вимикачі: $P = R \cdot I^2 = 5 \cdot 0 = 0 \text{ Вт}$, оскільки на паралельній ділянці має місце резонанс струмів і струм у колі резистора R не протікає.

ТЕМА 6 ТРИФАЗНІ КОЛА ЕЛЕКТРИЧНОГО СТРУМУ

Ключові поняття: фаза трифазної мережі, трифазна система ЕРС, симетрична трифазна система ЕРС, пряма (зворотна) послідовність фаз, нейтраль, фазні ЕРС, лінійні ЕРС, з'єднання «зіркою» («трикутником»), симетричне навантаження, трифазне чотирипровідне коло, активна (реактивна, повна, комплексна) потужність трифазної системи.

6.1. Основні поняття і визначення

Об'єднання в одне коло декількох подібних за структурою кіл синусоїдального струму однієї частоти з незалежними джерелами енергії широко застосовується в техніці. Об'єднані кола синусоїдального струму прийнято називати *фазами*, а всю об'єднану систему кіл - *багатофазною системою*. Таким чином, в електротехніці термін "*фаза*" застосовується у двох різних значеннях: по-перше, це *параметр періодичного процесу*, а по-друге - *найменування складової частини багатофазної системи кіл синусоїдального струму*. Найбільше розповсюдження дістала трифазна система. Остання була винайдена й розроблена у всіх деталях, включаючи трифазні трансформатор і асинхронний двигун, відомим російським інженером М.О.Доліво-Добровольським (1862 - 1919) в 1891 р. У даний час для передачі й розподілу енергії в переважній більшості випадків застосовуються трифазні системи. *Важливою перевагою трифазної системи є також простота й дешевизна трифазних асинхронних двигунів*. Крім трифазної системи практичне значення має шестифазна система, наприклад у пристроях випрямлення змінного струму, а в деяких пристроях автоматики застосовують двофазну систему.

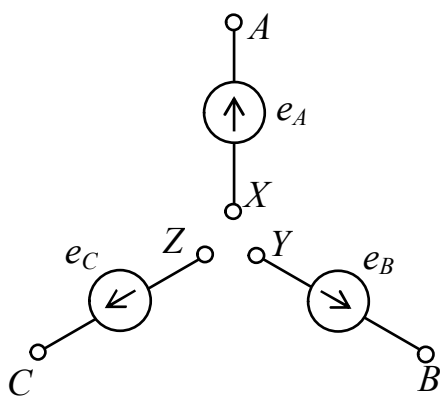


Рис.6.1 - Позначення трифазного генератора

Для позначення фаз трифазної системи застосовують літери латинського алфавіту. Перша фаза має позначення A або a - початок фази, X або x - кінець фази (прописні букви відносяться до джерела, а рядкові - до навантаження). Всю фазу називають фазою A , дві інші - фаза B і фаза C . Позначення трифазного генератора показано на рис. 6.1.

За початок фази приймають затиск, через який струм надходить у зовнішнє коло при позитивному його значенні.

Кінці фаз джерела можна з'єднати один з одним, тоді в зовнішньому колі буде діяти сумарна ЕРС. Така система називається *зв'язаною*.

Трифазну систему ЕРС називають симетричною, якщо частоти й амплітуди ЕРС кожної з фаз однакові, синусоїдальні й зміщені відносно одна одної на кут $2\pi/3$, тобто на 120° (рис. 6.2).

В аналітичній формі миттєві й діючі значення ЕРС, що наводяться у фазах, записують в наступному вигляді:

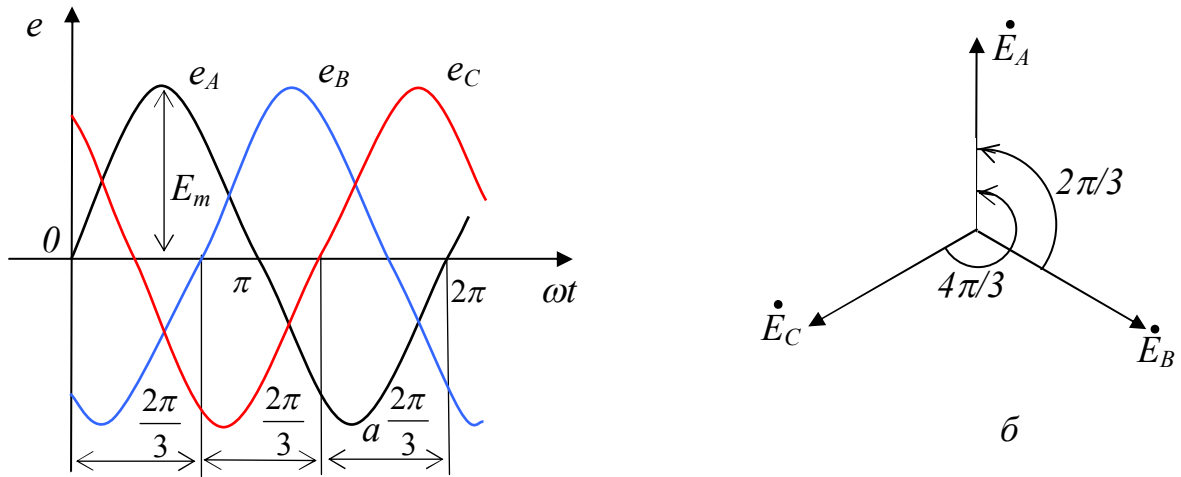


Рис.6.2 - Графічне (а) і векторне (б) подання трифазної симетричної системи ЕРС

$$\left. \begin{aligned}
 e_A &= E_{mA} \sin \omega t; & \dot{E}_A &= E; \\
 e_B &= E_{mB} \sin\left(\omega t - \frac{2\pi}{3}\right); & \dot{E}_B &= E \cdot e^{-j2\pi/3}; \\
 e_C &= E_{mC} \sin\left(\omega t - \frac{4\pi}{3}\right); & \dot{E}_C &= E \cdot e^{-j4\pi/3} = E \cdot e^{j2\pi/3}.
 \end{aligned} \right\} \quad (6.1)$$

Як видно з рис. 6.2,а, у симетричній трифазній системі сума миттєвих значень фазних ЕРС у будь-який момент часу дорівнює нулю:

$$e_A + e_B + e_C = 0. \quad (6.2)$$

За аналогією можна записати й для діючих значень векторів:

$$\dot{E}_A + \dot{E}_B + \dot{E}_C = 0. \quad (6.3)$$

На векторній діаграмі (рис. 6.2,б) фаза *B* відстає від фази *A*, а фаза *C* - від фази *B*. Таке чергування фаз *ABC* називають **прямою послідовністю**, а чергування фаз *ACB* - **зворотною послідовністю**. Послідовність фаз визначають спеціальним приладом - фазопоказчиком.

Як трифазне джерело електричної енергії в основному використовують трифазні синхронні генератори, що перетворюють механічну енергію на електричну, кожна з трьох обмоток якоря якого є джерелом однофазної синусоїдальної ЕРС.

До трифазних споживачів електричної енергії належать трифазні синхронні й асинхронні двигуни й трансформатори (з навантаженням), електричні печі, прилади електричного освітлення та ін.

Існують різні способи з'єднання фаз трифазних джерел живлення й трифазних споживачів електроенергії. Найпоширенішими є з'єднання «зірка» і «трикутник». При цьому способи з'єднання фаз джерел і фаз споживачів у трифазних системах можуть бути різними. Фази джерела звичайно з'єднані «зіркою», фази споживачів з'єднують або «зіркою», або «трикутником».

6.2. Схеми з'єднання обмоток трифазного генератора

Фази обмотки трифазного генератора можуть бути з'єднані в «зірку» (рис.6.3,а) або в «трикутник» (рис.6.3,б).

При з'єднанні в «зірку» кінці фаз об'єднують в одну точку N (рис. 6.3,а), що називається **нульовою** або **нейтраллю**. Навантаження можна підключати до затискачів N - A, N - B, N - C або A - B, B - C, C - A.

Розрізняють **фазні** E_A, E_B і E_C і **лінійні** E_{AB}, E_{BC} і E_{CA} ЕРС, які, як видно з рис. 6.3,в, зв'язані між собою виразами:

$$\left. \begin{aligned} \dot{E}_{AB} &= \dot{E}_A - \dot{E}_B; \\ \dot{E}_{BC} &= \dot{E}_B - \dot{E}_C; \\ \dot{E}_{CA} &= \dot{E}_C - \dot{E}_A. \end{aligned} \right\} \quad (6.4)$$

У симетричній системі система лінійних ЕРС симетрична $\dot{E}_{AB} + \dot{E}_{BC} + \dot{E}_{CA} = 0$. При цьому співвідношення між фазними і лінійними ЕРС має вигляд

$$E_l = \sqrt{3}E_\phi. \quad (6.5)$$

При з'єднанні фаз джерела в «трикутник» навантаження підключають до його вершин (рис. 6.3,б). При цьому лінійні й фазні ЕРС і напруги будуть рів-

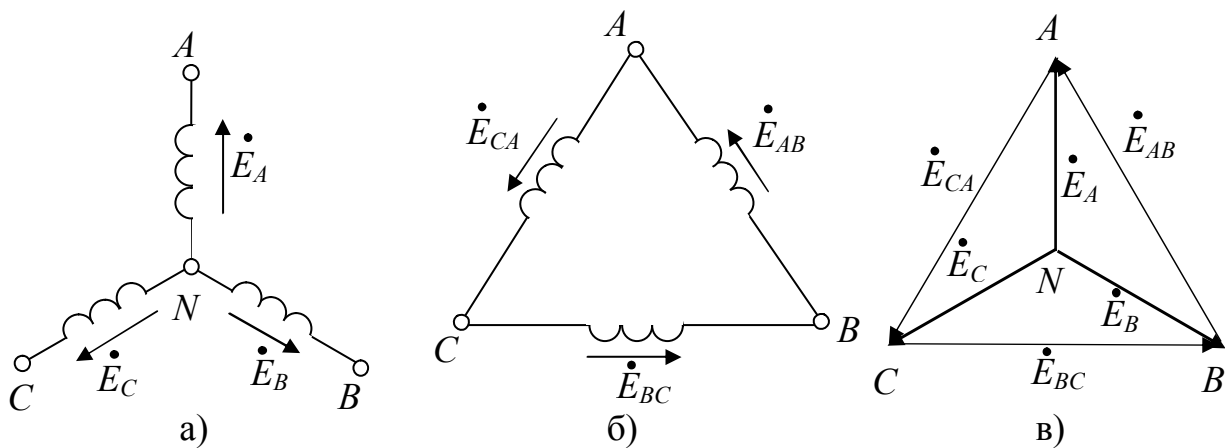


Рис.6.3 - Схеми з'єднання обмоток трифазного генератора: а – «зірка», б – «трикутник», в - векторна діаграма

ними між собою: $E_\phi = E_l$; $U_\phi = U_l$. Таке з'єднання можливе тільки при симетричному джерелі. У цьому випадку фази утворюють замкнутий контур, струм в якому відсутній.

Практично неможливо виконати всі обмотки однаковими, тобто ЕРС завжди несиметричні. У схемі з'являються зрівнювальні струми, що небажано. Тому практично завжди (за окремим винятком) обмотки генератора з'єднують «зіркою».

Приймачі електричної енергії можуть бути з'єднані в «трикутник» і в «зірку». Для електричних кіл змінного струму стандартом передбачена шкала лінійних напруг: 127, 220, 380, 500, 660 В.

6.3. З'єднання трифазних споживачів «зіркою»

При з'єднанні фаз трифазного джерела живлення електроенергії «зіркою» (рис. 6.4) кінці його фаз X, Y, Z об'єднують в спільну нейтральну точку N , а початки фаз A, B, C підключають до відповідних лінійних проводів Aa, Bb, Cc . Аналогічно при з'єднанні трифазних споживачів поєднують в нейтральну точку n кінці їхніх фаз x, y, z , при цьому початки фаз a, b, c підключають до лінійних проводів електричної мережі.

Напруги U_A, U_B, U_C , що діють між початками й кінцями фаз джерела живлення, є його фазними напругами, а напруги, U_a, U_b, U_c , що діють між початками й кінцями фаз споживача є фазними напругами споживача. Напруги U_{AB}, U_{BC}, U_{CA} , що діють між початками фаз джерела й напруги U_{ab}, U_{bc}, U_{ca} , що діють між початками фаз споживача, є лінійними напругами.

На схемі рис. 6.4 наведені умовні позитивні напрямки фазних і лінійних напруг. Лінійні струми I_L у лініях живлення (I_A, I_B, I_C) при з'єднанні трифазного джерела живлення й трифазного споживача електроенергії «зіркою», умовний позитивний напрямок яких показаний на схемі рис. 6.4, одночасно є і фазними струмами I_ϕ , що протікають по фазах споживача (I_a, I_b, I_c). Тому, в розглянутому випадку, при наявності симетричної трифазної системи при з'єднанні фаз споживача «зіркою» лінійні струми дорівнюватимуть фазним струмам:

$$I_\phi = I_L \quad (6.6)$$

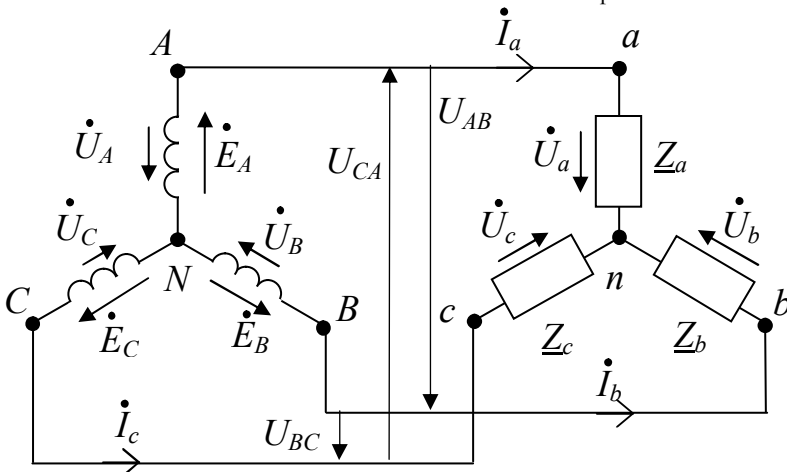


Рис.6.4 - З'єднання джерел і споживачів за схемою «зірка-зірка»

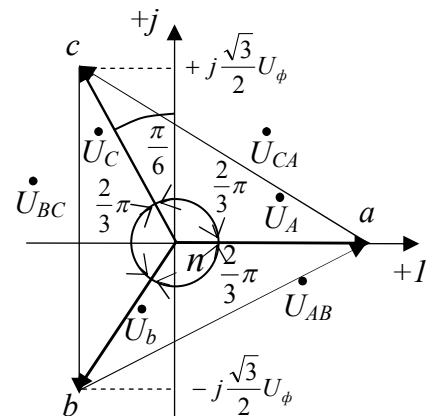


Рис.6.5 - Векторна діаграма фазних і лінійних напруг

Трифазні джерела живлення практично завжди виконують симетричними. У цьому випадку діючі значення фазних ЕРС $E_A = E_B = E_C = E_\phi$, а також фазних напруг $U_A = U_B = U_C = U_\phi$ будуть відповідно рівними й зрушеними одна відносно одної за фазою на кут $2\pi/3$. При цьому комплексні, активні й індуктивні опори фаз відповідно рівні, тобто: $Z_A = Z_B = Z_C = Z_\phi$; $R_A = R_B = R_C = R_\phi$; $X_A = X_B = X_C = X_\phi$. Значення фазних коефіцієнтів потужності $\cos\varphi_A = \cos\varphi_B = \cos\varphi_C = \cos\varphi_\phi$ також будуть рівними.

Трифазні споживачі електроенергії можуть бути симетричними й несиметричними. Для симетричних споживачів справедливі співвідношення, отримані для трифазних симетричних джерел живлення. При цьому (рис. 6.4) $U_a = U_b =$

$=U_c = U_\phi$, $U_{AB} = U_{BC} = U_{CA} = U_L$, $Z_a = Z_b = Z_c = Z_\phi$; $R_a = R_b = R_c = R_\phi$; $X_a = X_b = X_c = X_\phi$ $\cos\varphi_a = \cos\varphi_b = \cos\varphi_c = \cos\varphi_\phi$. Співвідношення між фазними й лінійними напругами визначають як

$$U_L = \sqrt{3}U_\phi. \quad (6.7)$$

Для *несиметричних трифазних* споживачів не всі ці співвідношення зберігаються.

При аналізі трифазних електричних кіл широко використовують метод комплексних чисел. З його допомогою можна здійснювати розрахунки, які неможливо виконати іншими методами.

На рис. 6.5 наведена векторна діаграма фазних \dot{U}_a , \dot{U}_b , \dot{U}_c і лінійних напруг \dot{U}_{AB} , \dot{U}_{BC} , \dot{U}_{CA} споживача електроенергії, при цьому вектор фазної напруги \dot{U}_a направлений за віссю дійсних чисел в позитивному напрямку. З урахуванням цього фазні напруги трифазного симетричного споживача можуть бути подані в комплексній формі запису:

$$\left. \begin{aligned} \dot{U}_a &= U_a = U_\phi = \frac{U_\phi}{\sqrt{3}}; \\ \dot{U}_b &= U_b \left(-\frac{1}{2} - j\frac{\sqrt{3}}{2}\right) = U_\phi \left(-\frac{1}{2} - j\frac{\sqrt{3}}{2}\right) = \frac{U_\phi}{\sqrt{3}} \left(-\frac{1}{2} - j\frac{\sqrt{3}}{2}\right); \\ \dot{U}_c &= U_c \left(-\frac{1}{2} + j\frac{\sqrt{3}}{2}\right) = U_\phi \left(-\frac{1}{2} + j\frac{\sqrt{3}}{2}\right) = \frac{U_\phi}{\sqrt{3}} \left(-\frac{1}{2} + j\frac{\sqrt{3}}{2}\right) \end{aligned} \right\}; \quad (6.8)$$

Відповідно до прийнятих умовних позитивних напрямків фазних і лінійних напруг (рис. 6.4) лінійні напруги споживача електроенергії визначають за рівняннями, складеними у комплексній формі запису для відповідних замкнених контурів за другим законом Кірхгофа:

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

З векторної діаграми (рис. 6.5) випливає, що лінійні напруги, так само як і фазні, зрушені відносно одна одної за фазою на кут $2\pi/3$. При цьому для симетричної трифазної системи векторна сума фазних напруг $\dot{U}_a + \dot{U}_b + \dot{U}_c = 0$ і сума лінійних напруг $\dot{U}_{AB} + \dot{U}_{BC} + \dot{U}_{CA} = 0$.

З урахуванням наведених вище виразів лінійні напруги споживача для симетричної системи мають вигляд:

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

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

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

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

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

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

$$I_a = I_b = I_c = I_\phi = I_\lambda . \quad (6.9)$$

6.4. З'єднання трифазних споживачів «трикутником»

У трифазних системах поряд із з'єднанням трифазних споживачів «зіркою» застосовують з'єднання фаз «трикутником». При цьому не має значення як з'єднані фази джерела - «зіркою» або «трикутником».

З'єднання, при якому початок однієї фази споживача електроенергії (або джерела живлення) з'єднують з кінцем іншої його фази, початок якої з'єднано з кінцем третьої фази, а початок третьої - з кінцем першої фази (при цьому початки всіх фаз підключають до відповідних лінійних проводів), називають «**трикутником**».

При з'єднанні «трикутником», як видно із схеми на рис. 6.6, фазні напруги на споживачі дорівнюватимуть лінійним напругам ($U_\phi = U_\lambda$).

Зневажаючи опором лінійних проводів, лінійні напруги споживача можна дорівняти лінійним напругам джерела живлення:

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

При симетричній системі живлення:

$$U_{ab} = U_{bc} = U_{ca} = U_{AB} = U_{BC} = U_{CA} = U_\phi = U_\lambda . \quad (6.10)$$

Векторна діаграма напруг при симетричному живленні для активно-індуктивного навантаження ($\varphi > 0$) подана на рис. 6.7. Тут комплексна лінійна напруга \dot{U}_{ab} направлена за позитивною віссю дійсних чисел комплексної площини. При цьому комплексні лінійні напруги записують у наступному вигляді:

$$\left. \begin{aligned} \dot{U}_{ab} &= U_{ab} = U_\lambda ; \\ \dot{U}_{bc} &= U_{bc} \left(-\frac{1}{2} - j\frac{\sqrt{3}}{2} \right) = U_\lambda \left(-\frac{1}{2} - j\frac{\sqrt{3}}{2} \right) ; \\ \dot{U}_{ca} &= U_{ca} \left(-\frac{1}{2} + j\frac{\sqrt{3}}{2} \right) = U_\lambda \left(-\frac{1}{2} + j\frac{\sqrt{3}}{2} \right) . \end{aligned} \right\} \quad (6.11)$$

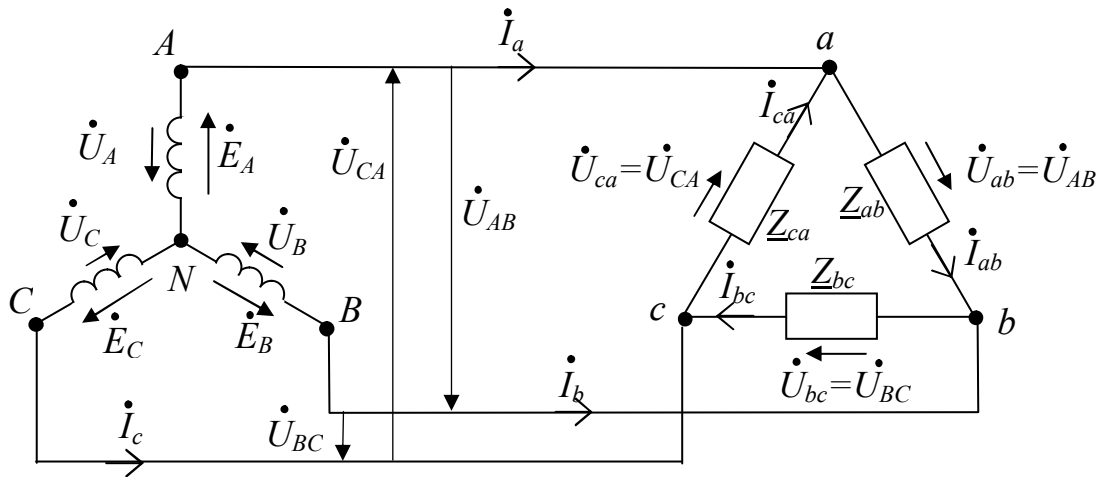


Рис.6.6 - З'єднання електроспоживачів "трикутником"

Співвідношення між лінійними й фазними струмами при з'єднанні споживача електроенергії «трикутником» і симетричному навантаженні визначають із рівнянь, складених для струмів відповідно до першого закону Кірхгофа для вузлів a , b , c розгалуження електричного кола (рис. 6.6): $\dot{I}_a + \dot{I}_{ca} - \dot{I}_{ab} = 0$; $\dot{I}_b + \dot{I}_{ab} - \dot{I}_{bc} = 0$; $\dot{I}_c + \dot{I}_{bc} - \dot{I}_{ca} = 0$.

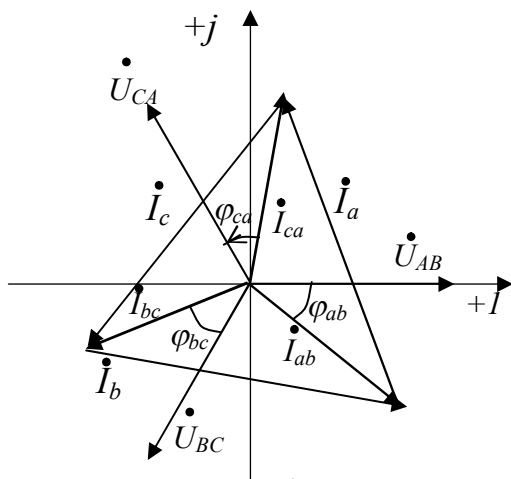


Рис.6.7 - Векторна діаграма струмів і напруг при з'єднанні споживача "трикутником"

При симетричному навантаженні лінійні струми $I_a = I_b = I_c$ й фазні струми $I_{ab} = I_{bc} = I_{ca}$. При цьому кут зрушення фаз між фазними струмами й напругами $\varphi_{ab} = \varphi_{bc} = \varphi_{ca}$, тому що в даному випадку коефіцієнт потужності $\cos\varphi_{ab} = \cos\varphi_{bc} = \cos\varphi_{ca}$.

На рис. 6.7 побудовано векторну діаграму фазних і лінійних струмів споживача, з якої випливає, що при з'єднанні фаз симетричного трифазного споживача електроенергії "трикутником" між лінійними й фазними струмами має місце співвідношення

$$I_l = \sqrt{3}I_\phi \quad (6.12)$$

6.5. Трифазні чотирипровідні електричні кола

У трифазних чотирипровідних електричних колах при наявності лінійних проводів, що з'єднують початки фаз джерела живлення і споживача електроенергії, є також нейтральний провід, що з'єднує нейтральну точку N джерела з нейтральною точкою n споживача (рис. 6.8). Це забезпечує симетрію фазних напруг джерела й споживача, тому що нейтральний провід зрівнює потенціали нейтральних точок N і n .

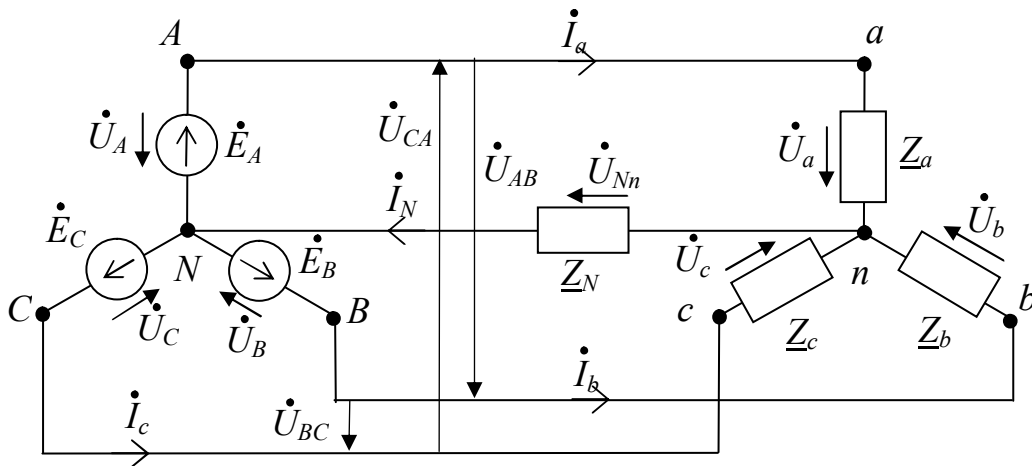


Рис.6.8 - Трифазна чотирипровідна електрична мережа

Трифазні чотирипровідні системи широко розповсюджені в розподільних мережах промислових підприємств, житлових і громадських будинків. Вони дозволяють одержати дві напруги, що відрізняються на $\sqrt{3}$ - фазну U_ϕ і лінійну $U_\lambda = \sqrt{3} U_\phi$. При змішаному силовому й освітлювальному навантаженнях силові споживачі електроенергії живлять лінійними напругами $U_\lambda = 660; 380; 220$ В, освітлювальне навантаження живлять фазними напругами $U_\phi = 220; 127$ В.

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

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

$$\dot{U}_{Nn} = \frac{\dot{E}_A \underline{Y}_a + \dot{E}_B \underline{Y}_b + \dot{E}_C \underline{Y}_c}{\underline{Y}_a + \underline{Y}_b + \underline{Y}_c + \underline{Y}_N}, \quad (6.13)$$

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

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

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

$$\dot{U}_{Nn} = \frac{U_\lambda (\underline{Y}_a + a^2 \underline{Y}_b + a \underline{Y}_c)}{\sqrt{3}(\underline{Y}_a + \underline{Y}_b + \underline{Y}_c + \underline{Y}_N)}, \quad (6.14)$$

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

Комплексні фазні напруги приймача електроенергії знаходять з рівнянь, складених за другим законом Кірхгофа для відповідних замкнутих контурів системи (рис. 6.9):

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

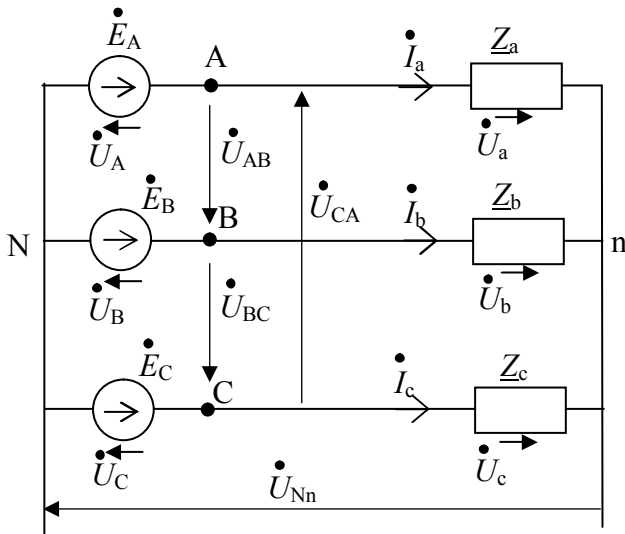


Рис.6.9 - Розрахункова схема

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

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

Комплексний струм у нейтральному проводі знаходять з рівняння, складеного за першим законом Кірхгофа для нейтральної точки n кола:

$$\dot{I}_n = \dot{I}_a + \dot{I}_b + \dot{I}_c.$$

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

$$U_\phi = \frac{U_\lambda}{\sqrt{3}}; \quad I_a = I_b = I_c = I_\phi = \frac{U_\phi}{Z_\phi} = \frac{U_\lambda}{\sqrt{3}Z_\phi}.$$

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

При несиметричному навантаженні споживача електроенергії ($\underline{Z}_a \neq \underline{Z}_b \neq \underline{Z}_c$) на векторній діаграмі відбувається зсув нейтральної точки n споживача відносно нейтральної точки N джерела, що приводить до перекосу фазних напруг споживача. Як наслідок, на одних фазах споживача напруга буде більшою, ніж на інших, що в багатьох випадках є неприпустимим. Зокрема при живленні освітлювального навантаження, коли одні освітлювальні прилади перебувають під напругою, меншою за номінальну, а інші - під напругою, більшою за номінальну, що приводить до передчасного виходу приладів з ладу. У зв'язку з цим у нейтральному проводі чотирипровідної електричної мережі **заборонено установку запобіжників або вимикачів** (рис 6.10), оскільки при відключеному нейтральному проводі фазні напруги можуть стати нерівними. Як наслідок, наприклад у колах освітлювальних установок буде спостерігатися недорозжарення ламп у фазах із зниженою напругою, і перерозжарення й передчасне перегорання ламп у фазах з підвищеною напругою. Перегорання ж одного з магістральних запобіжників спричинить відключення електроспоживачів відповідної магістралі.

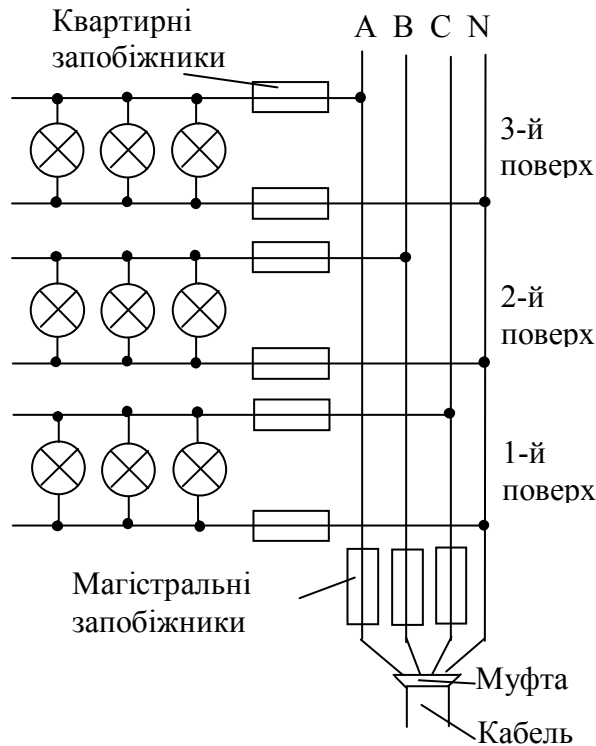


Рис. 6.10 – Чотирипровідна електрична мережа

6.6. Активна, реактивна і повна потужність трифазного електричного кола

Під *активною (реактивною, повною) потужністю трифазної системи розуміють суму активних (реактивних, повних) потужностей всіх фаз джерела енергії, яка дорівнює сумі активних (реактивних, повних) потужностей всіх фаз приймача.*

Трифазна чотирипровідна система забезпечує споживача електроенергії симетричним живленням. При цьому активна, реактивна й повна потужності можуть бути визначені за наступними формулами з урахуванням знака реактивних опорів:

$$\left. \begin{aligned} P &= I_a^2 R_a + I_b^2 R_b + I_c^2 R_c = I_a \cdot U_a \cdot \cos \varphi_a + I_b \cdot U_b \cdot \cos \varphi_b + I_c \cdot U_c \cdot \cos \varphi_c; \\ Q &= I_a^2 \cdot X_a + I_b^2 \cdot X_b + I_c^2 \cdot X_c = I_a \cdot U_a \cdot \sin \varphi_a + I_b \cdot U_b \cdot \sin \varphi_b + I_c \cdot U_c \cdot \sin \varphi_c; \\ S &= \sqrt{P^2 + Q^2}, \end{aligned} \right\} (6.15)$$

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

При симетричному навантаженні ці формули мають наступний вигляд:

$$\left. \begin{aligned} P &= 3I_\phi^2 R_\phi = \sqrt{3}U_\phi I_\phi \cos \varphi_\phi; \\ Q &= 3I_\phi^2 X_\phi = \sqrt{3}U_\phi I_\phi \sin \varphi_\phi; \\ S &= \sqrt{P^2 + Q^2} = \sqrt{3}U_\phi I_\phi, \end{aligned} \right\} (6.16)$$

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

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

У комплексній формі запису повна потужність трифазного електричного кола:

$$\dot{S} = P \pm jQ. \quad (6.17)$$

Повну потужність кожної з фаз споживача можна визначити за формулами:

$$\left. \begin{aligned} \dot{S}_a &= P_a \pm jQ_a = \dot{U}_a \cdot I_a^* \\ \dot{S}_b &= P_b \pm jQ_b = \dot{U}_b \cdot I_b^* \\ \dot{S}_c &= P_c \pm jQ_c = \dot{U}_c \cdot I_c^* \end{aligned} \right\}; \quad (6.18)$$

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

6.7. Порівняння умов роботи приймача при з'єднанні його фаз «трикутником» і «зіркою»

Схема з'єднання трьох фаз приймача не залежить від схеми з'єднання трьох фаз генератора. З'єднання фаз приймача «трикутником» часто переключають на з'єднання «зіркою» для зміни струму й потужності, наприклад для зменшення пускових струмів трифазних двигунів, зміни температури трифазних електричних печей і т.ін.

Розглянемо, як змінюються діючі значення струмів симетричного приймача з повним фазним опором Z_ϕ при переключенні фаз із «зірки» на «трикутник», наприклад, триполюсним перемикачем S (рис. 6.11).

При з'єднанні фаз приймача «зіркою» між діючими значеннями фазних і лінійних струмів (6.6) і напруг (6.7) справедливі співвідношення

$$I_{\phi Y} = U_{\phi Y} / Z_\phi = I_{\text{л}Y}, \quad U_{\phi Y} = U_{\text{л}} / \sqrt{3},$$

з яких випливає, що

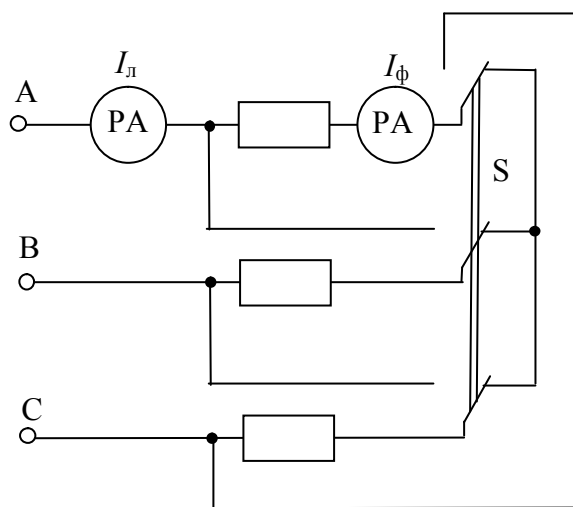


Рис.6.11 - Схема переключення трифазного приймача із «зірки» на «трикутник»

$$I_{\text{л}Y} = \frac{U_{\text{л}}}{\sqrt{3}Z_\phi}. \quad (6.19)$$

При з'єднанні фаз приймача «трикутником» між діючими значеннями фазних і лінійних струмів (6.12) і напруг (6.11) справедливі співвідношення

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

з яких випливає, що

$$I_{\text{л}\Delta} = \frac{\sqrt{3}U_{\text{л}}}{Z_\phi}. \quad (6.20)$$

Зіставивши вирази (6.19) і (6.20), одержимо при тому самому діючому значенні лінійної напруги U_{Δ} і однакових повних фазних опорах Z_{ϕ} вираз для діючих значень лінійних струмів:

$$I_{\Delta} = 3I_{\Delta Y} ,$$

і для діючих значень фазних струмів

$$I_{\phi\Delta} = \sqrt{3}I_{\phi Y} .$$

Активна потужність трифазного симетричного приймача при кожній із схем з'єднання за (6.15) дорівнює

$$P = \sqrt{3}U_{\Delta}I_{\Delta} \cos \varphi .$$

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

$$P_{\Delta} = 3P_Y . \quad (6.21)$$

Контрольні запитання з теми 6

1. В яких значеннях в електротехніці вживають термін «фаза»?
2. Що розуміють під трифазною системою?
3. У якому випадку трифазну систему вважають симетричною?
4. Що називають прямою (зворотною) послідовністю чергування фаз?
5. Що розуміють під нейтраллю трифазної мережі?
6. Які схеми з'єднання фаз застосовують в трифазних мережах?
7. Запишіть у комплексній формі фазні напруги трифазного симетричного споживача з'єданого за схемою «зірка».
8. Накресліть векторну діаграму фазних і лінійних напруг споживача включеного за схемою «зірка».
9. Накресліть векторну діаграму напруг і струмів споживача, включеного за схемою «трикутник».
10. Поясніть особливості трифазних чотирипровідних кіл.
11. Запишіть співвідношення для активної, реактивної й повної потужностей трифазного симетричного кола.

Задачі до теми 6 і приклади їхнього розв'язання

Задача 6.1. До трифазного генератора підключені симетричний приймач електричної енергії (рис. 6.12). Визначити фазну напругу генератора, струми, фазні й лінійні напруги приймача, падіння напруги в лінійних проводах, потужність приймача. Побудувати векторну діаграму напруг і струмів. У табл. 6.1 наведені вихідні дані для розв'язання задачі: лінійна напруга генератора U_{Δ} , опір проводів $Z_{np} = R_{np} + jX_{np}$, опір приймача $Z = R + jX$.

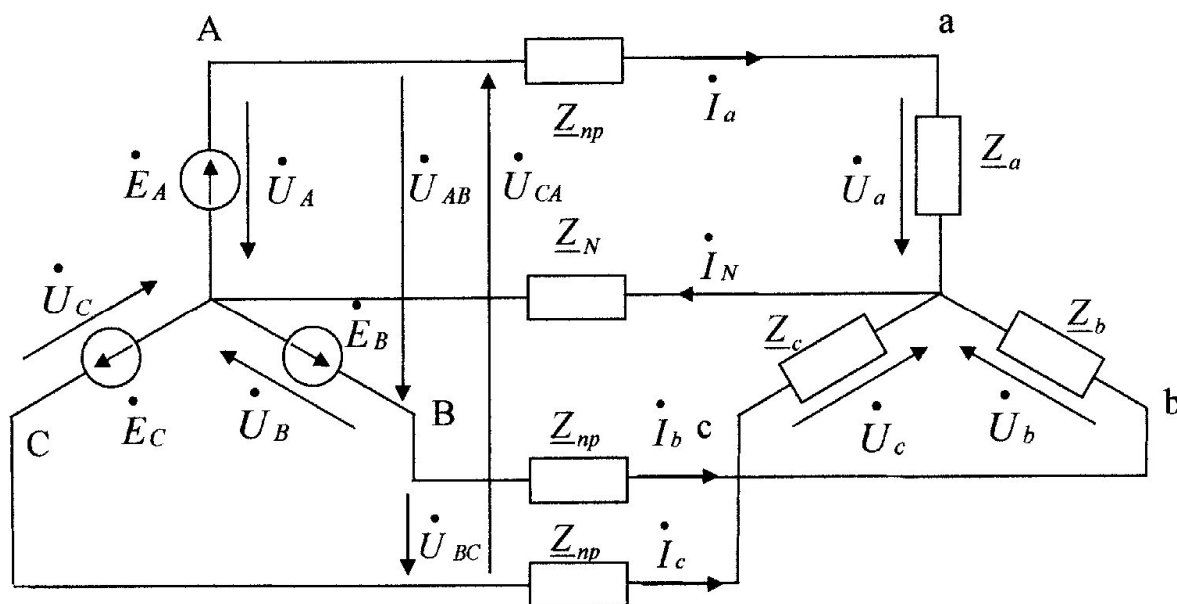


Рис.6.12 - Схема кола до задачі 6.1

Таблиця 6.1

Параметр	Варіант завдання										
	К	0	1	2	3	4	5	6	7	8	9
$U_{л}, В$	220	220	220	220	220	220	380	380	380	380	380
$R_{пр}, Ом$	0,5	0,5	0,6	0,6	0,5	0,5	0,8	0,8	1	1,2	1,2
$X_{пр}, Ом$	1	1,2	1,4	1,2	1,4	1,2	1,2	1,2	1,4	1,2	1,4
$R, Ом$	10	12	12	12	10	14	18	20	22	22	24
$X, Ом$	6	6	8	6	8	8	10	12	14	16	16

Розв'язання задачі для варіанта К.

Задачу розв'язуємо методом комплексних чисел. Режим роботи трифазного кола симетричний, тому напруга між нейтральними точками $U_n = 0$. При симетричній системі лінійних напруг генератора фазна напруга дорівнює

$$U_{\phi} = U_{л} / \sqrt{3} = 220 / \sqrt{3} = 127 \text{ В.}$$

Система комплексних фазних напруг генератора, якщо прийняти напругу \dot{U}_A чисто дійсною:

$$\dot{U}_A = 127, \quad \dot{U}_B = 127e^{-j120^\circ}, \quad \dot{U}_C = 127e^{j120^\circ}.$$

Комплексні фазні опори й провідності

$$\underline{Z}_{\phi} = \underline{Z} + \underline{Z}_{np} = (10 + j6) + (0,5 + j1) = 10,5 + j7 = 12,6e^{j34^\circ},$$

$$\underline{Y}_{\phi} = \frac{1}{\underline{Z}_{\phi}} = \frac{1}{12,6e^{j34^\circ}} = 7,9 \cdot 10^{-2} \cdot e^{-j34^\circ} = (6,6 - j4,4) \cdot 10^{-2}.$$

Внаслідок того, що системи фазних і лінійних напруг генератора й приймача симетричні, трифазні системи струмів, фазних і лінійних напруг приймача також є симетричними.

Фазні струми приймача:

$$\dot{I}_a = \dot{U}_a \cdot \underline{Y}_a = 127 \cdot 7,9 \cdot 10^{-2} \cdot e^{-j34^\circ} = 10 \cdot e^{-j34^\circ},$$

$$\dot{I}_b = \dot{I}_a \cdot e^{-j120^\circ} = 10 \cdot e^{-j154^\circ}, \quad \dot{I}_c = \dot{I}_a \cdot e^{j120^\circ} = 10 \cdot e^{j86^\circ}.$$

Діючі значення фазних струмів $I_a = I_b = I_c = 10$ А.

Система фазних напруг приймача:

$$\dot{U}_a = \dot{I}_a \cdot \underline{Z}_a = 10 \cdot e^{-j34^\circ} (10 + j6) = 10 \cdot e^{-j34^\circ} \cdot 11,7 \cdot e^{j31^\circ} = 117 \cdot e^{-j3^\circ};$$

$$\dot{U}_b = \dot{U}_a \cdot e^{-j120^\circ} = 117 \cdot e^{-j123^\circ}; \quad \dot{U}_c = \dot{U}_a \cdot e^{j120^\circ} = 117 \cdot e^{j117^\circ}.$$

Діючі значення фазних напруг приймача $U_a = U_b = U_c = 117$ В.

Лінійні напруги на приймачі:

$$\begin{aligned} \dot{U}_{ab} &= \dot{U}_a - \dot{U}_b = 117 \cdot e^{-j3^\circ} - 117 \cdot e^{-j123^\circ} = 116,8 - j6,1 - (64,8 - j98,1) = \\ &= 180 + j92 = 202 \cdot e^{j27^\circ}; \end{aligned}$$

$$\dot{U}_{bc} = \dot{U}_{ab} \cdot e^{-j120^\circ} = 202 \cdot e^{j27^\circ} \cdot e^{-j120^\circ} = 202 \cdot e^{-j93^\circ};$$

$$\dot{U}_{ca} = \dot{U}_{ab} \cdot e^{j120^\circ} = 202 \cdot e^{j27^\circ} \cdot e^{j120^\circ} = 202 \cdot e^{j147^\circ}.$$

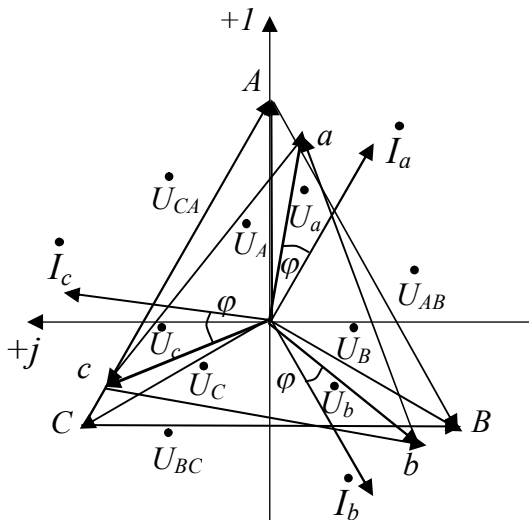


Рис.6.13 - Векторна діаграма струмів і напруг до задачі 6.1.

Падіння напруг на лінійних провадах:

$$\begin{aligned} \Delta \dot{U}_a &= \dot{I}_a \cdot \underline{Z}_{np} = 10 \cdot e^{-j34^\circ} \cdot (0,5 + j1) = \\ &= 10 \cdot e^{-j34^\circ} \cdot 1,12 \cdot e^{j63^\circ} = 11,2 \cdot e^{j29^\circ}; \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} \Delta \dot{U}_b &= \dot{I}_b \cdot \underline{Z}_{np} = 10 \cdot e^{-j154^\circ} \cdot (0,5 + j1) = \\ &= 10 \cdot e^{-j154^\circ} \cdot 1,12 \cdot e^{j63^\circ} = 11,2 \cdot e^{-j91^\circ}; \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} \Delta \dot{U}_c &= \dot{I}_c \cdot \underline{Z}_{np} = 10 \cdot e^{j86^\circ} \cdot (0,5 + j1) = \\ &= 10 \cdot e^{j86^\circ} \cdot 1,12 \cdot e^{j63^\circ} = 11,2 \cdot e^{j149^\circ}. \end{aligned}$$

Фазні повна, активна і реактивна потужності приймача:

$$\underline{S}_\phi = \underline{S}_a = \underline{S}_b = \underline{S}_c = \dot{U}_a \cdot \dot{I}_a^* = 117 \cdot e^{-j3^\circ} \cdot 10 \cdot e^{j34^\circ} = 1170 \cdot e^{j31^\circ} = 1003 + j603;$$

$$S_\phi = 1170 \text{ ВА}; \quad P_\phi = 1003 \text{ Вт}; \quad Q_\phi = 603 \text{ Вар}.$$

Повна, активна і реактивна потужності приймача:

$$\underline{S} = \sum \underline{S}_\phi = 3 \sum \underline{S}_\phi = 3510 \cdot e^{j51^\circ} = 3010 + j1810.$$

$$S = 3510 \text{ ВА}; \quad P = 3010 \text{ Вт}; \quad Q = 1810 \text{ Вар}.$$

Векторна діаграма напруг і струмів наведена на рис.6.13.

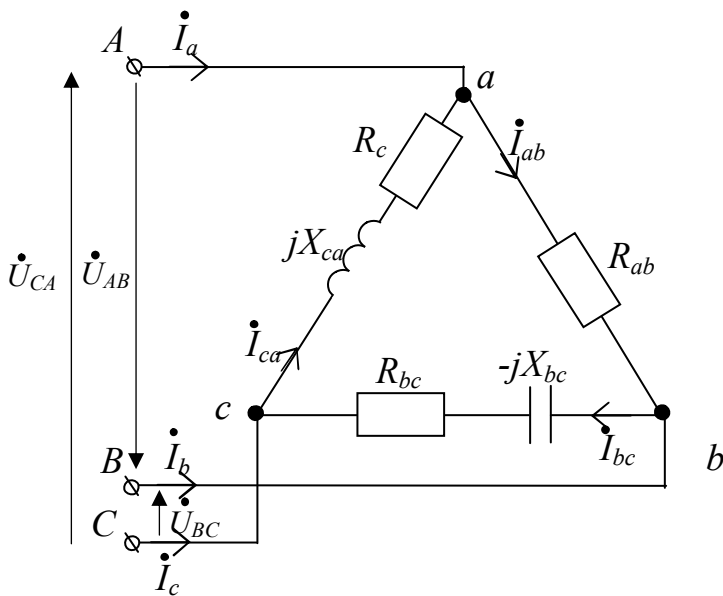


Рис.6.14 - Схема кола до задачі 6.2

Таблиця 6.2

Параметр	Варіант завдання											
	К	0	1	2	3	4	5	6	7	8	9	
$U_{л}, В$	220	220	220	220	127	127	127	127	100	100	100	
$R_{ab}, Ом$	10	12	14	10	10	14	14	10	8	10	10	
$X_{ab}, Ом$	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	
$R_{bc}, Ом$	5	8	10	8	5	10	8	12	12	8	10	
$X_{bc}, Ом$	5	8	10	8	5	10	8	12	12	8	10	
$R_{ca}, Ом$	5	8	10	10	5	10	10	12	12	8	10	
$X_{ca}, Ом$	5	8	10	10	5	10	10	12	12	8	10	

Розв'язання задачі для варіанта К.

Фазні струми споживача:

$$I_{ab} = \frac{U_{ab}}{Z_{ab}} = \frac{U_{ab}}{R_{ab}} = \frac{220}{10} = 22 \text{ А};$$

$$I_{bc} = \frac{U_{bc}}{Z_{bc}} = \frac{U_{bc}}{\sqrt{R_{bc}^2 + X_{bc}^2}} = \frac{220}{\sqrt{5^2 + 5^2}} = 31,11 \text{ А};$$

$$I_{ca} = \frac{U_{ca}}{Z_{ca}} = \frac{U_{ca}}{\sqrt{R_{ca}^2 + X_{ca}^2}} = \frac{220}{\sqrt{5^2 + 5^2}} = 31,11 \text{ А}.$$

Векторна діаграма струмів і напруг з урахуванням характеру навантаження показана на рис.6.15.

Активні складові фазних струмів:

$$I'_{ab} = I_{ab} \cos \varphi_{ab} = I_{ab} \frac{R_{ab}}{Z_{ab}} = I_{ab} \frac{R_{ab}}{\sqrt{R_{ab}^2 + X_{ab}^2}} = 22 \frac{10}{\sqrt{10^2 + 0}} = 22 \text{ А};$$

$$I'_{bc} = I_{bc} \cdot \cos \varphi_{bc} = I_{bc} \frac{R_{bc}}{Z_{bc}} = I_{bc} \frac{R_{bc}}{\sqrt{R_{bc}^2 + X_{bc}^2}} = 31,11 \frac{5}{\sqrt{5^2 + 5^2}} = 22 \text{ А};$$

$$I'_{ca} = I_{ca} \cdot \cos \varphi_{ca} = I_{ca} \frac{R_{ca}}{Z_{ca}} = 31,11 \frac{5}{\sqrt{5^2 + 5^2}} = 22 \text{ А}.$$

Задача 6.2. Трифазний споживач електроенергії з активними й реактивними опорами $R_{ab}, R_{bc}, R_{ca}, X_{ab}, X_{bc}, X_{ca}$ з'єднаними «трикутником» (рис. 6.14) і включеними до трифазної мережі з лінійною напругою $U_{л}$ при симетричному живленні. Визначити фазні I_{ϕ} і лінійні $I_{л}$ струми, активну P , реактивну Q і повну S потужності кожної фази й всього електричного кола. Побудувати векторну діаграму струмів і напруг. Вихідні дані наведені в табл. 6.2.

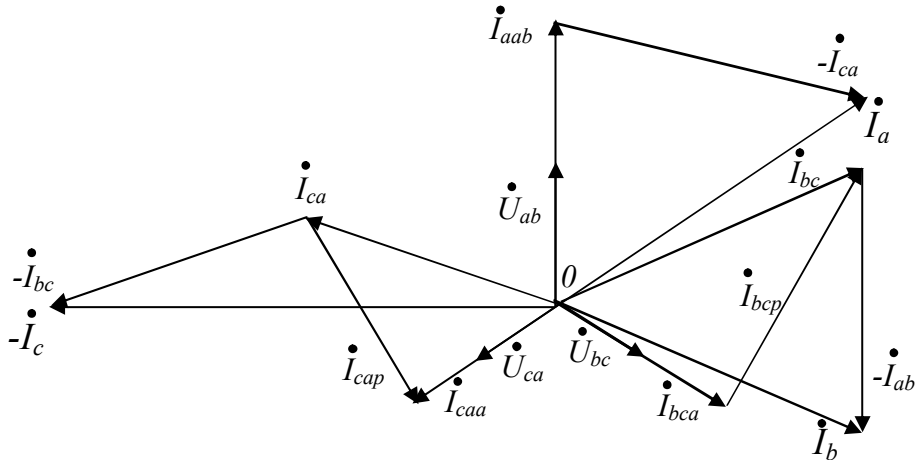


Рис.6.15 - Векторна діаграма струмів і напруг до задачі 6.2

Реактивні складові фазних струмів:

$$I_{ab}'' = I_{ab} \cdot \sin \varphi_{ab} = I_{ab} \frac{X_{ab}}{Z_{ab}} = I_{ab} \frac{X_{ab}}{\sqrt{R_{ab}^2 + X_{ab}^2}} = 22 \frac{0}{\sqrt{5^2 + 0}} = 0;$$

$$I_{bc}'' = I_{bc} \cdot \sin \varphi_{bc} = I_{bc} \frac{X_{bc}}{Z_{bc}} = I_{bc} \frac{X_{bc}}{\sqrt{R_{bc}^2 + X_{bc}^2}} = 31,11 \frac{5}{\sqrt{5^2 + 5^2}} = 22 \text{ А};$$

$$I_{ca}'' = I_{ca} \cdot \sin \varphi_{ac} = I_{ca} \frac{X_{ca}}{Z_{ca}} = I_{ca} \frac{X_{ca}}{\sqrt{R_{ca}^2 + X_{ca}^2}} = 31,11 \frac{5}{\sqrt{5^2 + 5^2}} = 22 \text{ А}.$$

Лінійні струми споживача електроенергії визначаємо за векторною діаграмою (рис.6.15):

Активні потужності фаз споживача:

$$P_{ab} = U_{ab} \cdot I_{ab}' = 220 \cdot 22 = 4840 \text{ Вт};$$

$$P_{bc} = U_{bc} \cdot I_{bc}' = 220 \cdot 22 = 4840 \text{ Вт};$$

$$P_{ca} = U_{ca} \cdot I_{ca}' = 220 \cdot 22 = 4840 \text{ Вт}.$$

Реактивні потужності фаз споживача:

$$Q_{ab} = U_{ab} \cdot I_{ab}'' = 220 \cdot 0 = 0;$$

$$Q_{bc} = U_{bc} \cdot I_{bc}'' = 220 \cdot 22 = -4840 \text{ Вар};$$

$$Q_{ca} = U_{ca} \cdot I_{ca}'' = 220 \cdot 22 = 4840 \text{ Вар}.$$

Повні потужності фаз споживача:

$$S_{ab} = P_{ab} = U_{ab} \cdot I_{ab}' = 220 \cdot 22 = 4840 \text{ ВА};$$

$$S_{bc} = U_{bc} \cdot I_{bc}' = 220 \cdot 31,11 = 6844,2 \text{ ВА};$$

$$S_{ca} = U_{ca} \cdot I_{ca}' = 220 \cdot 31,11 = 6844,2 \text{ ВА}.$$

Потужності всього кола:

активна $P = P_{ab} + P_{bc} + P_{ca} = 4840 + 4840 + 4840 = 14520 \text{ Вт};$

реактивна $Q = Q_{ab} + Q_{bc} + Q_{ca} = 0 - 4840 + 4840 = 0 \text{ Вар};$

повна $S = \sqrt{P^2 + Q^2} = \sqrt{14520^2 + 0^2} = 14520 \text{ ВА} = 14,52 \text{ кВА}.$

ЕЛЕКТРИЧНІ ВИМІРЮВАННЯ

ТЕМА 7

ЕЛЕКТРОВИМІРЮВАЛЬНІ ПРИЛАДИ

Ключові поняття: вимірювання, засоби електричних вимірювань, міра, еталон, зразкова міра, робоча міра, електровимірювальний прилад (ЕВП), вимірювальний перетворювач, електровимірювальна установка, електровимірювальна інформаційна система, нормуюче значення ЕВП, ціна поділки ЕВП, чутливість ЕВП, поріг чутливості, похибка, амперметр, вольтметр.

7.1. Основні поняття

Методи, способи й засоби забезпечення єдності одержання необхідної точності вимірювань фізичних величин вивчає наука метрологія. Під **єдністю вимірювань** розуміють порівнянність результатів незалежно від того, де, коли, ким і якими засобами вимірювалася дана фізична величина.

Для вимірювання фізичних величин різного характеру й природи в науці і на виробництві широко застосовують електричні методи. Їхніми перевагами є: висока чутливість, можливість автоматизації процесу вимірювання, мале споживання енергії. Застосування перетворювачів неелектричних величин на електричні дозволяє виконувати вимірювання практично всіх параметрів технологічних процесів будівельної галузі.

Під **вимірюванням** розуміють процес, що полягає в порівнянні шляхом експерименту вимірюваної фізичної величини з деяким її значенням, прийнятим за одиницю. Інакше кажучи, вимірювання - це знаходження значень фізичних величин дослідним шляхом за допомогою спеціальних технічних засобів.

Результати вимірювань в загальному випадку можна записати в такий спосіб

$$X = n(x), \quad (7.1)$$

де: X – вимірювана величина; n – кількісна характеристика вимірювання; x – одиниця вимірювання.

Розрізняють **істинне й дійсне значення вимірюваної величини**. Під істинним розуміють значення, що вільне від похибки вимірювання. Під дійсним розуміють значення, отримане в результаті вимірювання з похибкою, що допускається. Якщо похибкою вимірювання можна зневажити, то істинне значення збігається з дійсним $X_{\text{ІСТ}} \approx X_{\text{Д}}$.

Засобами електричних вимірювань називають технічні пристрої, які застосовуються при електричних вимірюваннях і мають нормовані метрологічні характеристики. До засобів електричних вимірювань належать міри, електровимірювальні прилади, вимірювальні перетворювачі, електровимірювальні установки й вимірювальні інформаційні системи.

Мірою називають засіб вимірювання, призначений для відтворення фізичної величини заданого значення. До основних мір електричних величин нале-

жать міри ЕРС, електричного струму, електричного опору, індуктивності, електричної ємності та ін.

Залежно від ступеня точності й галузі застосування міри підрозділяють на еталони, зразкові й робочі міри. **Еталони** забезпечують відтворення й зберігання одиниці фізичної величини для передачі її розміру іншим засобам вимірювання. **Зразкові міри** служать для перевірки й градування робочих мір і вимірювальних приладів. **Робочі міри** використовують для перевірки вимірювальних приладів, а також для вимірювання в наукових організаціях і на промислових підприємствах.

Електровимірювальними приладами (ЕВП) називають засоби електричних вимірювань, призначені для вироблення сигналів вимірювальної інформації у формі, доступній для безпосереднього сприйняття спостерігачем. До них належать, наприклад, амперметр, вольтметр, ватметр, лічильник.

Вимірювальними перетворювачами називають засоби електричних вимірювань, призначені для вироблення сигналу електричної інформації у формі, зручній для передачі, подальшого перетворення, обробки й зберігання, але такого, що не піддається безпосередньому сприйняттю спостерігачем. Їх підрозділяють на перетворювачі електричних величин на електричні (шунти, дільники напруги, вимірювальні трансформатори та ін.), на перетворювачі неелектричних величин на електричні, на первинні перетворювачі (терморезистори, термомпари, тензорезистори, ємнісні й індуктивні перетворювачі та ін.).

Електровимірювальна установка являє собою сукупність функціонально об'єднаних і розташованих в одному місці засобів вимірювань (мір, вимірювальних приладів, вимірювальних перетворювачів) і допоміжних пристроїв, що призначені для отримання сигналів вимірювальної інформації у формі, зручній для безпосереднього сприйняття спостерігачем.

Вимірювальна інформаційна система - сукупність засобів вимірювань і допоміжних пристроїв, з'єднаних каналами зв'язку, що призначені для отримання сигналів вимірювальної інформації від ряду джерел у формі, зручній для обробки, передачі й використання в автоматичних системах керування.

7.2. Класифікація електровимірювальних приладів

ЕВП використовують для вимірювання струму, напруги, потужності, опору, ємності й індуктивності. Класифікацію ЕВП здійснюють за декількома принципами.

За принципом дії ЕВП поділяють на магнітоелектричні, електромагнітні, електродинамічні, електростатичні, феродинамічні. Найбільше поширення одержали перші дві групи.

За родом вимірюваного струму розрізняють ЕВП постійного і змінного струму.

За видом вимірюваного параметра розрізняють: амперметри – вимірювання струму; вольтметри – вимірювання напруги; ватметри – вимірювання активної потужності; омметри – вимірювання активного опору та ін.

За способом подання результатів вимірювання розрізняють аналогові і цифрові прилади.

За призначенням розрізняють прилади промислового застосування, прилади, що входять у складні інформаційні системи, лабораторні прилади.

Існують також **комбіновані прилади**, що дозволяють вимірювати кілька параметрів електричних кіл.

Крім того, прилади підрозділяють на показуючі, реєструючі (самописні) і підсумовуючі (лічильники, інтегратори).

У показуючих приладах відлік значення вимірюваної величини проводять за положенням стрілки відносно шкали приладу.

Самописні прилади забезпечують як безперервний запис вимірюваної величини на папері, так і безпосередній відлік показань за вимірювальною стрілкою.

Підсумовуючі (інтегруючі) прилади забезпечують підсумовування показань за певний необхідний період роботи.

7.3. Загальні технічні характеристики електровимірювальних приладів

При електричних вимірюваннях необхідно враховувати мінімальну і максимальну межі вимірювань, ціну поділки приладу, його чутливість, похибку вимірювання, вхідний опір, споживану потужність.

Верхню межу вимірювального приладу називають **нормуючим значенням** X_n .

У багатомезних ЕВП стрілка показує вимірювану величину в поділках. Щоб перейти до величини вимірювання потрібно визначити **ціну поділки** (кількість одиниць вимірюваної величини в одній поділці шкали ЕВП):

$$C = \frac{X_n}{N}, \quad (7.2)$$

де N - число поділок шкали.

Значення фізичної величини визначають в такий спосіб:

$$X = C \cdot n, \quad (7.3)$$

де n – число поділок відхилення стрілки приладу.

Під **чутливістю ЕВП** розуміють відношення зміни сигналу на виході приладу до зміни вимірюваної величини. Чим меншу зміну вимірюваної величини прилад буде відзначати, тим більше можливостей для вимірювання високої точності.

Розрізняють **абсолютну** $S_{аб}$ і **відносну** $S_{від}$ **чутливості**:

$$S_{аб} = \frac{\Delta l}{\Delta X}; \quad S_{від} = \frac{\Delta l}{\Delta X / X}, \quad (7.4)$$

де Δl - зміна сигналу на виході приладу; ΔX - зміна вимірюваної величини; X - значення вимірюваної величини.

Зміна вимірюваної величини, що викликає найменше переміщення покажчика приладу, яку можна помітити при нормальному способі відліку, називається **порогом чутливості**.

Чутливість S пов'язана з ціною поділки приладу C співвідношенням:

$$S = \frac{1}{C}. \quad (7.5)$$

Межі допустимих похибок (основних і додаткових) можуть бути виражені у формах абсолютної, відносної і приведеної похибки. Більш докладно помилки засобів і методів вимірювань розглянуті в розділі 8.1.

7.4. Прилади магнітоелектричної системи

Прилади магнітоелектричної системи застосовують у колах постійного струму для вимірювання струму й напруги; вони мають цілий ряд позитивних якостей: високу чутливість і точність, рівномірність шкали і мале споживання потужності.

Принцип дії ЕВП магнітоелектричної системи заснований на взаємодії магнітного поля, створюваного вимірюваним струмом у рухомій котушці, з магнітним полем постійного магніту, в результаті якої котушка повертається на кут, пропорційний вимірюваному струму. На рис.7.1 показано будову ЕВП магнітоелектричної системи з внутрішньорамковим магнітом. У приладі є постійний магніт 1 і кільцевий магнітопровід 2, виготовлений з магнітом'якої сталі.

Внаслідок нерівномірного магнітного потоку постійного магніту на різних ділянках повітряного зазору створювалося б нерівномірне магнітне поле. Для усунення цього недоліку встановлюють магнітом'які сталеві накладки 3. У повітряному зазорі між магнітом 1 з накладками 3 і магнітопроводом 2 знаходиться рухома котушка 4, виконана у вигляді рамки з ізолюваного мідного проводу. Рамку закріплюють на підп'ятниках і вона вільно обертається навколо своєї осі. Спиральна пружина, зв'язана з віссю приладу, при повороті рамки створює протидіючий момент.

При включенні приладу до електричного кола в рамці виникає електричний струм, взаємодія якого з магнітним полем постійного магніту приводить до створення обертового моменту

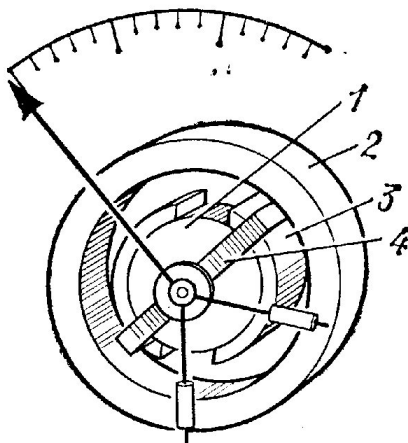


Рис.7.1 - Будова ЕВП магнітоелектричної системи

$$M_{об} = k_1 I, \quad (7.6)$$

де I - струм у рамці; k_1 - коефіцієнт пропорційності, що залежить від розмірів рамки, числа витків, величини магнітної індукції в повітряному зазорі і системи одиниць вимірювання.

Під дією обертового моменту рамка повертається, спиральні пружинки закручуються й створюють протидіючий момент

$$M_{пр} = k_2 \cdot \alpha, \quad (7.7)$$

де k_2 - коефіцієнт, що залежить від пружних властивостей пружини; α - кут закручування пружини (кут повороту рамки).

При рівності обертового й протидіючого моментів, які діють на рамку, настає її рівновага $M_{об} = M_{пр}$, тобто $k_1 \cdot I = k_2 \cdot \alpha$, звідки кут повороту рамки зі стрілкою дорівнює $\alpha = (k_1/k_2) I = k \cdot I$.

З останнього рівняння випливає, що **кут повороту стрілки магнітоелектричного приладу прямо пропорційний значенню струму, що проходить через рамку, а шкала приладу є рівномірною.**

Прилади даної системи строго полярні і для правильного включення до електричного кола затискачі приладу мають маркування «+» і «-».

7.4.1. Вимірювання постійного струму. Прилади для вимірювання струму називаються *амперметрами*. До електричного кола амперметр включають послідовно, причому опір приладу повинен бути на багато разів меншим за опір електричного кола.

Для вимірювання струмів, що перевищують граничний струм приладу, використовують шунти. Шунт являє собою опір $R_{ш}$, включений паралельно вимірювальному приладу. В деяких випадках для зручності вимірювань малих і великих струмів прилад має кілька шунтів. Чим менший опір шунта в порівнянні з внутрішнім опором амперметра, тим менший струм проходить через прилад.

Оскільки в паралельно включених електричних колах падіння напруг рівні між собою, то для шунта й амперметра (рис. 7.2) можна записати наступну рівність: $I_0 R_0 = I_{ш} R_{ш}$, звідки $R_{ш} = I_0 R_0 / I_{ш}$.

Внаслідок закону Кірхгофа повний струм у колі дорівнює $I = I_0 + I_{ш}$, тоді, підставляючи значення струму I , визначимо опір шунта $R_{ш} = I_0 R_0 / (I - I_0)$, де I_0 - струм повного відхилення амперметра, R_0 - внутрішній опір амперметра, I - вимірюваний струм у колі.

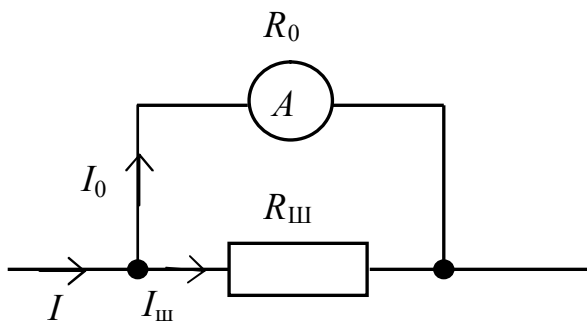


Рис.7.2 - Схема включення амперметра з шунтом

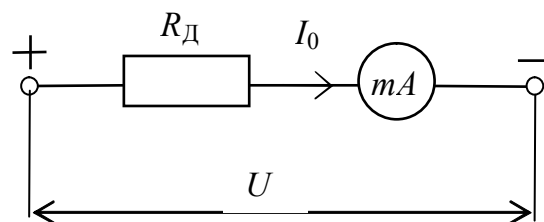


Рис.7.3 - Електрична схема вольтметра

7.4.2. Вимірювання постійної напруги. Прилад для вимірювання напруги називається *вольтметром*. Вольтметр для вимірювання постійної напруги складається із стрілочного приладу магнітоелектричної системи, послідовно з яким включений додатковий опір (рис. 7.3).

Додатковий опір підбирають так, щоб при граничному значенні вимірюваної напруги стрілка приладу мала граничне відхилення. Величину додаткового опору визначають за формулою

$$R_{д} = (U_{п} / I_0) - R_0, \quad (7.8)$$

де $U_{п}$ - граничне значення вимірюваної напруги, I_0 - струм повного відхилення приладу, R_0 - внутрішній опір приладу.

При вимірюванні напруги вольтметр підключають паралельно вимірюваній ділянці електричного кола.

7.5. Прилади електромагнітної системи

Прилади електромагнітної системи широко застосовують у колах постійного і змінного струму. Перевагами цих приладів є простота конструкції, надійність і стійкість до перевантажень.

Принцип дії ЕВП електромагнітної системи заснований на взаємодії двох феромагнітних осердь, що намагнічуються під дією магнітного поля котушки, по якій протікає вимірюваний струм.

Вимірюваний механізм електромагнітної системи з круглою котушкою показаний на рис. 7.4. У середині котушки 2 з екраном 1 встановлені два феромагнітних секторних осердя: рухоме 3, укріплене на осі, і нерухоме 4.

При протіканні по котушці 2 вимірюваного струму осердя 3, 4 намагнічуються одночасно й тому відштовхуються один від одного. Внаслідок цього створюється обертовий момент і вказівна стрілка приладу відхиляється на певний кут. Протидіючий момент створюється пружиною 5.

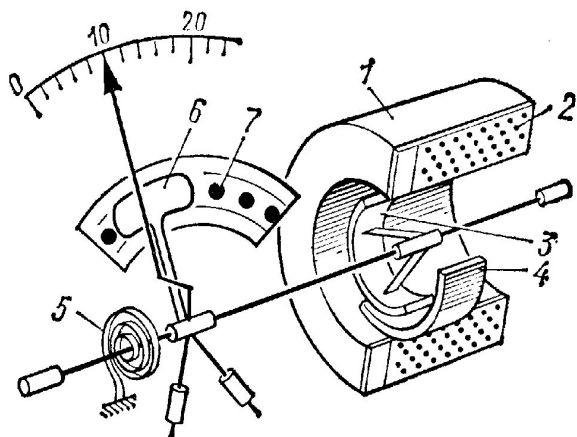


Рис.7.4 - Вимірювальний механізм електромагнітної системи

Магнітоіндуктивний заспокоювач приладу має рухомий алюмінієвий сектор 6 і постійні магніти 7.

Одночасно з вимірювальною стрілкою приладу при переміщенні сектора 6 у ньому індуктуються вихрові струми. В результаті взаємодії цих струмів з магнітним полем постійних магнітів 7 створюється сила, що гальмує рух сектора 6.

Обертовий момент вимірювального механізму приладу в колі змінного струму пропорційний квадрату діючого значення струму

$M_{BP} \approx C \cdot I^2$. Внаслідок цього **шкала приладу квадратична**, що є його недоліком. Підбором форми феромагнітних осердь вдається одержати шкалу, що нерівномірна тільки в початковій частині.

Електромагнітні прилади застосовують для вимірювання у колах постійного й змінного струмів як амперметри й вольтметри.

Амперметри виготовляють одно- і багатомежними шляхом секціонування котушки. Вольтметри звичайно виконують на декілька меж вимірювання з використанням ряду додаткових резисторів.

Електромагнітні прилади є одними з найпоширеніших щитових приладів для вимірювань у колах змінного струму: вони прості за конструкцією й надійні, добре переносять перевантаження. До недоліків цих приладів необхідно віднести невисоку точність, велике власне споживання енергії (амперметри - до 5 Вт, вольтметри 1,5 - 12 Вт), обмежений частотний діапазон, вплив на показання зовнішніх магнітних полів.

Щитові амперметри випускають на струми до 300 А прямого включення (з убудованими трансформаторами струму) і до 15 кА із зовнішніми трансформаторами струму. Щитові вольтметри тих же класів випускають на напруги до 600 В прямого включення і до 450 кВ з трансформаторами напруги.

7.6. Електродинамічні і феродинамічні прилади

7.6.1. Електродинамічні ЕВП. Принцип роботи ЕВП електродинамічної системи заснований на взаємодії магнітних полів нерухомої і рухомої котушок, по яких протікає вимірюваний струм.

Електродинамічний вимірювальний механізм (рис. 7.5) складається з двох котушок: нерухомої 1 і рухомої 2. Котушка 2 укріплена на розтяжках (або на осях) і може повертатися навколо осі всередині двох секцій нерухомої котушки. При наявності в котушках постійних струмів I_1 і I_2 виникають електромагнітні сили взаємодії, що прагнуть повернути котушку 2 співвісно з котушкою 1. Виникає обертовий момент

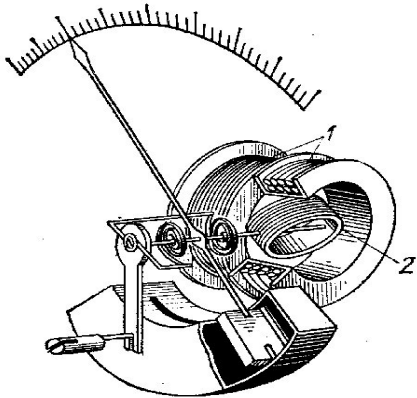


Рис.7.5 - Конструкція ЕВП електродинамічної системи

$$M_{об} = k \cdot I_1 \cdot I_2. \quad (7.9)$$

При синусоїдальних струмах обертовий момент електродинамічного вимірювального механізму пропорційний добутку діючих значень струмів у котушках I_1 і I_2 і косинусу кута зрушення фаз між ними:

$$M_{об} = k \cdot I_1 \cdot I_2 \cdot \cos \delta.$$

Електродинамічні прилади використовують в колах постійного і змінного струму як амперметри, вольтметри і ватметри.

7.6.2. Вимірювання потужності. Електродинамічні ватметри служать для вимірювання потужності в колах постійного й змінного струмів. При використанні ватметра в колі постійного струму (рис. 7.6) нерухома котушка включається до кола струму I , а рухома котушка з послідовно з'єднаним додатковим резистором R_D - паралельно навантажувальному пристрою з опором R_H . У паралельному колі ватметра утворюється струм $I_V = U/R_V$, де R_V - опір цього кола: $R_V = R_B + R_D$; R_B - опір обмотки напруги приладу. Тоді, підставивши до (7.9) $I_1 = I$, $I_2 = I_V$, матимемо

$$M = k \cdot I \cdot I_V = k \cdot U / R_V, \quad (7.10)$$

або

$$M = C \cdot U \cdot I = C \cdot P, \quad (7.11)$$

де C - коефіцієнт пропорційності.

Таким чином, обертовий момент пропорційний потужності, споживаної опором навантаження R_H .

Схема включення ватметра до кола змінного струму аналогічна схемі, показаній на рис. 7.6.

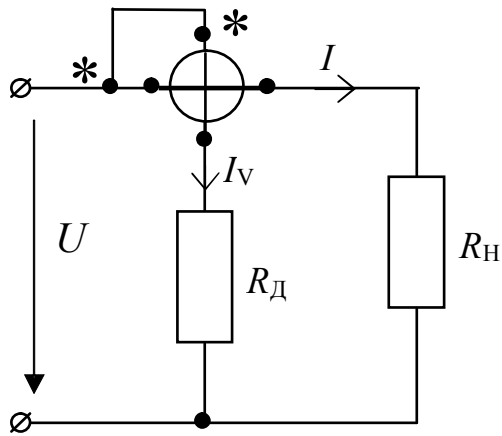


Рис.7.6 - Схема включення електродинамічного ватметра

електродинамічному, обертовий момент.

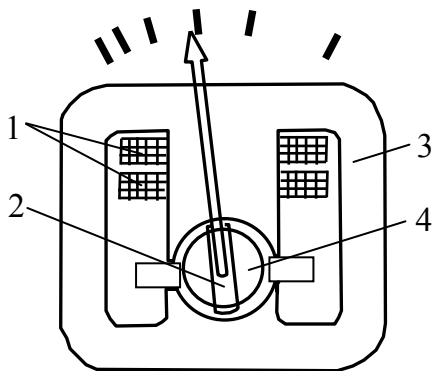


Рис.7.7 - Феродинамічний вимірювальний механізм

7.6.3. Феродинамічні ЕВП. Феродинамічний вимірювальний механізм (рис.7.7) відрізняється від електродинамічного більш сильним магнітним полем, одержуваним завдяки наявності магнітної системи, що складається з магнітопроводу 3 і нерухомого циліндра 4. Нерухома котушка 1 створює магнітне поле в зазорі, у якому може повертатися рухома котушка 2. У цьому механізмі за рахунок наявності магнітопроводу створюється більш сильний, ніж в

Феродинамічні прилади (амперметри, вольтметри, ватметри) застосовують в основному в колах змінного струму як щитові і переносні прилади. Вони відрізняються меншою сприйнятливістю до зовнішніх магнітних полів, великою чутливістю й меншим власним споживанням енергії. До недоліків феродинамічних приладів належить низька точність і обмежений частотний діапазон.

7.7. Вимірювальні перетворювачі

Вимірювальні перетворювачі являють собою численну групу засобів вимірювань, призначених для перетворення вимірюваної фізичної величини X у зручну для реєстрації величину (як правило, напругу або струм) Y (рис.7.8).

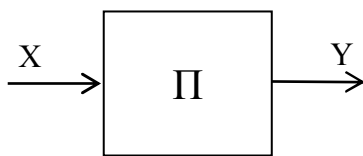


Рис.7.8 - Вимірювальний перетворювач

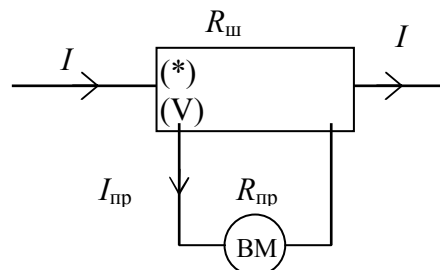


Рис.7.9 - Схема включення шунта

В електротехніці використовують наступні перетворювачі: шунти й додаткові опори; вимірювальні трансформатори струму й напруги; перетворювачі роду струму.

Шунти – це резистори, включені послідовно до кола вимірюваного струму й паралельно з вимірювальним механізмом.

Затискачі шунта, до яких підводять струм, називають струмовими затискачами. На схемах позначаються (*). Затискачі, до яких приєднують вимірювальний механізм, називають потенційними, на рис. 7.9 позначені (V). Шунти характеризуються номінальними значеннями вхідного струму й вихідної напруги. Відношення номінальної напруги до номінального струму визначається номінальним опором шунтів.

Номінальний струм у колі визначають як

$$I_{\text{пр}} = I \frac{R_{\text{ш}}}{R_{\text{пр}} + R_{\text{ш}}}, \quad I = I_{\text{пр}} \left(\frac{R_{\text{пр}}}{R_{\text{ш}}} + 1 \right) = I_{\text{пр}} \cdot p, \quad (7.12)$$

де $p = \frac{R_{\text{пр}}}{R_{\text{ш}}} + 1$ – коефіцієнт, що називається **шунтувальним множником**. Він показує у скільки разів вимірюваний струм у колі більший за струм приладу, або у скільки разів розширюється межа вимірювання струму:

$$p = \frac{I}{I_{\text{пр}}}. \quad (7.13)$$

З (7.12) можна одержати співвідношення для визначення опору шунта

$$R_{\text{ш}} = \frac{R_{\text{пр}}}{p - 1}. \quad (7.14)$$

Шунти бувають: внутрішні й зовнішні; одно- й багатомежеві (рис.7.10). За точністю їх ділять на класи: 0,02; 0,05; 0,16; 0,2; 0,5; 1.

Застосовують шунти, як правило, в колах постійного струму. На змінному струмі розподіл струму в паралельних гілках залежить від індуктивності та частоти, що вносить додаткову похибку у вимірювання.

Додаткові опори застосовують для розширення меж вимірювання напруги. Їх включають послідовно з вимірювальним механізмом (рис.7.11).

Відповідно до рис.7.11 можемо записати

$$U = U_{\text{пр}} + U_{\text{д}} = I_{\text{пр}} (R_{\text{пр}} + R_{\text{д}}) \quad (7.15)$$

З (7.15) можемо визначити значення додаткового опору

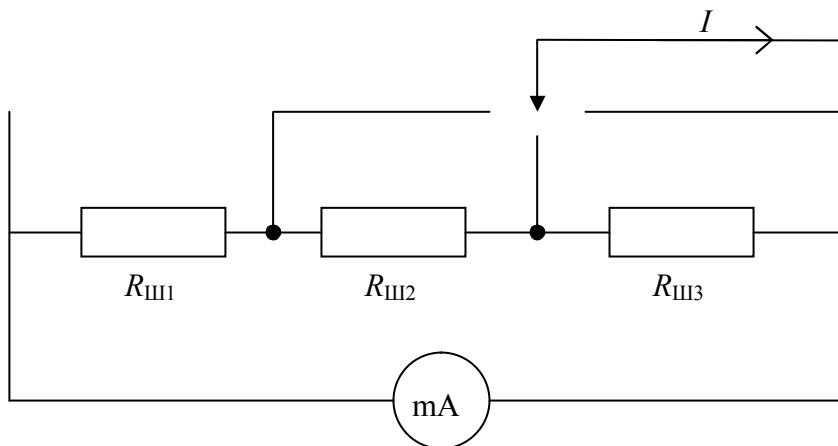


Рис.7.10 - Схема багатомежевого шунта

$$R_{\text{д}} = \frac{U - I_{\text{ПР}} \cdot R_{\text{ПР}}}{I_{\text{ПР}}} = R_{\text{ПР}}(p - 1), \quad (7.16)$$

де $p = U/U_{\text{ПР}}$ – коефіцієнт розподілу за напругою.

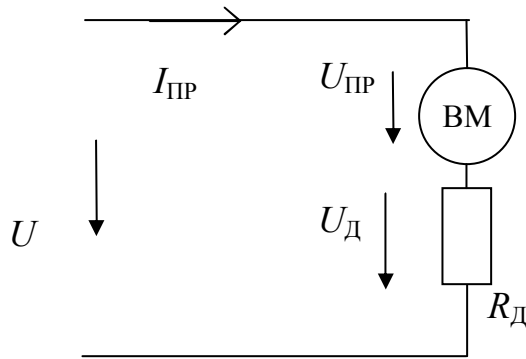


Рис.7.11 - Схема включення додаткового опору

З (7.16) випливає, що додатковий опір повинен бути в $(p-1)$ разів більшим за опір приладу.

Для одержання багатомежевих вольтметрів часто застосовують додаткові опори, що складаються з декількох резисторів (рис.7.12).

За таким же принципом виконують дільники напруги. Послідовно включають резистори, з виводів яких можна знімати необхідну напругу.

Додаткові опори виготовляють на

номінальні струми: 0,5; 1; 3; 5; 7; 15 А і на 30 мА.

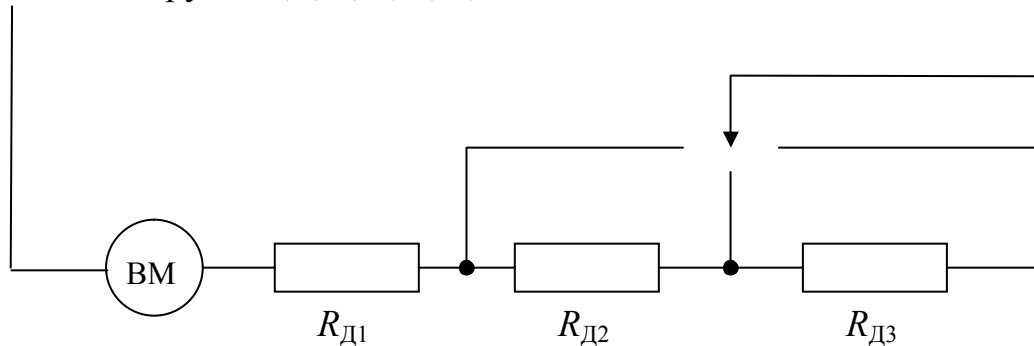


Рис.7.12 - Схема багатомежевого додаткового резистора

Вимірювальні трансформатори струму й напруги використовують як перетворювачі великих змінних струмів і напруг у відносно малі струми й напруги (див. розділ 9.6), припустимі для вимірювання приладами з невеликими стандартними номінальними значеннями (наприклад, 5 А, 100 В).

За схемою включення у вимірювальне коло (рис.7.13) і за умовами роботи трансформатори струму й напруги відрізняються один від одного. У трансформаторів струму первинну обмотку включають у вимірювальне коло послідовно. Первинну обмотку трансформатора напруги включають у вимірювальне коло паралельно. До вторинної обмотки приєднують прилади: амперметр або вольтметр відповідно.

За показаннями приладів, включених у вторинні обмотки, можна встановити значення вимірюваних величин. Для цього необхідно їхні показання помножити на номінальні коефіцієнти трансформації (вказані в паспортах трансформаторів): для трансформатора струму

$$k_{I_n} = \frac{I_{1H}}{I_{2H}}, \quad (7.17)$$

для трансформатора напруги

$$k_{U_H} = \frac{U_{1H}}{U_{2H}} . \quad (7.18)$$

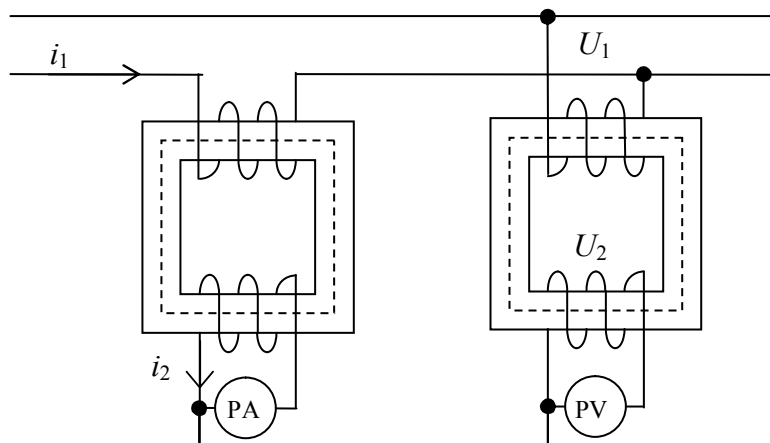


Рис.7.13 - Схеми включення трансформаторів струму і напруги

Дійсні коефіцієнти трансформації k_U і k_I залежать від значень опорів вторинного кола, напруги й струму в первинному колі. Через це виникають похибки за коефіцієнтом трансформації:

$$\delta_U = \frac{k_{U_H} - k_U}{k_U} \cdot 100\%, \quad \delta_I = \frac{k_{I_H} - k_I}{k_I} \cdot 100\% . \quad (7.19)$$

Вимірювані струм I_1 і напругу U_1 визначають за формулами

$$I_1 = k_{I_H} I_2, \quad U_1 = k_{U_H} U_2 . \quad (7.20)$$

Автотрансформатори використовують для перетворення в колах змінного струму однієї змінної напруги на іншу (див. також розділ 9.5). Вони мають одну обмотку, намотану на осердя. Звичайно витки w_1 розраховують на напругу 220 В. Частина витків у цій обмотці відділяють за допомогою повзунка, ці витки є витками вторинної обмотки w_2 . При русі повзунка напруга u_2 змінюється від нуля до напруги мережі u_1 (рис.7.14).

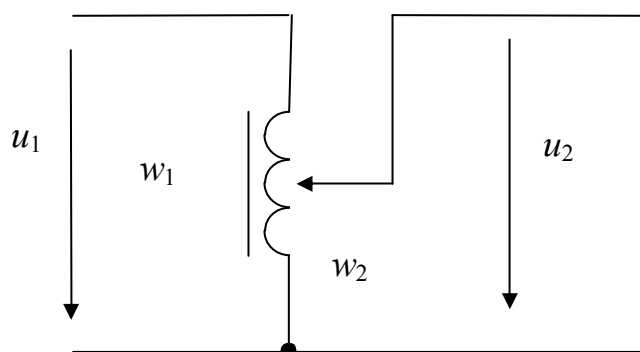


Рис.7.14 - Схема автотрансформатора

7.8. Електронні аналогові електровимірювальні прилади

Електронні аналогові ЕВП являють собою засоби вимірювання, в яких перетворення сигналів вимірювальної інформації здійснюється за допомогою аналогових електронних пристроїв. Показання цих приладів є безперервною функцією зміни вимірюваної величини. Прикладом цієї групи приладів є електронні вольтметри.

В електронних вольтметрах вимірювана напруга перетворюється у постійний струм, що подається на магнітоелектричний вимірювальний механізм із шкалою, градуйованою в одиницях напруги.

Розрізняють вольтметри постійної й змінної напруг. Структурна схема електронного вольтметра постійної напруги представлена на рис. 7.15, де ВхП - вхідний пристрій у вигляді високоомного резистивного дільника напруги, ППН - підсилювач постійної напруги, МВП - магнітоелектричний вимірювальний прилад.

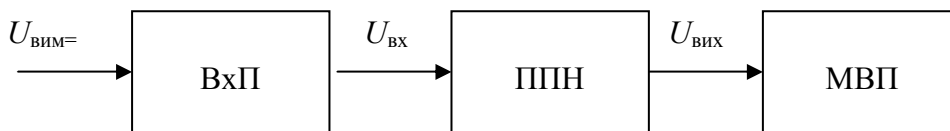


Рис.7.15 - Структурна схема електронного вольтметра постійної напруги

Вхідний пристрій забезпечує високий вхідний опір і значення вимірюваної напруги, необхідні для подальшого перетворення. ППН служить для збільшення чутливості вольтметра й посилення потужності вимірюваного сигналу з метою приведення до дії магнітоелектричного вимірювального механізму.

Відмінною рисою електронних вольтметрів змінної напруги є наявність перетворювача П змінної напруги на постійну (рис.7.16).

Позитивними якостями сучасних електронних вольтметрів є: великий вхідний опір (більше 1 МОм), мале споживання потужності, висока чутливість, широкий діапазон вимірюваних напруг (від десятків нановольтів на постійному струмі до десятків кіловольтів), широкий діапазон частот (від постійного струму до сотень МГц).

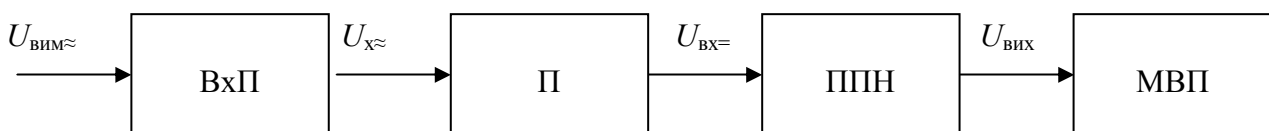


Рис. 7.16 - Структурна схема електронного вольтметра змінного струму

7.9. Цифрові електровимірювальні прилади

Цифрові вимірювальні прилади мають ряд істотних переваг перед звичайними (аналоговими) приладами: високу точність, можливість запам'ятовування, передачі й введення результатів вимірювань до автоматизованих вимірювальних комплексів і систем.

Принцип роботи цифрових вимірювальних приладів побудований на безперервному перетворенні вимірюваної величини на послідовність імпульсів (цифровий код) з наступною обробкою цього коду. Безперервне перетворення вимірюваної величини здійснюється за допомогою аналогово-цифрових перетворювачів, для побудови яких використовують три методи: часово-імпульсний, частотно-імпульсний і метод спостережувального зрівноважування.

У приладах часово-імпульсного перетворення вимірювана величина перетворюється в пропорційний інтервал часу, вимірюваний шляхом заповнення його послідовністю імпульсів опорної частоти.

При частотно-імпульсному перетворенні вимірювана величина пропорційна частоті послідовності імпульсів, обумовленої підрахунком числа імпульсів за калібрований інтервал часу.

Контрольні запитання з теми 7

1. Яку класифікацію мають ЕВП?
2. Що розуміють під точністю ЕВП?
3. Що розуміють під похибкою ЕВП? Які види похибок існують?
4. Як включають до електричного кола амперметри й вольтметри?
5. Поясніть конструкцію і принцип роботи магнітоелектричного ЕВП.
6. Поясніть конструкцію і принцип роботи електромагнітного ЕВП.
7. Поясніть конструкцію і принцип роботи електродинамічного ЕВП.
8. Чим відрізняються феродинамічні ЕВП?
9. Поясніть принцип дії шунта.
10. Поясніть схеми включення вимірювальних трансформаторів струму й напруги.
11. Які переваги мають цифрові ЕВП?

ТЕМА 8 МЕТОДИ ЕЛЕКТРИЧНИХ ВИМІРЮВАНЬ

Ключові поняття: похибка (систематична, випадкова, груба, абсолютна, відносна, приведена), чутливість, клас точності ЕВП, прямі й непрямі вимірювання, метод безпосередньої оцінки, методи порівняння (нульовий, диференціальний, заміщення).

8.1. Похибки і помилки вимірювань

Під *похибкою* розуміють відхилення отриманого результату вимірювання від істинного значення. Залежно від характеру зміни розрізняють систематичні, випадкові й грубі похибки.

Систематичні похибки при повторних вимірюваннях залишаються постійними й виявляються тільки при перевірці приладу.

Випадкові похибки виявляються при повторних вимірюваннях у вигляді розкиду результатів.

Грубі похибки дають різку відмінність від очікуваного результату і їх не враховують.

Залежно від джерела виникнення помилки вимірювання ділять на апаратні, методичні й суб'єктивні.

Апаратні або інструментальні помилки залежать від похибок використуваних засобів вимірювань. *Методичні або теоретичні помилки* з'являються внаслідок недосконалості методів вимірювань, використання наближених співвідношень, покладених в основу обраного методу вимірювання, не ураховання впливу ряду факторів на точність вимірювання. *Суб'єктивні помилки* – це помилки, викликані недосконалістю органів почуттів оператора, його неуважності при проведенні вимірювання.

Залежно від значення вимірюваної величини *X помилки* діляться на *адитивні*, абсолютне значення яких не залежить від *X*, і *мультиплікативні*, абсолютне значення яких пропорційно *X*.

Джерелами адитивної помилки можуть бути: зсув показника приладів з нульової відмітки до проведення вимірювання, тертя в опорах рухомих частин ЕВП, неточність градування шкали. Причини мультиплікативної помилки - вплив зовнішніх факторів (зміна температури, зовнішніх електромагнітних полів) і старіння елементів і вузлів ЕВП.

8.1.1. Похибки вимірювань. Межі похибок ЕВП, що допускаються, виражаються абсолютною, відносною і приведеною похибками.

Абсолютна похибка – це різниця між вимірюваним і дійсним значеннями

$$\Delta X = X - X_d \quad (8.1)$$

Абсолютну похибку вимірюють в одиницях вимірюваної величини, вона може приймати як додатні, так і від'ємні значення.

Відносна похибка – це відношення абсолютної похибки до дійсного значення вимірюваної величини

$$\delta = \frac{\Delta X}{X_D} = \frac{\Delta X}{X_D} \cdot 100\% . \quad (8.2)$$

Відносна похибка характеризує точність вимірювання, її виражають або у відносних одиницях або у відсотках, вона може приймати як додатні, так і від'ємні значення.

8.1.2. Похибки засобів вимірювань. Треба розрізняти похибки вимірювань і похибки засобу вимірювань, обумовлені його класом точності.

За способом вираження розрізняють абсолютні і відносні (аналогічні абсолютній (8.1) і відносній (8.2) похибкам вимірювань), а також приведені похибки засобів вимірювання.

Абсолютну похибку, взяту із зворотним знаком, називають поправкою:

$$P = -\Delta X = X_0 - X . \quad (8.3)$$

Приведена похибка – це відношення абсолютної похибки до нормуючого значення

$$\gamma = \frac{\Delta X}{X_N} = \frac{\Delta X}{X_N} \cdot 100\% , \quad (8.4)$$

де X_N – нормуюче значення, воно може дорівнювати верхній межі шкали, діапазону вимірювань, довжині шкали та ін. Для більшості приладів $X_N = X_H$, де X_H – межа вимірювання ЕВП або номінальне значення вимірюваної величини.

Як і відносна, приведена похибка може виражатися або у відносних одиницях, або у відсотках.

За характером зміни розрізняють систематичні і випадкові похибки ЕВП, за умовами застосування ЕВП - основні й додаткові. Основна похибка виникає в ЕВП при нормальних умовах експлуатації, встановлених ДЕРЖСТАНДАРТ 2261-82: температура навколишнього середовища $20 \pm 5^{\circ}\text{C}$; атмосферний тиск 750 ± 30 мм. рт. ст., відносна вологість $65 \pm 15\%$, напруга $220 \pm 4,4$ В для мережі з частотою 50 Гц, нормальне положення шкали приладу, відсутність зовнішніх електричних і магнітних полів, крім земного, та ін.

Додаткові похибки ЕВП виникають при відхиленні величин, що впливають (параметрів, вказаних вище), від нормальних значень.

Для характеристики засобів і методів вимірювань застосовують також поняття **чутливості** – мінімальне значення зміни контрольованого параметра, на яке здатний реагувати вимірювальний прилад.

8.1.3. Класи точності ЕВП. Клас точності ЕВП – це узагальнена характеристика, обумовлена межами допуску основних і додаткових похибок, а також іншими властивостями вимірювального засобу, що впливають на точність, значення яких встановлено в стандартах на окремі види вимірювальних засобів.

Основні способи нормування похибок, що допускаються, і позначення класу точності приладів встановлені ДСТ 8.401-80. На шкалі приладу маркують значення класу точності приладу у вигляді числа, що вказує нормуюче значення похибки у відсотках.

Для засобів, що вимірюють електротехнічні величини і мають верхні ме-

жі, клас точності встановлюють за приведеною похибкою. Для засобів вимірювань, що не мають верхніх меж, клас точності встановлюють за відносною похибкою. Відповідно до ДЕРЖСТАНДАРТ 8.401-80 засоби вимірювань при визначенні класу точності ділять на чотири групи:

1. Засоби вимірювань, в яких переважає адитивна складова похибки. Це показуючі і самописні прилади з адитивною похибкою від тертя, зміни положення в просторі та ін. Для цієї групи нормується значення похибки, виражене у відсотках (8.4), його використовують для позначення класу точності.

Показуючі ЕВП мають 8 класів точності: 0,05; 0,1; 0,2; 0,5 - лабораторні прилади; 1,0; 1,5; 2,5; 4 - технічні прилади. Цифра, що характеризує клас точності, визначає виражену у відсотках максимальну, основну приведену похибку приладу. Чим менше число, що означає клас точності, тим вище клас точності приладу. Відносну похибку ЕВП визначають співвідношенням

$$\delta = \pm \gamma \frac{X_H}{X}, \quad (8.5)$$

де γ - клас точності приладу. З виразу (8.5) випливає, що відносна помилка вимірювань, що характеризує їхню точність, залежить не тільки від класу точності приладу, а й від того, на якій частині шкали виконується вимірювання. Будь-який показуючий ЕВП доцільно використовувати тільки в останній чверті шкали приладу. У протилежному разі, навіть у приладу високого класу точності відносна помилка вимірювання може бути досить великою.

2. Засоби вимірювань, в яких переважає мультиплікативна складова помилки: дільники напруги, шунти, вимірювальні трансформатори струму й напруги та ін. У цій групі нормують межу щодо припустимої похибки у відсотках, а клас точності позначають числом, розміщеним у кружальці (наприклад, (1,5)), яке показує, що відносна помилка в будь-якій точці не перевищує $\pm 1,5\%$.

3. Засоби вимірювань, в яких адитивна і мультиплікативна складові помилки порівнянні. Це цифрові прилади, прилади порівняння з ручним і автоматичним зрівноважуванням (мости, компенсатори). Для цієї групи приладів межа відносної припустимої основної похибки виражається співвідношенням

$$\delta = \pm \left[c + d \left(\frac{X_H}{X} - 1 \right) \right] \%, \quad (8.6)$$

де X_H - межа вимірювань; X - вимірювана величина; $d = \gamma_a = \Delta X_a / X_H \cdot 100\%$ - приведені значення адитивної складової похибки, вираженої у відсотках; $c = \delta_m + \gamma_a$, причому $\delta_m = \Delta X_m / X_H \cdot 100\%$ - відносне значення мультиплікативної складової похибки у відсотках; c і d - постійні числа, а відношення c/d - клас точності приладу, наприклад 0,02/0,01. Перший його член c дорівнює відносній похибці засобу вимірювання в оптимальних умовах, коли $X = X_H$, а другий член d характеризує збільшення відносної похибки вимірювань при зменшенні X , тобто вплив адитивної складової похибки.

4. Засоби вимірювань, в яких переважає адитивна складова помилки, і які мають помітно виражену нерівномірну шкалу, наприклад, гіперболічну або логарифмічну. В цьому випадку нормується приведені значення похибки щодо

розмаху шкали. Клас точності позначається у вигляді числа, розміщеного між двома лініями, розташованими під кутом, наприклад $\sqrt{1.5}$. Цифра класу точності означає межу припустимої приведенної похибки, вираженої у відсотках, щодо шкали приладу в міліметрах.

8.2. Класифікація методів електричних вимірювань

Залежно від способу одержання результату *вимірювання підрозділяють на два види*: прямі й непрямі.

Прямими називають вимірювання, при яких шукане значення фізичної величини визначають безпосередньо за показанням приладу (вимірювання струму амперметром, електроенергії лічильником, напруги вольтметром та ін.).

Непрямими називають вимірювання, при яких шукане значення фізичної величини знаходять на підставі відомої функціональної залежності між цією величиною й величинами, отриманими в результаті прямих вимірювань. Прикладом може служити визначення електричного опору за показаннями амперметра й вольтметра.

Залежно від сукупності прийомів і засобів вимірювань всі методи ділять на методи безпосередньої оцінки й методи порівняння.

Під методом безпосередньої оцінки розуміють метод, при якому значення вимірюваної величини визначають безпосередньо за показанням відлікового пристрою вимірювального приладу прямої дії (значення струму - за показанням амперметра, значення напруги - за показанням вольтметра та ін.).

Методом порівняння називають метод, при якому вимірювана величина в спеціальному вимірювальному колі порівнюється з величиною, відтвореною мірою. Методи порівняння підрозділяють на нульовий, диференціальний і заміщення.

Нульовий метод - метод порівняння вимірюваної величини з мірою, де результуючий ефект впливу порівнюваних величин на прилад порівняння доводять до нуля.

Диференціальний метод - метод порівняння, в якому на вимірювальний прилад впливає різниця між вимірюваною величиною і величиною, відтвореною мірою (наприклад, вимірювання електричного опору за допомогою неврівноваженого моста).

Метод заміщення - метод порівняння з мірою, у якому вимірювану величину заміщають у вимірювальній установці відомою величиною, відтвореною мірою. При цьому шляхом зміни відомої величини домагаються такого ж показання приладу, що було при дії вимірюваної величини (наприклад, порівняння опору резистора з опором зразкової котушки, яку включають поперемінно до того самого плеча моста).

8.3. Вимірювання струму і напруги

Як було відзначено в розділі 7.4.1, для вимірювання струму в елементі кола (рис. 8.1,а) послідовно з ним включають амперметр (рис. 8.1,б).

При вимірюванні малих постійних струмів (менше 10^{-3} А) використовують прямі й непрямі методи вимірювання. У першому випадку струм вимірю-

ють стрілочними магнітоелектричними приладами, для збільшення чутливості яких звичайно застосовують підсилювачі постійного струму.

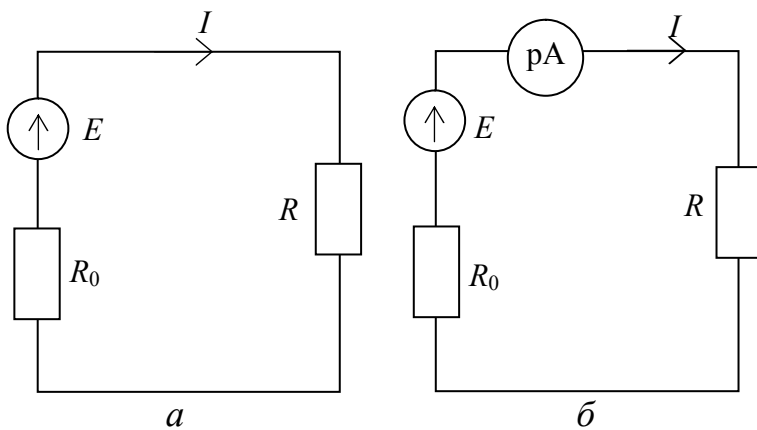


Рис.8.1 - Вимірювання струму в колі амперметром

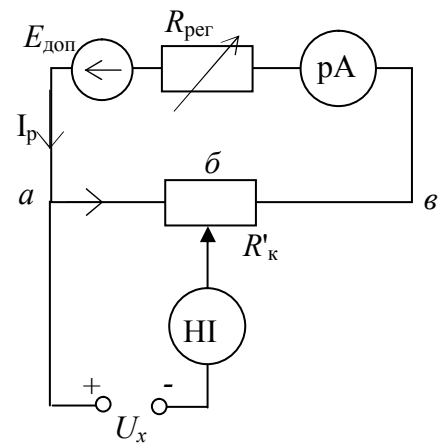


Рис.8.2 - Непряме вимірювання струму за компенсаційним методом

Більш точним є непряме вимірювання струму, при якому у вимірювальне коло включають зразковий резистор з опором R_0 і на ньому вимірюють падіння напруги компенсаційним методом. На рис. 8.2 показана принципова схема вимірювання невідомої напруги U_x за компенсаційним методом. У верхньому контурі під дією ЕРС допоміжного джерела живлення $E_{\text{доп}}$ створюється робочий струм I_p . Його значення регулюють резистором $R_{\text{рег}}$ і вимірюють амперметром pA . У нижньому контурі вимірювана невідома напруга U_x урівноважується падінням напруги на резисторі R'_k , що компенсує, шляхом зміни положення движка δ . При компенсації, коли $U_x = R'_k I_p$, струм у нульовому індикаторі HI стає рівним нулю, що відповідає нескінченно великому входному опору вимірювального пристрою.

Компенсаційне вимірювальне коло не відбирає енергію від об'єкта вимірювання. Знаючи R'_k і I_p , можна визначити U_x .

Пристрої, що реалізують компенсаційний метод вимірювання, називають потенціометрами. В останніх робочий струм встановлюється не за показанням амперметра, а компенсаційним методом з використанням нормального елемента, ЕРС $E_{\text{не}}$ якого відома з високим ступенем точності (рис. 8.3). Регулюванням опору резистора $R_{\text{рег}}$ домагаються відсутності струму в нульовому індикаторі HI (положення перемикача 1). У цьому випадку справедлива рівність

$$R_N \cdot I_p = E_{\text{не}}, \quad (8.7)$$

де R_N - опір зразкового резистора.

Оскільки ЕРС нормального елемента й опір R_N відомі з високою точністю, значення струму $I_p = E_{\text{не}}/R_N$ також відоме з високою точністю.

При положенні 2 перемикача вимірювана напруга U_x зрівнюється з компенсуючою напругою U_k , яка створюється струмом I_p у компенсуючому резисторі R'_k . При відсутності струму в HI напруга U_x урівноважена напругою U_k , тобто

$$U_x = U_k = R'_k \cdot I_p = \frac{R'_k}{R_N} E_{\text{не}}. \quad (8.8)$$

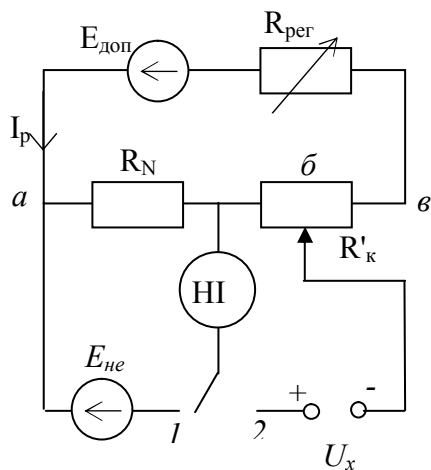


Рис.8.3 - Схема потенціометра

З (8.19) видно, що точність вимірювання U_x , при такому методі вимірювань визначається точністю величини U_k , точністю його порівняння з U_x , тобто чутливістю HI , незмінністю робочого струму I_p - стабільністю $E_{доп}$. В свою чергу, точність U_k залежить від точності виготовлення резисторів R_k . Останні в сучасних потенціометрах виконують у вигляді високостабільних багатodeкадних магазинів опору. Промисловість випускає потенціометри, які мають класи точності: 0,0005; 0,001; 0,002; 0,005; 0,01; 0,02; 0,05; 0,1; 0,2; 0,5. Максималь-

на напруга, вимірювана потенціометром безпосередньо, становить 2,12111 В.

Постійні струми порядку 10^{-3} - 10^2 А вимірюють також прямими й непрямими методами. При прямих вимірюваннях використовують прилади магнітоелектричної, електромагнітної й електродинамічної систем, а також електронні аналогові й цифрові прилади. При непрямих вимірюваннях струм визначають за вимірюваним падінням напруги на зразковому резисторі за допомогою потенціометрів постійного струму і цифрових вольтметрів.

Вимірювання великих постійних струмів (понад 100 А) звичайно здійснюють амперметрами магнітоелектричної системи з використанням шунтів.

При вимірюванні змінних струмів слід пам'ятати, яке значення струму вимірюється конкретним приладом: діюче, амплітудне або середнє. Це викликано тим, що всі прилади, як правило, градуують у діючих значеннях синусоїдального струму, а рухомі частини вимірювальних механізмів різних систем реагують на значення величин, відмінні від діючих.

Змінні струми до 100 мкА вимірюють цифровими мікроамперметрами, струми понад 100 мкА - випрямними мікроамперметрами. Для вимірювання змінних струмів у діапазоні 10 мА - 100 А використовують електромагнітні, електродинамічні й випрямні прилади, які працюють у частотному діапазоні до десятків кілогерц, і термоелектричні прилади в діапазоні частот до сотень мегагерц. Вимірювання великих змінних струмів здійснюють тими ж приладами, але з використанням вимірювальних трансформаторів струму.

Змінні струми вимірюють і непрямим шляхом. У цьому випадку зразковий резистор включають послідовно у вимірювальне коло, а падіння напруги на ньому вимірюють за допомогою вольтметрів. Точність вимірювання при цьому зростає.

При прямому й непрямому вимірюваннях струму включення у вимірювальне коло вимірювальника з внутрішнім опором R_A змінює режим роботи досліджуваного кола. На рис. 8.1 показані схеми кола до і після включення амперметра. Струм I після включення вимірювальника стає рівним I_A . Відносно вимірювання струму в цьому випадку характеризують **похибкою методу вимірювання або методичною похибкою вимірювання струму**:

$$\delta_I = \frac{-1}{1 + R_{BX.A} / R_A}, \quad (8.9)$$

тобто **включення амперметра зменшує вимірюваний струм на значення, що залежить від відношення $R_{BX.A} / R_A$.**

При вимірюванні малих постійних напруг (порядку $10^{-7} - 10^{-8}$ В) використовують магнітоелектричні гальванометри. Більш точні результати при вимірюванні напруг у діапазоні 1 - 1000 мкВ одержують за допомогою потенціометрів постійного струму й цифрових мікрвольтметрів.

Значення постійних напруг від десятків мілівольт до сотень вольт вимірюють приладами магнітоелектричної, електродинамічної, електромагнітної систем, електронними аналоговими й цифровими вольтметрами, потенціометрами постійного струму з використанням додаткових резисторів і дільників напруги. Для вимірювання постійних напруг до декількох кіловольт застосовують в основному електростатичні вольтметри, а також прилади інших систем з дільниками напруги.

Малі змінні напруги (до одиниць вольт) вимірюють за допомогою приладів випрямної системи, аналоговими електронними вольтметрами. Більш високу точність одержують при вимірюванні напруг потенціометрами змінного струму, цифровими вольтметрами.

Для вимірювання змінних напруг від одиниць до сотень вольт у діапазоні частот до десятків кілогерц використовують прилади електромагнітної, електродинамічної і випрямної систем, потенціометри змінного струму. У діапазоні частот до десятків мегагерц напругу вимірюють приладами електростатичної і термоелектричної систем, цифровими вольтметрами.

Для вимірювання великих змінних напруг використовують ті ж прилади, але із застосуванням вимірювальних трансформаторів напруги.

При підключенні вимірювальника напруги до ділянки електричного кола з опором R (рис. 8.4) змінюється режим її роботи. Напруга на цій ділянці стає рівною U_V . Відносну зміну напруги характеризують **похибкою методу вимірювання або методичною похибкою вимірювання напруги:**

$$\delta_V = \frac{-1}{1 + R_V / R_{BX.V}}, \quad (8.10)$$

тобто включення вольтметра зменшує вимірювану напругу на значення, що залежить від відношення $R_V / R_{BX.V}$. Відзначимо, що **вимірювання напруги потенціометром не має методичної похибки вимірювання напруги.**

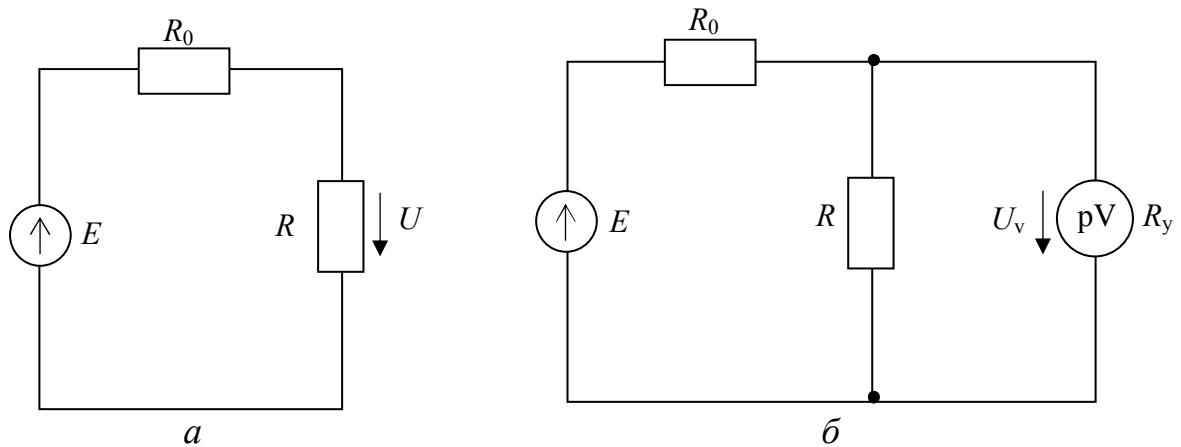


Рис. 8.4 - Вимірювання напруги вольтметром

8.4. Вимірювання потужності і електричної енергії

Вимірювання потужності здійснюють за допомогою прямого й непрямого методів. При прямому методі використовують ватметри, при непрямому - амперметри і вольтметри.

8.4.1. Вимірювання потужності в колах постійного струму. В колах постійного струму потужність вимірюють за методом амперметра - вольтметра. Вимірявши амперметром струм I і вольтметром напругу U (рис. 8.5), обчислюють потужність приймача

$$P = U \cdot I. \quad (8.11)$$

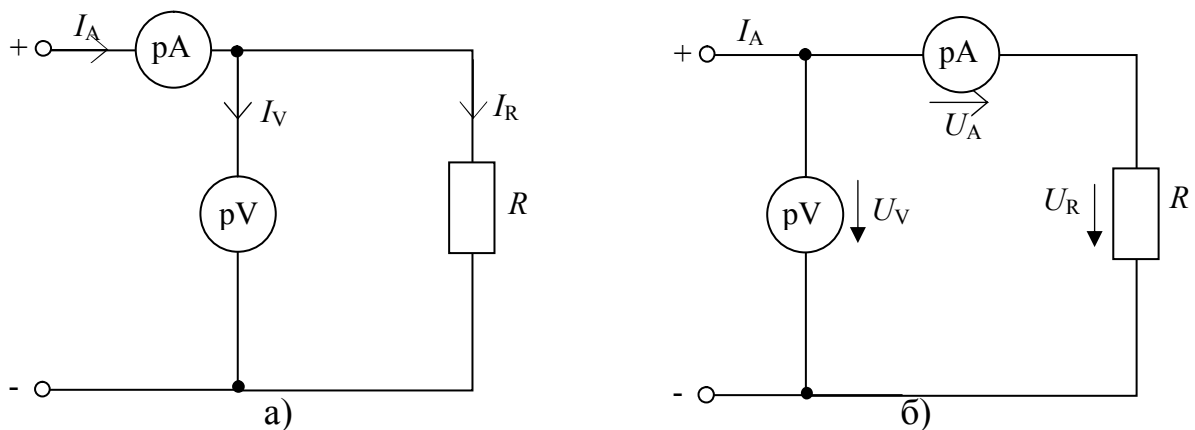


Рис.8.5 - Вимірювання потужності методом амперметра-вольтметра

Для зменшення похибки через вплив внутрішніх опорів приладів схему рис. 8.5,а необхідно використовувати при малих значеннях опору R , а схему рис. 8.5,б - при великих R .

8.4.2. Вимірювання потужності в колах однофазного струму. Повну потужність приймача вимірюють, як правило, методом амперметра - вольтметра:

$$S = U \cdot I, \quad (8.12)$$

де U і I - діючі напруга й струм.

Активну $P = U \cdot I \cos \varphi$ і реактивну $Q = U \cdot I \sin \varphi$ потужності приймачів вимірюють за допомогою ватметрів і варметрів. Як ватметри використовують електродинамічні і феродинамічні прилади, як варметри - електродинамічні прилади.

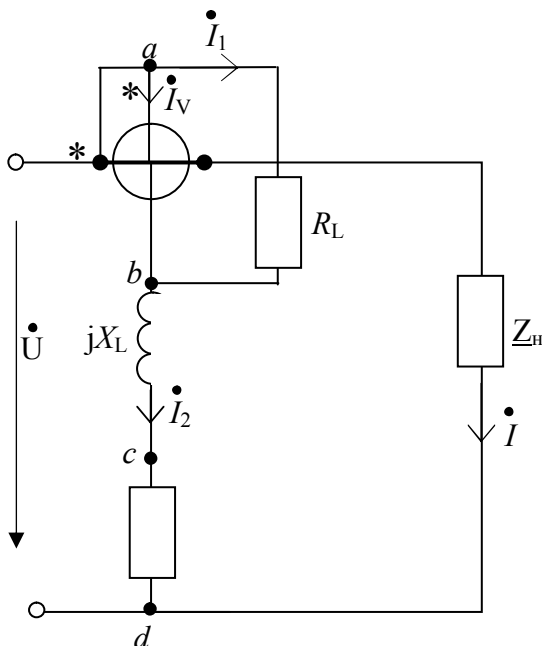


Рис.8.6 - Схема включення варметра

Вимірювання реактивної потужності в однофазних колах проводять за допомогою реактивних ватметрів, що називаються варметрами. У цих приладах схемним шляхом створюється штучне зрушення фаз на 90° між напругою U на приймачі й струмом в обмотці напруги приладу I_V (рис. 8.6). Із схеми рис. 8.6 видно, що послідовно з паралельною обмоткою R_{WV} приладу й додатковим резистором R включено індуктивну котушку з опором X_L , а паралельно до цієї обмотки (затискачі a й b) підключений резистор з опором R_L . Тоді струм $I_V = I_2 - I_1$ при відповідному підборі параметрів $X_L \ll (R_{WV} + R) = R_V$ буде зрушеним за фазою відносно напруги рівно на 90° . В

результаті обертовий момент буде пропорційним $\sin \varphi$ (де φ - кут зрушення фаз між напругою й струмом електроприймача), тобто обертовий момент пропорційний реактивній потужності $Q = U \cdot I \sin \varphi$.

8.4.3. Вимірювання потужності в трифазних колах. Потужність трифазної системи дорівнює сумі потужностей, споживаних навантаженнями кожної фази:

$$P = P_A + P_B + P_C. \quad (8.13)$$

У випадку рівномірного навантаження загальна активна потужність дорівнює потроєній потужності фази:

$$P = 3P_\Phi = 3I_\Phi \cdot U_\Phi \cdot \cos \varphi, \quad (8.14)$$

де I_Φ і U_Φ - фазні струм і напруга.

Якщо фазні значення струму і напруги виразити через лінійні, то матимемо:

$$P = \sqrt{3} U \cdot I \cdot \cos \varphi, \quad (8.15)$$

де I і U - лінійні струм і напруга.

Вимірювання активної потужності. Для вимірювання активної потужності трифазної системи застосовують різні способи:

Спосіб одного ватметра застосовують для вимірювання потужності при симетричному навантаженні в чотирипровідній або трипровідній лінії, якщо доступна для підключення нейтральна (нульова) точка навантаження (рис. 8.7). При цьому загальна потужність дорівнює потроєному показанню ватметра:

$$P = 3I_\Phi \cdot U_\Phi \cdot \cos \varphi. \quad (8.16)$$

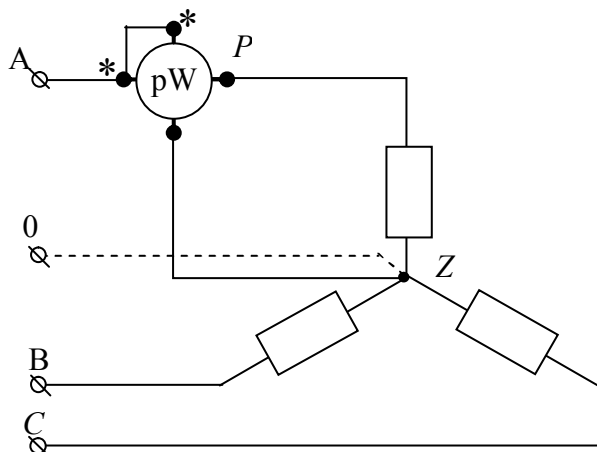


Рис.8.7 - Спосіб одного ватметра

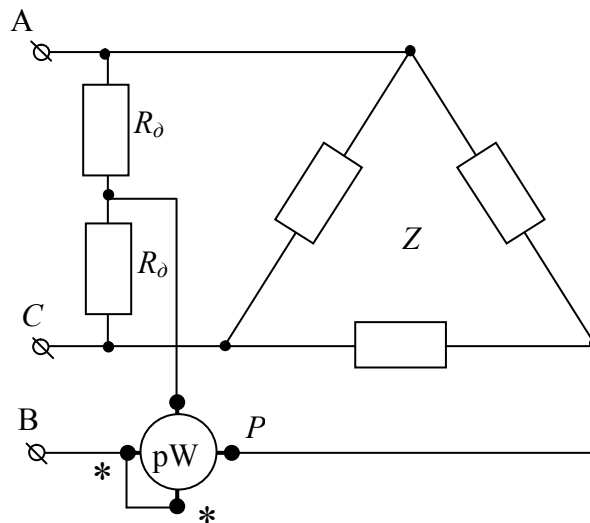


Рис.8.8 - Спосіб одного ватметра із штучною нульовою точкою

Спосіб одного ватметра із створенням штучної нульової точки застосовують для вимірювання потужності при симетричному навантаженні в тих випадках, коли нульова (нейтральна) точка електроприймача недоступна або взагалі відсутня (наприклад, у з'єднанні «трикутником»). При цьому до однієї з фаз включають струмову обмотку ватметра, а нульову (нейтральну) точку одержують включенням двох однакових опорів R_0 між двома іншими фазами (рис. 8.8). У цьому випадку загальна потужність дорівнює потроєному показанню ватметра.

Спосіб трьох ватметрів застосовують для вимірювання потужності при нерівномірному навантаженні в чотирипровідній лінії (рис. 8.9). Загальна потужність при цьому дорівнює сумі показань усіх трьох ватметрів.

Спосіб двох ватметрів може бути застосований у трипровідних лініях у всіх випадках при вимірюванні потужності трифазних приймачів (рис. 8.10). За цією схемою струмові обмотки ватметрів включають у будь-які дві фази, а обмотки напруги між третьою (незайнятою) фазою і тією фазою, до якої включена струмова обмотка даного ватметра. Загальна потужність при цьому дорівнює сумі показань обох ватметрів.

Слід мати на увазі, що при зрушенні фаз більше 60° (робота багатьох електричних машин у режимі холостого ходу) стрілка першого ватметра відхилиться у зворотну сторону від нуля. Для відліку від'ємних значень потужності по першому ватметру перемикають затискачі однієї з його обмоток (струмової або обмотки напруги), тоді загальна потужність у цьому випадку дорівнює різниці показань ватметрів:

$$P = P_2 - P_1 . \quad (8.17)$$

Користуючись методом двох ватметрів при рівномірному навантаженні, можна за показаннями приладів обчислити $\operatorname{tg}\varphi$, а потім φ і $\cos \varphi$:

$$\operatorname{tg}\varphi = \sqrt{3} \frac{P_1 - P_2}{P_1 + P_2} . \quad (8.18)$$

Метод двох ватметрів широко застосовують на практиці. Однак набагато зручніше вимірювати потужність трифазних приймачів двоелементним трифа-

зним ватметром, в якому об'єднані два однофазних ватметри, що впливають обертовими моментами на вісь, загальну для обох вимірювальних систем.

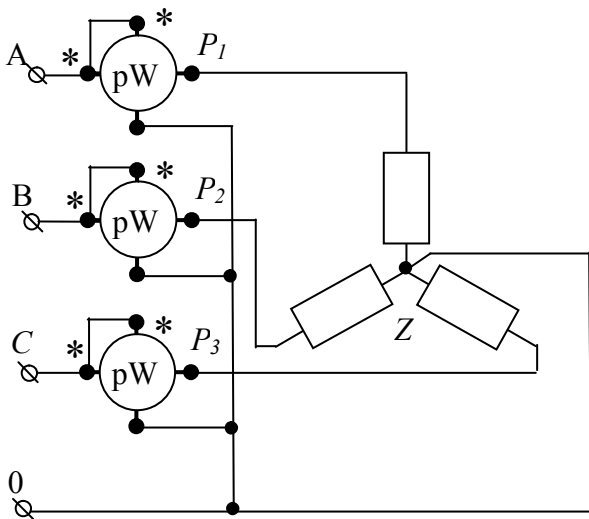


Рис.8.9 - Спосіб трьох ватметрів

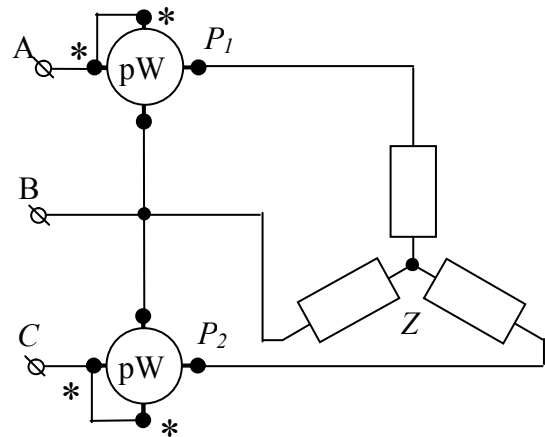


Рис.8.10 - Спосіб двох ватметрів

Вимірювання реактивної потужності. Для вимірювання реактивної потужності трифазної системи при рівномірному навантаженні можна користуватися одним ватметром активної потужності, при цьому струмову обмотку включають до однієї з фаз, а обмотку напруги - між двома іншими фазами (рис. 8.11,а).

Векторна діаграма (рис.8.11,б) пояснює принцип вимірювання реактивної потужності для даного випадку. Потужність, вимірювана ватметром, буде визначатися співвідношенням

$$P = I_A \cdot U_{BC} \cdot \cos(90^\circ - \varphi) = I_L \cdot U_L \cdot \sin \varphi . \quad (8.19)$$

Помноживши показання ватметра на $\sqrt{3}$, одержують загальну реактивну потужність трифазного кола:

$$Q = \sqrt{3}U \cdot I \cdot \sin \varphi . \quad (8.20)$$

На практиці застосовують трифазні реактивні ватметри зібрані за схемою двох ватметрів (рис. 8.12).

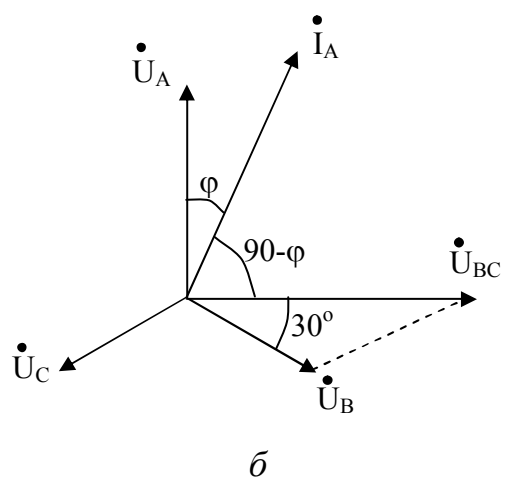
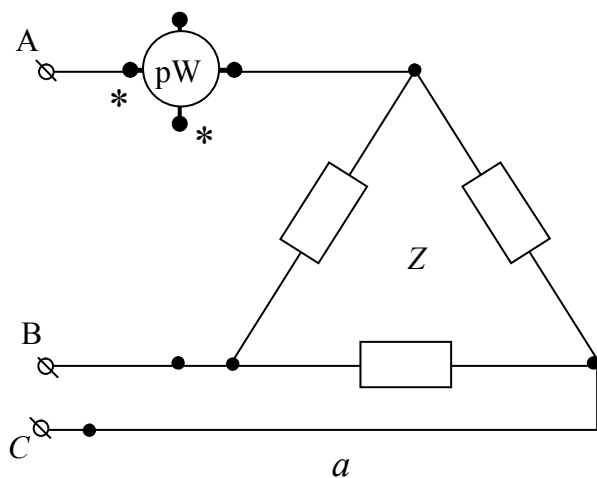


Рис.8.11 - Вимірювання реактивної потужності одним ватметром

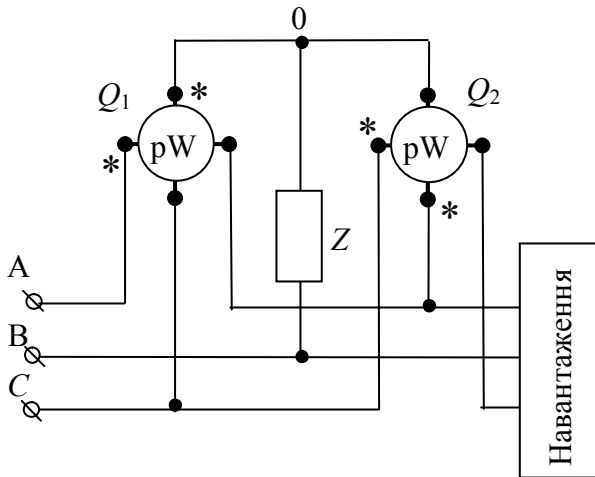


Рис.8.12 - Вимірювання реактивної потужності трифазного електроспоживача

Для включення обмоток напруги на фазну напругу тут є штучна нульова точка 0, утворена опорами двох обмоток напруги і додатковим опором Z. Загальна реактивна потужність трифазного навантаження визначається як сума показань двох варметрів, помножена на $\sqrt{3}$:

$$Q = \sqrt{3}(Q_1 + Q_2). \quad (8.21)$$

8.4.4. Вимірювання електричної енергії. Активну електричну енергію в колах змінного струму вимірюють індукційними лічильниками, ввімкненими за схемами, що аналогічні схемам включення ватметрів. На рис. 8.13 наведено

схему включення однофазного індукційного лічильника активної енергії.

Індукційні лічильники випускають одно- й трифазними. Розширення меж вимірювання досягається включенням лічильників у коло через вимірювальні трансформатори.

Для обліку активної енергії у трифазних мережах широко застосовують двоелементні лічильники, що являють собою сукупність двох однофазних індукційних лічильників, обертові моменти яких взаємодіють на загальну вісь і рахунковий механізм. В основу покладений метод, що дає можливість за допомогою двох лічильників (ватметрів) визначати загальну енергію (потужність), споживану в трифазній системі.

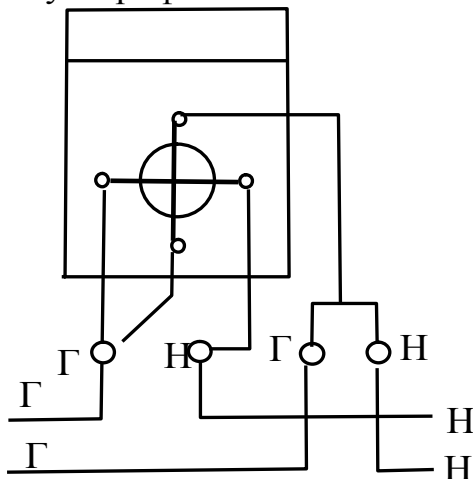


Рис.8.13 - Схема включення однофазного індукційного лічильника

На практиці застосовують також трифазні лічильники реактивної енергії. Облік реактивної енергії диктується необхідністю визначення середнього значення $\cos\phi$, покладеного в основу заохочувального і штрафного тарифів, які встановлюють для споживачів електричної енергії. Штрафний тариф за перевищення ліміту споживання реактивної енергії сприяє зниженню великими промисловими споживачами реактивної потужності своїх установок, і, як наслідок, зниженню втрат електроенергії

у високовольтних розподільних мережах.

За точністю лічильники діляться на класи 1,0; 2,0; 2,5 (лічильники активної енергії) і 2,0; 3,0 (лічильники реактивної енергії).

8.5. Вимірювання неелектричних величин

В інженерній практиці при контролі різних виробничих процесів часто доводиться мати справу з вимірюванням неелектричних величин: механічних (сила, тиск, швидкість та ін.), теплових (температура, теплоємність та ін.), світлових (освітленість, світловий потік та ін.).

Для контролю неелектричних величин і керування ними широко застосовують електричні методи і електровимірювальні прилади. Вони дозволяють одержувати дані з високим ступенем точності й у широкому діапазоні зміни значень величин, визначати характеристики об'єктів, що перебувають на великих відстанях і у важкодоступних місцях, вивчати процеси, запам'ятовувати результати вимірювання за допомогою обчислювальних машин або інформаційних систем та ін.

Для того щоб ту чи іншу неелектричну величину вимірювати, її потрібно попередньо перетворити на електричний сигнал. Таке перетворення здійснюють за допомогою датчиків або первинних перетворювачів. На рис. 8.14 показана структурна схема пристрою для вимірювання неелектричної величини електричним методом. На схемі показано: ПП – первинний перетворювач, ЕК – електричне вимірювальне коло, ВП – вихідний пристрій. Вимірювана неелектрична величина x надходить на вхід ПП, на виході якого з'являється електричний сигнал $y=f(x)$. Далі цей сигнал перетворюється у ЕК на інший електричний сигнал $U(x)$, що сприймається ВП, в результаті чого на виході всього пристрою виходить відхилення показчика $\alpha(x)$. Шкала вихідного пристрою градуйована безпосередньо в значеннях неелектричної величини x .

Первинні перетворювачі (ПП), що використовують у вимірюваннях, дуже різноманітні за конструкцією і принципом дії. Вони діляться на генераторні й параметричні.

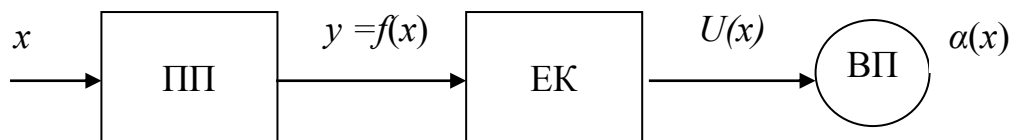


Рис.8.14 - Структурна схема пристрою для вимірювання неелектричної величини

Генераторні ПП виробляють ЕРС або струм, і для їхньої роботи, як правило, не потрібне додаткове джерело живлення. До генераторних ПП належать термоелектричні перетворювачі (термопари), індукційні, п'єзоелектричні, гальванічні перетворювачі та ряд інших.

Параметричні ПП перетворюють зміну вимірюваної неелектричної величини на зміну того або іншого параметра електричного кола (R, L, M, C), для їхньої роботи потрібне додаткове джерело живлення. До параметричних ПП належать: терморезистори, тензорезистори, реостатні, індуктивні і ємнісні перетворювачі та ін.

Вихідні пристрої (ВП), які використовують при вимірюваннях неелектричних величин, досить різні - від стрілочного магнітоелектричного мілівольтметра до самописного приладу із записом на діаграмній стрічці або ЕОМ. При великій кількості одночасно контрольованих величин сигнали з усіх ВП надходять до диспетчерського пункту або до інформаційно-вимірювальної системи.

Контрольні запитання

1. У чому різниця між точністю і чутливістю приладу?
2. Як розширюють межі вимірювання струму й напруги в колах постійного й змінного струмів?
3. Як включають електродинамічний ватметр у коло при вимірюванні активної потужності в однофазному (трифазному) колі?
4. Як ватметром виміряти реактивну потужність трифазної мережі?
5. Чим обумовлена висока точність вимірювання компенсаційним методом?
6. Як підібрати амперметр (вольтметр) для зменшення методичної похибки вимірювання струму (напруги)?
7. Як за допомогою двох ватметрів виміряти в трифазному трипровідному колі активну й реактивну потужності приймача?
8. З якими первинними перетворювачами використовують автоматичні мости й потенціометри?
9. У чому переваги електричних методів вимірювання неелектричних величин?

Задачі до тем 7 і 8, приклади їхнього розв'язання

Задача 8.1. За даними табл. 8.1. визначити найбільшу абсолютну й відносну похибку результатів виміру напруги вольтметром класу точності Кт з верхньою межею вимірювання U_{\max} , якщо показання приладу U_x , В. Знайти найменше значення напруги, яке можна вимірювати даним вольтметром при найбільшій припустимій помилці вимірювання $\pm 10\%$.

Таблиця 8.1

Параметр	Варіант завдання										
	К	0	1	2	3	4	5	6	7	8	9
Кт	2,5	1,5	1,0	0,5	2,5	1,5	1,0	0,5	0,2	0,2	1,0
U_{\max} , В	150	300	150	150	300	150	150	300	100	150	300
U_x , В	90	210	110	80	250	60	120	240	60	70	220

Розв'язання задачі для варіанта К.

Оскільки клас точності вольтметра, заданий у вигляді числа 2,5, визначається найбільшою приведеною похибкою, найбільшу абсолютну помилку визначимо за співвідношенням (8.4):

$$\Delta X = \frac{\gamma_m \cdot X_H}{100} = \pm \frac{2,5 \cdot 150}{100} = \pm 3,75 \text{ В.}$$

Найбільшу відносну похибку вимірювання визначимо за співвідношенням (8.2):

$$\delta = \frac{\Delta X}{X} \cdot 100\% = \frac{\pm 3,75 \cdot 100\%}{90} = \pm 4,17\%.$$

Найменше значення напруги, що може бути виміряним даним вольтметром при найбільшій припустимій похибці $\pm 10\%$, знайдемо, користуючись співвідношенням (8.5):

$$X = \frac{\gamma_m \cdot X_H}{\delta} = \frac{2,5 \cdot 150}{10} = 37,5 \text{ В.}$$

Задача 8.2. Цифровим вольтметром класу точності c/d виміряна напруга U_x на межі виміру U_{\max} . Визначити найбільшу абсолютну й відносну похибки вимірювання. Записати результат з отриманою помилкою. Вихідні дані наведені в табл.8.2.

Таблиця 8.2

Параметр	Варіант завдання										
	К	0	1	2	3	4	5	6	7	8	9
c/d	0,2/ 0,1	0,2/ 0,1	0,2/ 0,1	0,2/ 0,1	0,5/ 0,2	0,5/ 0,2	0,5/ 0,2	1,5/ 1,0	1,5/ 1,0	1,5/ 1,0	1,5/ 1,0
U_{\max} , В	99,99	100	100	150	150	150	150	300	300	300	300
U_x , В	50,2	64,8	78,4	110	69	135	48,3	179	246	261	285

Розв'язання задачі для варіанта К.

Найбільша відносна похибка вимірювання приладом, клас точності якого заданий у вигляді співвідношення c/d , визначається за формулою (8.6):

$$\delta = \pm \left[c + d \left(\frac{U_H}{U} \right) - 1 \right] \% = \pm \left[0,2 + 0,1 \left(\frac{99,99}{50,2} - 1 \right) \right] \% = \pm 0,299\%.$$

Найбільша абсолютна похибка вимірювання визначається за формулою (8.2)

$$\Delta U = \frac{\delta \cdot U}{100} = \pm \frac{0,299 \cdot 50,20}{100} = \pm 0,1501 \text{ В.}$$

Результат вимірювання із зазначеною похибкою матиме вигляд

$$U_0 = U - \Delta U = 50,20 \pm 0,15 \text{ В.}$$

Задача 8.3. Межа вимірювання струму амперметром із шунтом I_H . Він виконаний на основі магнітоелектричного міліамперметра з опором $R_{\text{пр}}$, межею вимірювань $I_{\text{пр.макс}}$ і шкалою α_H поділок. Визначити опір шунта $R_{\text{ш}}$ і струм кола I , до якого включений амперметр, якщо його стрілка відхилилася на α_x поділок (рис. 7.9). Вихідні дані наведені в табл.8.3.

Таблиця 8.3

Параметр	Варіант завдання										
	К	0	1	2	3	4	5	6	7	8	9
I_H , А	2,5	2,5	2,5	5	5	5	5	10	10	10	10
$R_{\text{пр}}$, Ом	0,4	0,6	0,4	1	1	1	1	2	2	2	2
$I_{\text{пр.макс}}$, ма	500	250	500	250	250	500	500	250	250	500	500
α_H , ПОДІЛОК	50	50	100	50	50	100	100	75	75	150	150
α_x , ПОДІЛОК	40	30	60	40	45	60	80	50	60	80	120

Розв'язання задачі для варіанта К.

$$\text{Коефіцієнт шунтування визначимо з (7.13) } p = \frac{I_H}{I_{np.\max}} = \frac{2,5}{500 \cdot 10^{-3}} = 5.$$

$$\text{Опір шунта з формули (7.14) } R_{ш} = \frac{R_{np}}{p-1} = \frac{0,4}{5-1} = 0,1 \text{ Ом.}$$

$$\text{Постійна амперметра із шунтом } C_i = \frac{I_H}{\alpha_H} = \frac{2,5}{50} = 0,05 \text{ А/под.}$$

$$\text{Струм у колі } I = C_i \cdot \alpha_X = 0,05 \cdot 40 = 2 \text{ А.}$$

Задача 8.4. Двомежевий міліамперметр (рис. 8.15) виконаний на основі магнітоелектричного мікроамперметра із струмом повного відхилення $I_{np.\max}$ і опором R_{np} . Визначити опори резисторів R_1 і R_2 двомежевого шунта, якщо межі міліамперметра $I_{1.\max}$ і $I_{2.\max}$. Вихідні дані наведені в табл.8.4.

Таблиця 8.4

Параметр	Варіант завдання										
	К	0	1	2	3	4	5	6	7	8	9
$I_{np.\max}$, мкА	100	100	100	100	150	150	150	150	300	300	300
R_{np} , Ом	2000	2400	2400	2000	2000	2400	2400	2000	2000	2400	2400
$I_{1.\max}$, мА	10	50	75	50	75	50	75	10	50	75	75
$I_{2.\max}$, мА	75	100	150	100	150	100	150	75	150	250	300

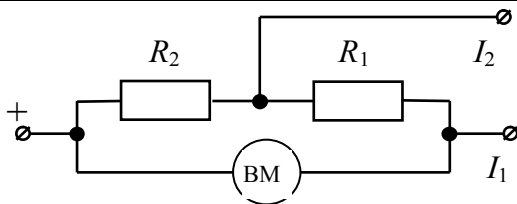


Рис.8.15 - Схема до задачі 8.4

Розв'язання задачі для варіанта К.

Коефіцієнти шунтування за (7.13):

$$p_1 = \frac{I_{1.\max}}{I_{np.\max}} = \frac{10 \cdot 10^{-3}}{100 \cdot 10^{-6}} = 100;$$

$$p_2 = \frac{I_{2.\max}}{I_{np.\max}} = \frac{75 \cdot 10^{-3}}{100 \cdot 10^{-6}} = 750.$$

Використовуючи формулу (7.14), запишемо систему рівнянь:

$$\begin{cases} R_1 + R_2 = \frac{R_{np}}{p_1 - 1}; \\ R_2 = \frac{R_1 + R_{np}}{p_2 - 1}; \end{cases}$$

$$\text{з якої знайдемо } R_2 = \frac{R_{np} \cdot p_1}{(p_1 - 1) \cdot p_2} = \frac{2000 \cdot 100}{(100 - 1) \cdot 750} = 2,69 \text{ Ом.}$$

$$\text{Тоді } R_1 = \frac{R_{np}}{p_1 - 1} - R_2 = \frac{2000}{100 - 1} - 2,69 = 17,51 \text{ Ом.}$$

ЗМІСТОВИЙ МОДУЛЬ 2

ТРАНСФОРМАТОРИ І ЕЛЕКТРИЧНІ МАШИНИ

Трансформатори і електричні машини належать до пристроїв, у яких здійснюється перетворення енергії: у трансформаторах - електричної енергії одного класу напруги або струму на інший клас напруги або струму; в електричних машинах - механічної енергії на електричну або електричної на механічну.

Електрична машина - це електромеханічний пристрій, що здійснює взаємне перетворення механічної і електричної енергії. Пристрої, які перетворюють механічну енергію на електричну, називають **генераторами**, а пристрої, які перетворюють електричну енергію на механічну, – **електродвигунами**. Під **трансформатором** розуміють пристрій для перетворення електричної енергії змінного струму.

У наш час трансформатори й електричні машини застосовують практично в усіх галузях економіки, зокрема на підприємствах будівельної індустрії й будівельних майданчиках.

Взаємозв'язок розділів другого змістового модуля програми курсу "Електротехніка у будівництві" показаний на рис. М.2.1. У посібнику обрана прийнята багатьма авторами послідовність викладу тем курсу, що визначається логікою вивчення фізичних процесів в електроустаткуванні: трансформатори (однофазні, трифазні), електричні машини (машини постійного струму, асинхронні машини, синхронні машини).

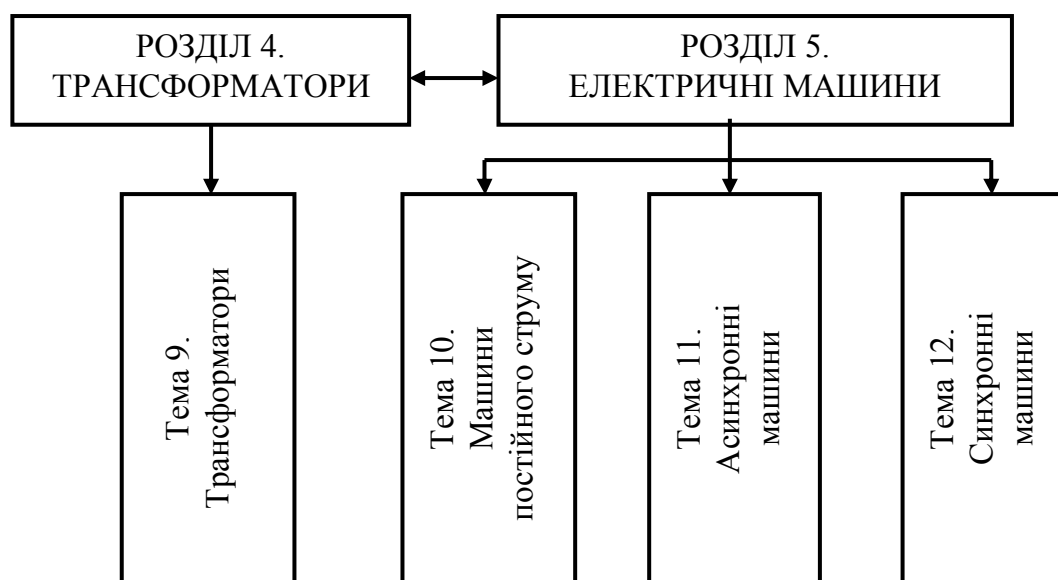


Рис.М.2.1 - Взаємозв'язок розділів змістового модуля
"Трансформатори і електричні машини"

Для розуміння принципу дії електричних машин необхідне знання закону електромагнітної індукції (закон Фарадея) і закону електромагнітної взаємодії (закон Біо-Савара-Лапласа).

Відповідно до закону електромагнітної індукції (4.3) наведення ЕРС у контурі можливе:

при обертанні контуру в нерухомому магнітному полі (машини постійного струму);

при нерухомому контурі й обертовому магнітному полі (синхронні машини);

коли обертаються і магнітне поле, і контур (асинхронні машини);

при нерухомих у просторі магнітному полі й контурі, але магнітному полі, що змінюється за величиною в часі (трансформатори).

Принцип дії генератора полягає в тому, що при пересуванні з швидкістю V м/с провідника, що має довжину l м, перпендикулярно до магнітних ліній у магнітному полі з індукцією B , у ньому за законом електромагнітної індукції виникає ЕРС:

$$e = B \cdot l \cdot V, \text{ В.}$$

Якщо замкнути кінці провідника через опір або накоротко, то під впливом ЕРС по ньому потече струм I , А. Напрямки ЕРС і струму збігаються. Струм I , взаємодіючи з магнітним потоком, в якому він перебуває, створює силу, що виштовхує провідники з магнітного поля, яка відповідно до закону електромагнітної взаємодії (закон Біо-Савара-Лапласа) дорівнює

$$F = B \cdot I \cdot l, \text{ Н.}$$

Сила взаємодії проявляється як реакція на зовнішню силу, прикладену до провідника. Вона дорівнює і протилежна останній.

Принцип дії електричного двигуна полягає в тому, що при проходженні струму по провіднику, що перебуває в магнітному полі, на провідник впливає сила F , під дією якої він буде рухатися.

ТРАНСФОРМАТОРИ

ТЕМА 9 ТРАНСФОРМАТОРИ

Ключові поняття: трансформатор, первинна і вторинна обмотки, магнітопровід, режим холостого ходу, режим короткого замикання, підвищувальний і понижувальний трансформатор, коефіцієнт трансформації, зовнішня характеристика, автотрансформатор, вимірювальний трансформатор.

9.1. Загальні відомості про трансформатори

Трансформатор - це електротехнічний пристрій, призначений для перетворення змінного струму однієї напруги на змінний струм іншої напруги тієї ж частоти.

Трансформатор складається із сталевого осердя і обмоток. Осердя зібране з тонких листів електротехнічної сталі, ізольованих один від одного з метою зниження втрат потужності на гістерезис і вихрові струми.

Перетворення напруги в трансформаторах здійснюється змінним магнітним потоком індуктивно зв'язаних між собою обмоток. Обмотка, що підключається до джерела електричної енергії, називається *первинною*, а обмотка, до якої підключене навантаження, – *вторинною*. Параметри трансформатора, що належать до первинної обмотки (число витків, напруга, струм і т.д.), називаються первинними і в їхніх літерних позначеннях використовується індекс 1. Відповідно параметри вторинної обмотки називаються вторинними й записуються з індексом 2.

Якщо через трансформатор необхідно здійснити живлення двох і більше навантажень з різною напругою живлення, то виконують кілька вторинних обмоток.

За призначенням трансформатори діляться на силові і спеціального призначення (зварювальні, вимірювальні, погоджувальні та ін.).

Силові трансформатори бувають однофазні (для кіл однофазного струму) і трифазні (для трифазних кіл), такі що підвищують і такі, що знижують напругу. На рис. 9.1 показані умовні графічні позначення однофазного (а, б, в) і трифазного (г, д, е) трансформаторів.

За способом охолодження трансформатори діляться на сухі й масляні. У масляних трансформаторів обмотки занурені у сталевий бак, заповнений маслом.

На щитку трансформатора вказують його номінальні параметри: первинну й вторинну напругу; номінальну повну потужність; струм при номінальній повній потужності; частоту; число фаз; схему з'єднання обмоток; режим роботи (тривалий або короткочасний); спосіб охолодження.

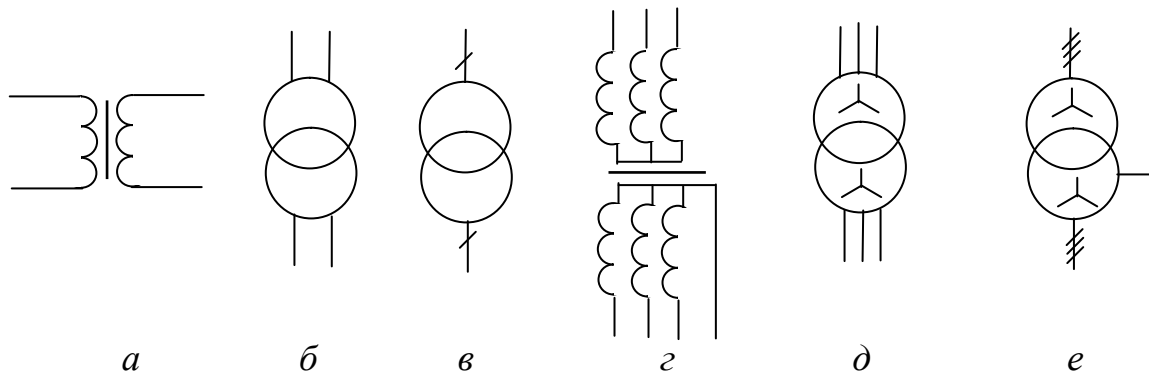


Рис.9.1 - Умовні графічні позначення трансформаторів

9.2. Однофазний трансформатор

9.2.1. Принцип дії однофазного трансформатора. На осерді однофазного трансформатора (рис. 9.2) у найпростішому випадку розташовані дві обмотки, виконані з ізолюваного проводу. До первинної обмотки підводять живлячу напругу U_1 . Із вторинної обмотки знімають напругу U_2 , яку підводять до споживача електричної енергії Z_H .

Змінний струм \dot{I}_1 , проходячи по витках первинної обмотки трансформатора w_1 , створює в осерді магнітопроводу змінний магнітний потік Φ . Змінюючись у часі за синусоїдальним законом $\Phi = \Phi_m \sin \omega t$, цей потік пронизує витки вторинної обмотки трансформатора. При цьому відповідно до закону електромагнітної індукції в ній наводиться ЕРС e_2 :

$$e_2 = w_2 \frac{d\Phi}{dt} = E_{m2} \sin(\omega t + \frac{\pi}{2}), \quad (9.1)$$

де w_2 – число витків вторинної обмотки трансформатора; E_{m2} – амплітудне значення ЕРС у вторинній обмотці.

Під дією ЕРС e_2 у вторинному колі трансформатора, замкнутому на навантаження, протікає струм \dot{I}_2 .

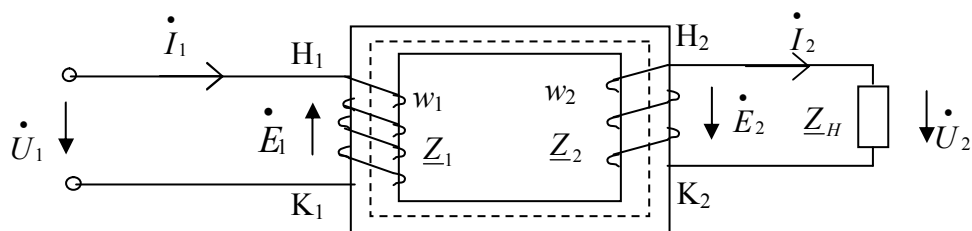


Рис.9.2 - Принцип дії однофазного трансформатора

Відношення ЕРС первинної обмотки трансформатора до ЕРС його вторинної обмотки, що дорівнює відношенню числа витків відповідних обмоток, називають **коефіцієнтом трансформації** трансформатора

$$n = \frac{E_1}{E_2} = \frac{w_1}{w_2}. \quad (9.2)$$

Якщо $E_1 < E_2$, то трансформатор є **підвищувальним**, при $E_1 > E_2$, він є **понижувальним**.

9.2.2. Режими роботи трансформатора. Залежно від величини опору навантаження розрізняють *три режими роботи трансформатора*: $Z_H = \infty$ - режим холостого ходу; $0 < Z_H < \infty$ - режим навантаження; $Z_H = 0$ - режим короткого замикання.

У режимі холостого ходу вторинна обмотка трансформатора розімкнута. Струм первинної обмотки трансформатора при відключеному споживачі електроенергії є *струмом холостого ходу* I_0 :

$$I_0 = I_{m0} \sin(\omega t + \alpha)$$

Кут магнітних втрат α , що входить у рівняння (кут зрушення за фазою між струмом і магнітним потоком трансформатора), обумовлений втратами потужності в магнітопроводі. Значення кута α для сучасних електротехнічних сталей звичайно невелике і становить $4...6^\circ$.

Напруга, яку підводять в режимі холостого ходу до трансформатора, відповідно до другого закону Кірхгофа може бути представлена як сума падінь напруги в первинному колі:

$$\dot{U}_1 = \dot{E}_1 + R_1 \dot{I}_0 + jX_1 \dot{I}_0, \quad (9.3)$$

де R_1 - активний опір первинної обмотки; X_1 - індуктивний опір первинної обмотки; E_1 - ЕРС, що наводиться в первинній обмотці магнітним потоком $e_1 = w_1 \frac{d\Phi}{dt} = E_{m1} \sin(\omega t + \frac{\pi}{2})$.

Виходячи з рівняння електричної рівноваги (9.3), можна побудувати векторну діаграму трансформатора для режиму холостого ходу (рис. 9.3).

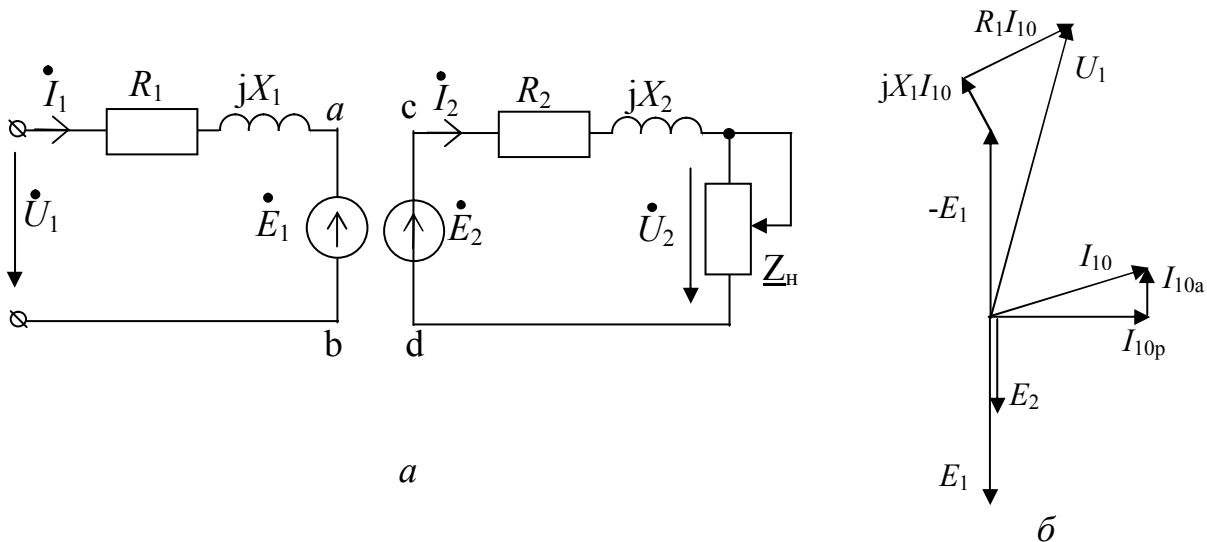


Рис.9.3 - Схема заміщення й векторна діаграма режиму холостого ходу

Внаслідок перемагнічування магнітопроводу в ньому виникають втрати потужності, які називають *втратами холостого ходу*. Потужність P_0 , споживана з мережі в режимі холостого ходу, витрачається в основному на покриття втрат у магнітопроводі, тому що втрати в обмотці $R_1 I_{10}^2$ малі. Струм холостого ходу I_{10} містить активну й реактивну складові $I_{10} = \sqrt{I_{10a}^2 + I_{10p}^2}$.

Режим короткого замикання для силового трансформатора є аварійним. Однак деякі спеціальні трансформатори розраховують для роботи в режимі близькому до короткого замикання. Це зварювальні трансформатори, вимірювальні трансформатори струму.

При роботі трансформатора в режимі навантаження ($Z_H \neq 0$) у вторинному колі під впливом \dot{E}_2 з'являється струм \dot{I}_2 . Основний магнітний потік Φ_0 створюється спільною дією магніторушійної сили первинної й вторинної обмоток. Результуюча магніторушійна сила F_p дорівнює їхній геометричній сумі.

$$\dot{F}_p = w_1 \dot{I}_1 + w_2 \dot{I}_2 = w_1 \dot{I}_{10}. \quad (9.4)$$

З урахуванням активного опору обмоток рівняння електричного стану первинного й вторинного кіл мають вигляд

$$\begin{aligned} \dot{U}_1 &= -\dot{E}_1 + (R_1 + jX_1)\dot{I}_1, \\ \dot{E}_2 &= (R_2 + jX_2)\dot{I}_2 + \underline{Z}_H \dot{I}_2. \end{aligned} \quad (9.5)$$

9.2.3. Схеми заміщення трансформатора. Для дослідження режимів роботи трансформаторів магнітний зв'язок між первинною й вторинною обмотками замінюють електричним зв'язком. З'єднання перемичками ас і bd на схемі рис. 9.3,а можливе, якщо $\dot{U}_{ab} = \dot{U}_{cd}$. Цій вимозі задовольняє умова $\dot{E}'_2 = -\dot{E}_1 = \dot{E}_2 \frac{w_1}{w_2}$, де \dot{E}'_2 називають приведеною ЕРС.

Еквівалентність енергетичних співвідношень у трансформаторі і його схема заміщення не будуть порушені, якщо повна потужність $S_2 = S'_2$ ($E_2 I_2 = E'_2 I'_2$), активна потужність $P_2 = P'_2$ ($R_2 I_2^2 = R'_2 I'^2_2$) і реактивна потужність $Q_2 = Q'_2$ ($X_2 I_2^2 = X'_2 I'^2_2$), а також потужність у навантаженні $S_H = S'_H$ ($U_2 I_2 = U'_2 I'_2$) залишаться незмінними. З останніх рівностей одержуємо значення параметрів схеми заміщення, які називають приведеними (до числа витків w_1).

$$I'_2 = I_2 \frac{1}{n}; \quad R'_2 = R_2 n^2; \quad X'_2 = X_2 n^2; \quad U'_2 = U_2 n; \quad Z'_2 = Z_2 n^2. \quad (9.6)$$

Таким чином, схема трансформатора (рис. 9.3,а) може бути подана у вигляді еквівалентної схеми заміщення, показаної на рис. 9.4,а. Повна система рівнянь електричного і магнітного стану трансформатора з урахуванням приведення вторинної обмотки до первинної за числом витків і $\dot{U} = -\dot{E}_1 = \dot{E}'_2$ має вигляд

$$\begin{aligned} \dot{U}_1 &= \dot{U} + \underline{Z}_1 \dot{I}_1; \\ \dot{U} &= \underline{Z}'_2 \dot{I}'_2 + \dot{U}'_2; \\ \dot{I}_1 &= \dot{I}'_2 + \dot{I}'_1. \end{aligned} \quad (9.7)$$

Ці рівняння описують електромагнітні процеси у двоконтурній схемі, яку називають еквівалентною схемою заміщення трансформатора. На рис. 9.4,а представлена Т-подібна схема заміщення трансформатора. У тих випадках, коли

$\underline{Z}_1 \dot{I}_1$ невелике в порівнянні з \dot{U}_1 , вважають $U_1 \approx U$, схема заміщення спрощується (рис. 9.5,б). Така схема називається Г-подібною. Тут $X_k = X_1 + X'_2$; $R_k = R_1 + R'_2$.

У режимах роботи трансформатора, близьких до короткого замикання, коли $I_{10} \ll I_1$, із схеми рис. 9.4,б виключають гілку $R_M - X_M$ (рис. 9.4,в).

Еквівалентні схеми заміщення трансформатора використовують для аналізу й розрахунків режимів його роботи, тому їх називають розрахунковими схемами заміщення трансформатора.

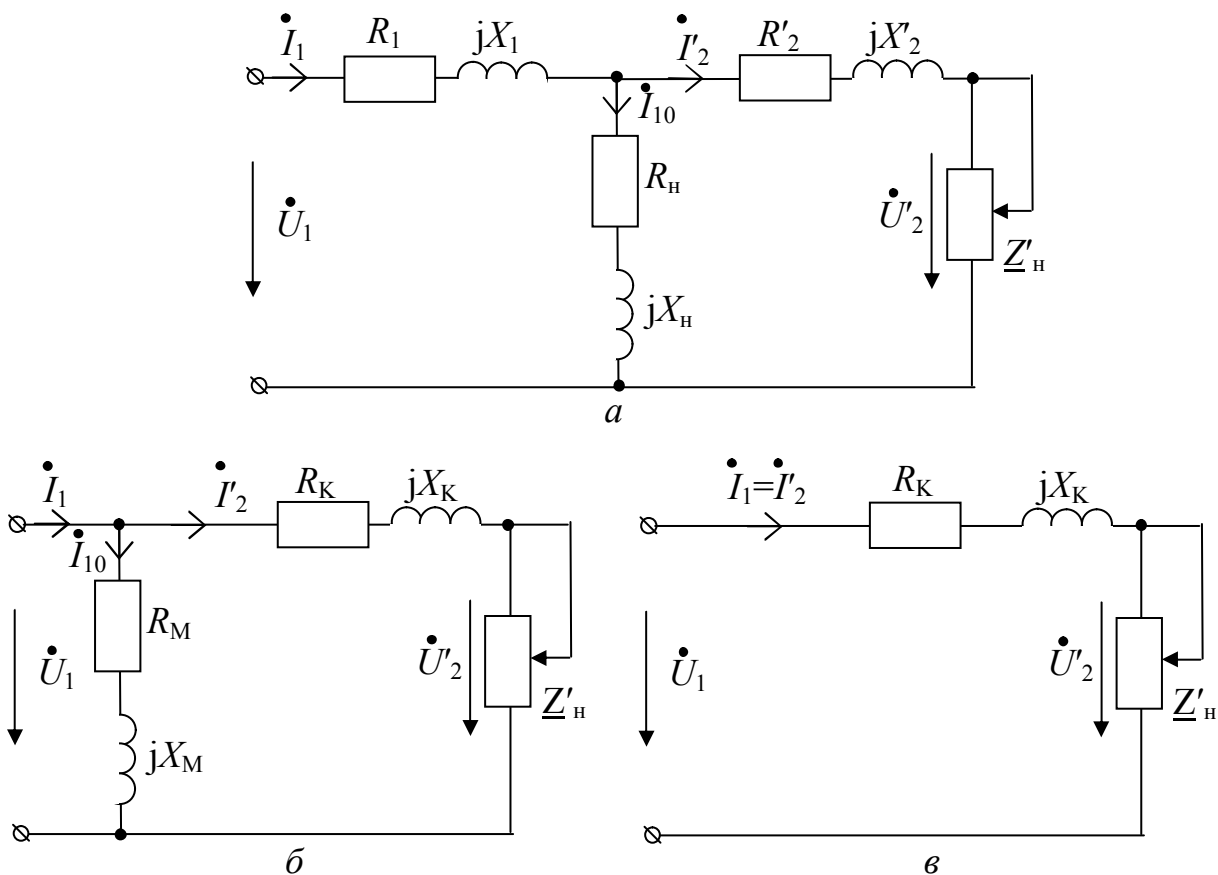


Рис.9.4 - Схеми заміщення однофазного трансформатора:
а - Т-подібна, б - Г-подібна, в - режиму к.з.

9.3. Паспортні дані й зовнішня характеристика трансформатора

9.3.1. Основні параметри. У процесі перетворення напруги в трансформаторі виникають втрати електричної енергії в обмотках і магнітопроводі, викликані нагріванням. Тривалий перегрів обмоток може викликати старіння і руйнування ізоляції, тому для забезпечення тривалої роботи силового трансформатора заводом-виготовником задаються показники, що називаються **паспортними даними**: повна потужність S_n , коефіцієнт трансформації n , напруги U_{1n} і U_{2n} , напруга короткого замикання $U_{кз}$, струми I_{1n} , I_{2n} і струм холостого ходу I_{10n} , частота f_n , втрати в сталі магнітопроводу ΔP_{0n} і в обмотках ΔP_{mn} та ін. У процесі тривалої експлуатації властивості ізоляції погіршуються, зростають втрати енергії. Тому періодично перевіряють основні дані трансформатора, до яких належать $U_{кн}$ й I_{10n} , що ха-

рактризують втрати енергії в обмотках, ізоляції і сталі магнітопроводу. Для цього проводять два досліді: дослід холостого ходу і дослід короткого замикання. На підставі цих дослідів визначають також параметри схем заміщення.

9.3.2. Дослід холостого ходу. Схема включення вимірювальних приладів при досліді холостого ходу подана на рис. 9.5,а. У процесі досліді вимірюють: U_1, U_2, I_{10}, P_0 при зміні U_1 від 0 до $U_{1н}$. При $U_1 = U_{1н}$ визначають: втрати в сталі магнітопроводу $\Delta P_{0н}$, коефіцієнт трансформації $n = U_1/U_2$, струм холостого ходу $I_{10н}$. Отримані дані дозволяють розрахувати параметри схеми заміщення:

$$R_M = \frac{\Delta P_{0н}}{I_{10н}^2}; \quad Z_M = \frac{U_{1н}}{I_{10н}}; \quad X_M = \sqrt{Z_M^2 - R_M^2}; \quad \cos \varphi_{0н} = \frac{\Delta P_{0н}}{I_{10н} U_{1н}}. \quad (9.8)$$

При розрахунку передбачається, що втрати в обмотці невеликі, тому що $I_{10н}$ становить 5 - 10% від $I_{1н}$.

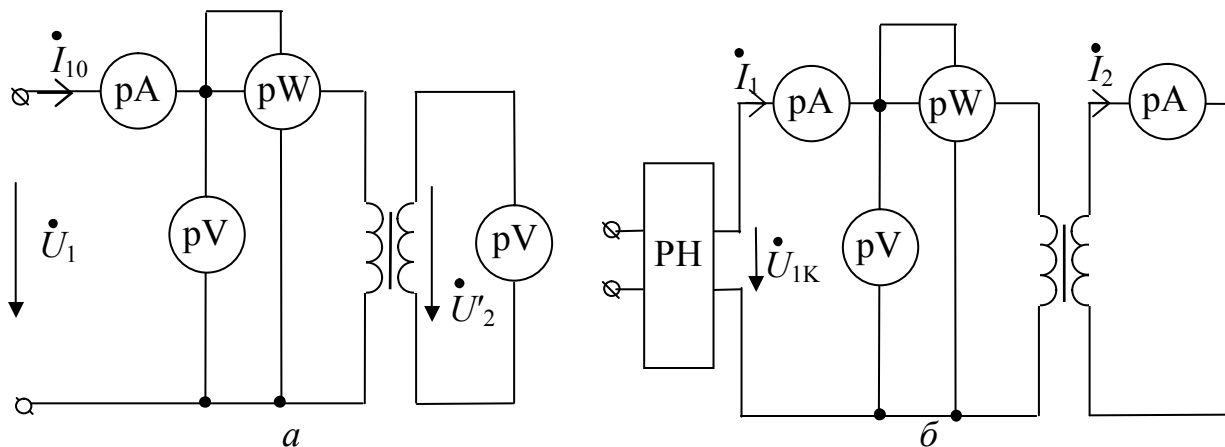


Рис.9.5 - Схеми дослідів холостого ходу (а) і короткого замикання (б)

9.3.3. Дослід короткого замикання. При досліді короткого замикання (рис. 9.5,б) вторинна обмотка трансформатора замкнута накоротко, а первинна обмотка включається через регулятор напруги РН на таку знижену напругу $U_{1к}$ при якій в обмотках трансформатора протікають номінальні струми. Цю напругу називають **напругою короткого замикання**. У досліді вимірюють $I_1, I_2, U_1 = U_{1к}$ і P_2 при зміні струму I_1 від 0 до $I_{1н}$. При $I_1 = I_{1н}$, визначають втрати короткого замикання $\Delta P_{кн}$, напругу короткого замикання $U_{кн}$.

За даними досліді короткого замикання розраховують параметри схеми заміщення:

$$R_K = \frac{\Delta P_{кн}}{I_{1н}^2}; \quad Z_K = \frac{U_{кн}}{I_{1н}}; \quad X_K = \sqrt{Z_K^2 - R_K^2}; \quad \cos \varphi_K = \frac{R_K}{Z_K}, \quad (9.9)$$

де $R_K = R_1 + R_2'$ й $X_K = X_1 + X_2'$ - активний і індуктивний опори короткого замикання трансформатора.

При розрахунку припускають, що при малій напрузі магнітний потік і намагнічуючий струм малі, тобто $I_{10} \approx 0$. Тому можна вважати, що магніторухливі сили первинної і вторинної обмоток трансформатора рівні

$$w_1 I_1 = w_2 I_2 \text{ або } I_1 = I_2' \quad (9.10)$$

і, отже, ватметр вимірює втрати потужності тільки в обмотках.

Напругу короткого замикання і її активну й реактивну складові виражають звичайно у відсотках:

$$U_{K\%} = \frac{U_{KH}}{U_{1H}} 100\% . \quad (9.11)$$

За значенням U_K можна розрахувати струм короткого замикання I_K при аварійному режимі:

$$I_{1K} = \frac{U_{1H}}{Z_K} = I_{1H} \frac{U_{1H}}{U_{KH}} = I_{1H} \frac{100}{U_{K\%}} . \quad (9.12)$$

9.3.4. Зовнішня характеристика трансформатора. Робочі властивості трансформатора характеризують залежністю напруги на навантаженні U_2 і ККД η від струму I_2 . Залежність $U_2(I_2)$ при різному характері навантаження (активному, реактивному, ємнісному) називають *зовнішньою характеристикою трансформатора*.

Зовнішня характеристика трансформатора $U_2(I_2)$ і залежність $\eta(I_2)$ можуть бути отримані дослідним шляхом або розраховані за еквівалентною схемою заміщення. В останньому випадку рівняння електричного стану, отримане з Г-подібної схеми заміщення (рис. 9.4,б), має вигляд

$$\dot{U}_2' = \dot{U}_1 - (R_K + jX_K) \dot{I}_2' . \quad (9.13)$$

Вигляд залежності $U_2(I_2)$ визначається характером навантаження. Так, при ємнісному навантаженні ($\cos\varphi < 0$) із зростанням струму I_2 напруга U_2 підвищується, а при індуктивному ($\cos\varphi > 0$) - падає (рис. 9.6).

Коефіцієнт корисної дії трансформатора η дорівнює відношенню корисної активної потужності P_2 до всієї активної потужності, що надходить з мережі:

$$\eta = \frac{P_2}{P_1} = \frac{P_2}{P_2 + \Delta P_C + \Delta P_M} , \quad (9.14)$$

де ΔP_C - втрати потужності в сталі магнітопровода; ΔP_M - втрати потужності в міді обмоток.

Корисна потужність трансформатора виражається залежністю

$$P_2 = U_2 I_2 \cos\varphi_2 = \beta \cdot S_H \cos\varphi_2 , \quad (9.15)$$

де S_H - повна потужність трансформатора, ВА; $\beta = I_2/I_{2H}$ - коефіцієнт навантаження.

Втрати в сталі ΔP_C не залежать від навантаження і дорівнюють втратам холостого ходу. Втрати в обмотках ΔP_M пропорційні квадрату струму

$$\Delta P_M = R_K I_2^2 = R_K I_H^2 \beta^2 = \Delta P_{MH} \beta^2 ,$$

де R_K - активний опір обмотки.

Після підстановки вираз для ККД матиме вигляд

$$\eta = \frac{\beta \cdot S_H \cos\varphi_2}{\beta \cdot S_H \cos\varphi_2 + \Delta P_C + \Delta P_{MH} \beta^2} . \quad (9.16)$$

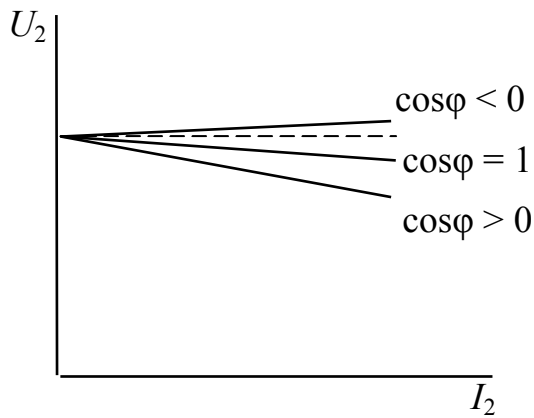


Рис.9.6 - Залежність $U_2(I_2)$ при різному характері навантаження

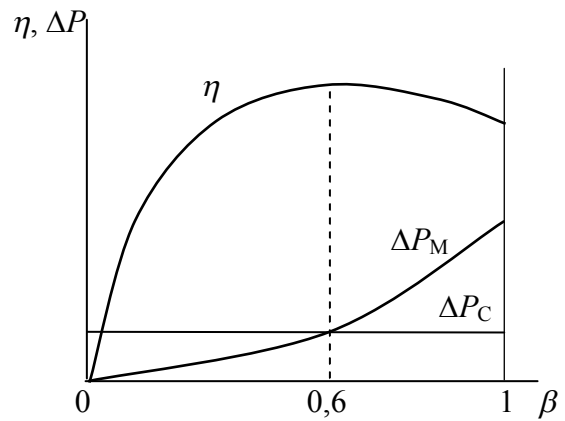


Рис.9.7 - Залежності ΔP_C і η від коефіцієнта навантаження β

Залежності, ΔP_C і η від коефіцієнта навантаження β представлені на рис. 9.7. Залежність $\eta(\beta)$ має максимум. За допомогою підбору параметрів обмоток і магнітопроводу для силових трансформаторів вибирають η_{\max} при $\beta = 0,6 - 0,7$.

9.4. Трифазні трансформатори

Для трифазних трансформаторів еквівалентні схеми заміщення зображують для однієї фази, вони мають такий же вид, як і для однофазного трансформатора.

Конструктивно трифазні трансформатори виконують стрижньовими (рис. 9.8). На кожному з трьох стрижнів розміщують первинну і вторинну обмотки однієї фази. Результуючі магніторушійні сили кожної фази зміщені одна до одної на 120° , сума векторів магнітних потоків дорівнює нулю ($\dot{\Phi}_A + \dot{\Phi}_B + \dot{\Phi}_C = 0$). Фази первинної і вторинної обмоток можуть з'єднуватися в «зірку» (Y) і «трикутник» (Δ). Тому вектори лінійних напруг \dot{U}_1 і \dot{U}_2 можуть не збігатися за фазою. Зрушення за фазою вказується групою з'єднання обмоток. Так, на схемі рис. 9.9,а показана група з'єднання Y/Y - 0, де 0 вказує на збіг фази A вторинної обмотки з фазою A первинної. На рис. 9.9,б показана схема з'єднання Y/ Δ - 11, де 11 вказує, що вектор напруги \dot{U}_{AB} первинної обмотки випереджає за фазою \dot{U}_{ab} вторинної обмотки на 30° і збігається з положенням годинникової стрілки на цифрі 11.

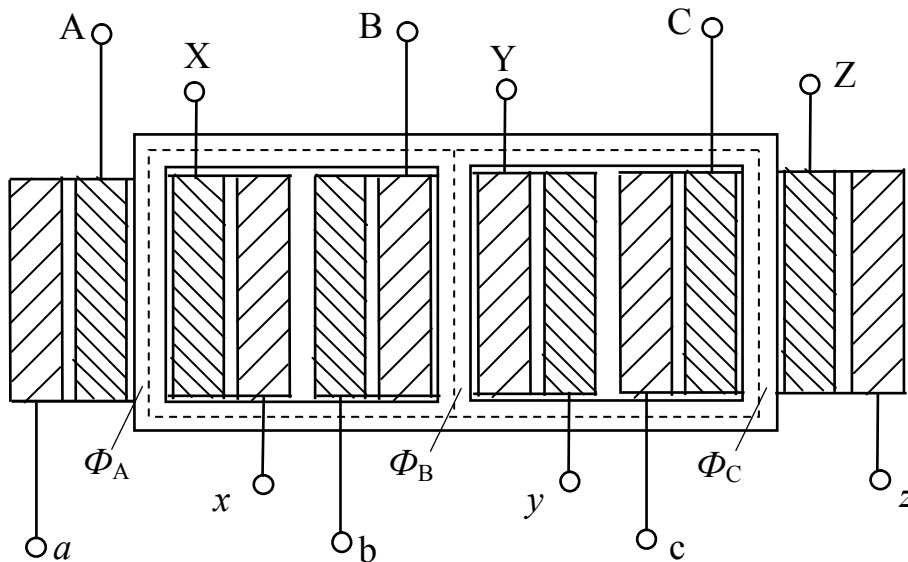


Рис.9.8 - Будова трифазного трансформатора

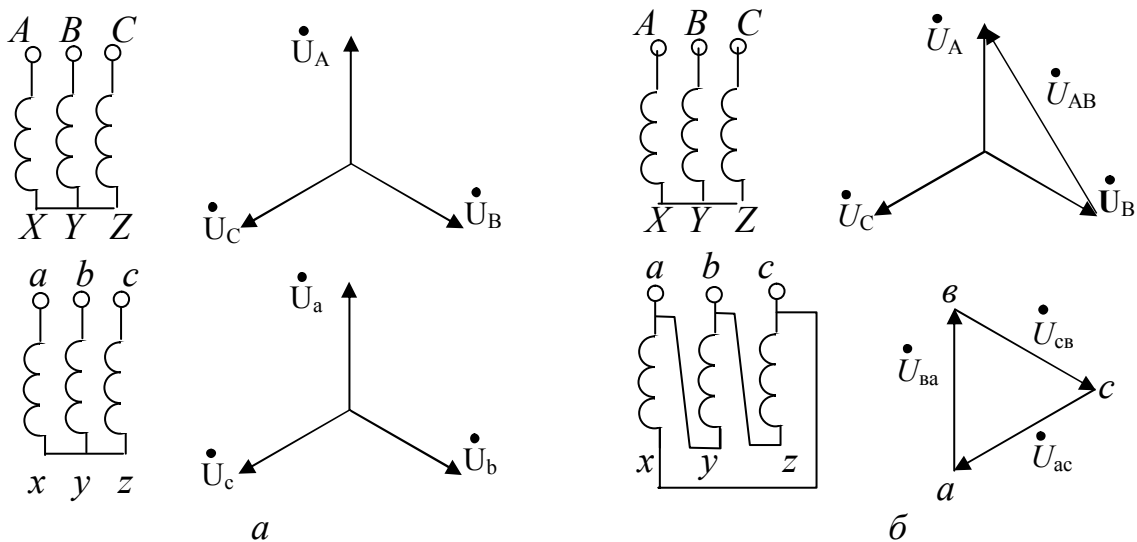


Рис.9.9 - Схеми з'єднання обмоток трифазних трансформаторів

9.5. Автотрансформатори

Автотрансформатор у конструктивному відношенні подібний до звичайного трансформатора: має замкнутий сталевий магнітопровід, на якому розміщені дві обмотки, виконані з мідного проводу різних перерізів. На відміну від трансформатора обмотки автотрансформатора електрично з'єднані.

У понижувального автотрансформатора обмотка вторинної напруги є частиною обмотки первинної напруги. У підвищувального, навпаки, обмотка первинної напруги є частиною обмотки вторинної напруги. Таким чином, в автотрансформаторі крім магнітного зв'язку між первинною й вторинною обмотками є ще електричний зв'язок.

Електричні схеми понижувального і підвищувального автотрансформаторів подані на рис. 9.10. Напруга джерела, прикладена до затискачів первинної обмотки AX із числом витків w_1 , урівноважується в основному ЕРС E_1 , створюю-

ваною змінним магнітним потоком у магнітопроводі. Вторинна обмотка має число витків w_2 . У ній створюється ЕРС $E_2 = E_1(w_1/w_2)$.

Коефіцієнт трансформації дорівнює відношенню первинної і вторинної напруг:

$$n = U_1/U_2 = w_1/w_2 . \quad (9.17)$$

При підключенні до затискачів ax навантаження Z_H струм у загальній частині обмотки ax I_{12} буде дорівнювати геометричній сумі струмів первинного і вторинного кіл $\dot{I}_{12} = \dot{I}_1 + \dot{I}_2$.

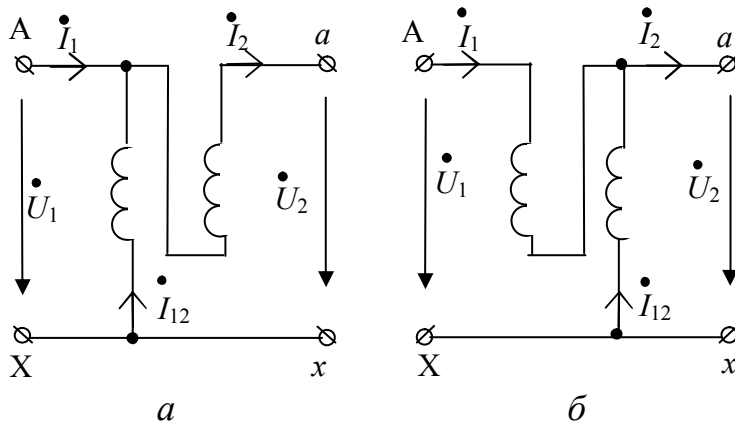


Рис.9.10 - Схеми автотрансформаторів:
 а -підвищувального, б - понижувального

Потужність, споживана автотрансформатором з мережі, без урахування втрат буде дорівнювати потужності, що виділяється у навантаженні, тобто $U_1 I_1 = U_2 I_2$, звідки випливає

$$I_1/I_2 = U_1/U_2 = n.$$

При цьому так само, як і у звичайному трансформаторі основний магнітний потік Φ_{0m} залишається незмінним при незмінній напрузі \dot{U}_1 .

Якщо знехтувати струмом холостого ходу, то можна вважати, що струми I_1 і I_2 зрушені за фазою на 180° і їхня геометрична сума дорівнює алгебраїчній сумі, тобто

$$I_{12} = I_2 - I_1 = I_2 [(1 - (1/n))] . \quad (9.18)$$

Перевагою автотрансформатора перед трансформатором є простіша конструкція, менша витрата міді, більш високий ККД, менші втрати в обмотках і сталі магнітопроводу.

Однак автотрансформатор у порівнянні з трансформатором має й істотні недоліки: малий опір короткого замикання, що спричиняє великий струм короткого замикання, а електричний зв'язок між обмотками при високій первинній напрузі небезпечний при дотику людини до проводів у колі навантаження.

Трифазні автотрансформатори застосовують в електроенергетиці для зв'язку мереж змішаних напруг, наприклад 110 і 220, 220 і 500 кВ та ін., при пуску асинхронних трифазних електродвигунів з метою зменшення пускового струму.

Автотрансформатори низької напруги виконують на невелику потужність (до 7,5 кВА). Вони мають, як правило, обмотку з одним перерізом проводу і можуть використовуватися як для підвищення, так і зниження напруги.

9.6. Вимірювальні трансформатори

Вимірювальні трансформатори застосовують для вимірювань напруг і струмів. Вимірювальні трансформатори напруги використовують для включення вольтметрів, частотомірів, обмоток напруги ватметрів і лічильників. Вимірювальні трансформатори струму призначені для підключення амперметрів, реле, струмових обмоток ватметрів і лічильників.

На рис. 9.11 показано схему включення вимірювальних приладів через вимірювальні трансформатори до однофазної мережі. Для безпеки дотику до приладів один затискач вторинних обмоток трансформаторів заземлюють. Вимірювані напруга U_1 і струм I_1 :

$$U_1 = n_U \cdot U_2, \quad I_1 = n_I,$$

де n_U і n_I - коефіцієнти трансформації трансформаторів напруги й струму відповідно, U_2 і I_2 - показання вольтметра і амперметра відповідно.

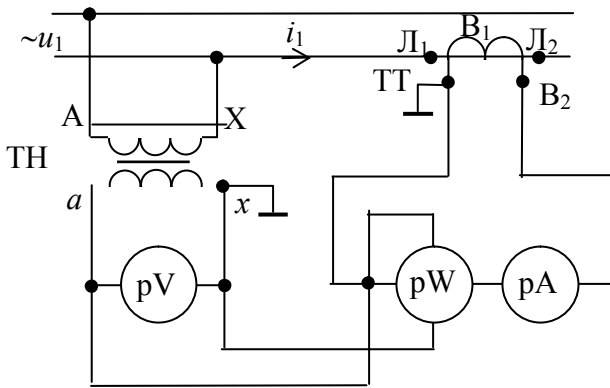


Рис.9.11 - Схеми включення трансформатора напруги й струму

Вторинні обмотки мають стандартні значення U_2 і I_2 : 100 В для трансформаторів напруги й 5 і 1 А для трансформаторів струму. Тому діапазон вимірювання може бути розширений шляхом регулювання коефіцієнтів трансформації (співвідношення числа витків).

Вимірювальний трансформатор напруги працює в режимі, близькому до холостого ходу. Очевидно, точність вимірювання напруги буде тим вища, чим менше падіння напруги на

трансформаторі. Дійсно, із схеми заміщення (рис. 9.4) видно, що похибка

$$\delta_U = \frac{U_2 w_2 / w_1 - U_1}{U_1} 100$$

тим менша, чим менші R_K і X_K , що досягається зниженням числа витків при збільшенні перерізу сталі магнітопроводу.

У трансформаторах струму, навпаки, зменшення похибки досягається шляхом зниження струму I_{10} , для чого використовують стрічковий магнітопровід кільцевої форми з матеріалу з малими втратами (мале значення коерцитивної сили H_C) і роботі в ненасиченій частині кривої намагнічування.

Оскільки нормальним режимом роботи трансформатора струму є режим короткого замикання, то для перемикачів у вторинному колі встановлюють пристрої, що замикають вихідні затискачі вторинної обмотки.

Контрольні запитання з теми 9

1. Поясніть призначення і принцип дії трансформатора.
2. Чому магнітопровід трансформатора виконують з електротехнічної а не із звичайної сталі, і збирають з окремих тонких, ізольованих один від одного листів?
3. Як розташовують обмотки трансформатора на осерді магнітопроводу?
4. Що називають коефіцієнтом трансформації трансформатора, як його визначити?
5. З якою метою наводиться електрична схема заміщення трансформатора?
6. З якою метою проводять досліди холостого ходу й короткого замикання трансформатора?

7. Які дані трансформатора називають паспортними?
8. Порівняйте векторні діаграми Т- і Г-подібної схем заміщення трансформатора; складіть за ними рівняння електричного стану.
9. Як з'єднують обмотки трифазних трансформаторів?
10. Які переваги й недоліки автотрансформаторів у порівнянні з трансформаторами?

Задачі до теми 9 і приклади їхнього розв'язання

Задача 9.1. Визначити коефіцієнт трансформації n трансформатора, число витків w_1 первинної обмотки при числі витків вторинної обмотки w_2 , а також номінальні струми $I_{1ном}$ і $I_{2ном}$ в обмотках однофазного трансформатора з номінальною потужністю $S_{1ном}$, підключеного до живильної мережі з напругою $U_{1ном} = 127$ В, напруга на затискачах вторинної обмотки при холостому ході U_{20} . Вихідні дані для розрахунку наведені в табл. 9.1.

Таблиця 9.1

Параметр	Варіант завдання											
	К	0	1	2	3	4	5	6	7	8	9	
w_2 , витків	40	50	60	70	80	80	70	60	60	40	50	
$S_{1ном}$, кВА	3	3,6	4	6	10	5	6,6	6	4,4	3,8	4,2	
$U_{1ном}$, В	127	127	220	220	220	127	220	220	127	127	127	
U_{20} , В	60	100	40	60	80	40	40	60	50	40	40	

Розв'язання задачі для варіанта К.

Коефіцієнт трансформації трансформатора

$$n = \frac{w_1}{w_2} = \frac{E_1}{E_2} = \frac{U_1}{U_{20}} = \frac{127}{60} = 2,11 .$$

Оскільки $U_{20} = E_2$, при холостому ході трансформатора падіння напруги на первинній обмотці незначне, тому приблизно $U_1 \cong E_1$. Число витків первинної обмотки:

$$w_1 = n \cdot w_2 = 2,11 \cdot 40 = 84,4 .$$

Номінальний струм первинної обмотки (вважаючи повні потужності обмоток $S_1 \cong S_2$):

$$I_{1ном} = \frac{S_{1ном}}{U_{1ном}} = \frac{3 \cdot 1000}{127} = 23,6 \text{ А.}$$

Номінальний струм вторинної обмотки трансформатора (з врахуванням $U_{2ном} = U_{20}$)

$$I_{2ном} = \frac{S_{1ном}}{U_{20}} = \frac{3000}{60} = 50 \text{ А.}$$

Задача 9.2. Визначити коефіцієнт трансформації n трифазного трансформатора і номінальні діючі значення первинної й вторинної напруги фазні $U_{1ф.ном}$, $U_{2ф.ном}$ і лінійні $U_{2л.ном}$, при з'єднанні обмоток за схемами «зірка – зірка» і «зірка – трикутник». Первинна обмотка має число витків на фазу w_1 , вторинна – w_2 . Номінальна лінійна напруга первинної обмотки $U_{1л.ном}$. Вихідні дані для розрахунку наведені в табл. 9.2.

Таблиця 9.2

Параметр	Варіант завдання										
	К	0	1	2	3	4	5	6	7	8	9
w_1 , витків	2002	1980	1200	1600	1400	2300	2000	1900	1800	1700	1980
w_2 , витків	134	126	100	106	94	140	130	127	120	112	126
$U_{1л.ном}$, В	6000	6000	3300	3300	3300	10000	10000	6000	6000	6000	6000

Розв'язання задачі для варіанта К.

Коефіцієнт трансформації фазних напруг

$$n = \frac{w_1}{w_2} = \frac{2002}{134} = 15.$$

Номінальна первинна фазна напруга трансформатора

$$U_{1ф.ном} = \frac{U_{1л.ном}}{\sqrt{3}} = \frac{6000}{1,73} = 3470 \text{ В.}$$

Номінальні вторинні напруги при з'єднанні обмоток трансформатора за схемою «зірка - зірка»:

$$\text{лінійна } U_{2л.ном} = U_{1л.ном} / n = 6000 / 15 = 400 \text{ В;}$$

$$\text{фазна } U_{2ф.ном} = U_{2л.ном} / \sqrt{3} = 400 / 1,73 = 230 \text{ В.}$$

Коефіцієнти трансформації трансформатора при з'єднанні обмоток за схемою «зірка - зірка»:

$$\text{лінійний } n_{Yл} = U_{1л.ном} / U_{2л.ном} = 6000 / 400 = 15;$$

$$\text{фазний } n_{Yф} = U_{1ф.ном} / U_{2ф.ном} = 3479 / 230 = 15.$$

Коефіцієнти трансформації трансформатора при з'єднанні обмоток за схемою «зірка - трикутник»:

$$\text{лінійний } n_{\Delta л} = U_{1л.ном} / U_{2л.ном} = 6000 / 230 = 26;$$

$$\text{фазний } n_{\Delta ф} = U_{1ф.ном} / U_{2ф.ном} = 3479 / 230 = 15.$$

Задача 9.3. Трифазний трансформатор має потужність $S_{ном}$, номінальні напруги первинної і вторинної обмоток $U_{1.ном}$, $U_{2.ном}$ при частоті мережі $f=50$ Гц. Втрати холостого ходу при номінальній напрузі $P_{xx} = 180$ Вт, втрати короткого замикання $P_{кз} = 1000$ Вт. Визначити ККД трансформатора при заданих $\cos\varphi_2$ і коефіцієнті навантаження β , що змінюється в діапазоні від 0,4 до 1. Побудувати залежність ККД від коефіцієнта навантаження. Вихідні дані для розрахунку наведені в табл. 9.3.

Таблиця 9.3

Параметр	Варіант завдання										
	К	0	1	2	3	4	5	6	7	8	9
$S_{НОМ}$, кВа	40	63	25	100	100	160	160	250	250	400	400
$U_{1л.НОМ}$, кВ	10	10	10	10	10	10	10	10	10	10	10
$U_{2л.НОМ}$, кВ	0,4	0,4	0,4	0,4	0,4	0,4	0,4	0,4	0,4	0,4	0,4
$P_{ХХ}$, кВт	0,18	0,24	0,14	0,49	0,49	0,73	0,73	1,05	1,05	1,45	1,45
$P_{КЗ}$, кВт	1,0	1,4	0,8	1,97	1,97	2,65	2,65	3,7	3,7	5,5	5,5
$\cos\varphi_2$	0,9	0,8	0,84	0,74	0,86	0,76	0,88	0,73	0,87	0,68	0,84

Розв'язання задачі для варіанта К.

Для визначення ККД трансформатора скористаємося співвідношенням (9.16). ККД при коефіцієнті навантаження $\beta = 1,0$

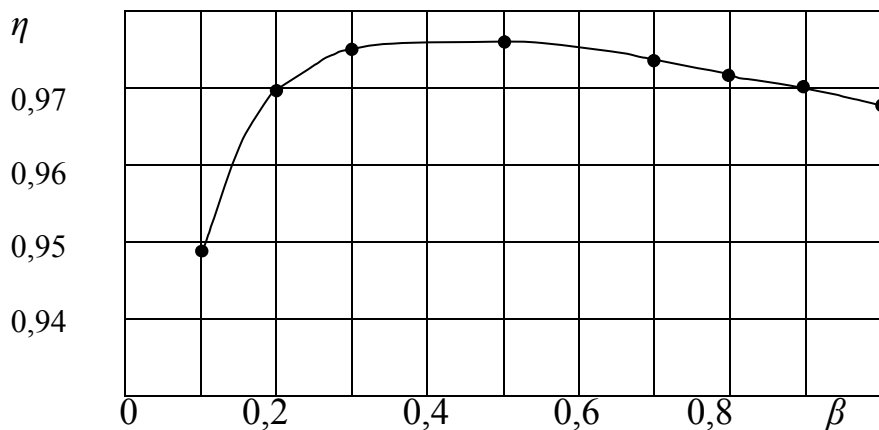
$$\eta = \frac{\beta \cdot S_H \cdot \cos\varphi_2}{\beta \cdot S_H \cdot \cos\varphi_2 + \Delta P_C + \Delta P_{MH} \cdot \beta^2} = \frac{\beta \cdot S_H \cdot \cos\varphi_2}{\beta \cdot S_H \cdot \cos\varphi_2 + P_{ХХ} + P_{КЗ} \cdot \beta^2} =$$

$$= \frac{1,0 \cdot 40 \cdot 0,9}{1,0 \cdot 40 \cdot 0,9 + 0,18 + 1 \cdot 1^2} = 0,968.$$

Результати розрахунку для інших значень коефіцієнта навантаження приведені в табл.9.4. На рис.9.12 побудована залежність ККД від коефіцієнта навантаження трансформатора.

Таблиця 9.4

β	0,1	0,2	0,3	0,5	0,7	0,8	0,9	1,0
η	0,949	0,970	0,975	0,976	0,974	0,972	0,970	0,968

Рис.9.12 - Розрахункова залежність ККД від β

ЕЛЕКТРИЧНІ МАШИНИ

ТЕМА 10 ЕЛЕКТРИЧНІ МАШИНИ ПОСТІЙНОГО СТРУМУ

Ключові поняття: номінальні параметри, зовнішня характеристика, характеристика холостого ходу, швидкісна характеристика, механічна характеристика.

Необхідність використання машин постійного струму (МПС), як генераторів так і двигунів, в електротягових і піднімальних пристроях, в електроприводі з широким діапазоном регулювання швидкості обумовлена рядом їхніх особливостей. У будівництві машини постійного струму використовують в електрозварювальних установках, в електроприводі баштових кранів та ін.

10.1. Будова машини постійного струму

Конструктивно генератор і електродвигун постійного струму виконуються однаково і складаються з двох основних частин: нерухомого електромагніта - індуктора, що створює основне магнітне поле машини, і обертового якоря.

Нерухомий індуктор складається (рис. 10.1,а) із сталеві литої станини 1, головних 2 і додаткових 3 полюсів. На головних полюсах розміщують обмотки збудження, до яких підводять постійний струм, що створює в магнітному колі машини основне магнітне поле (полюс - повітряний зазор - якір - повітряний зазор - полюс - станина - полюс).

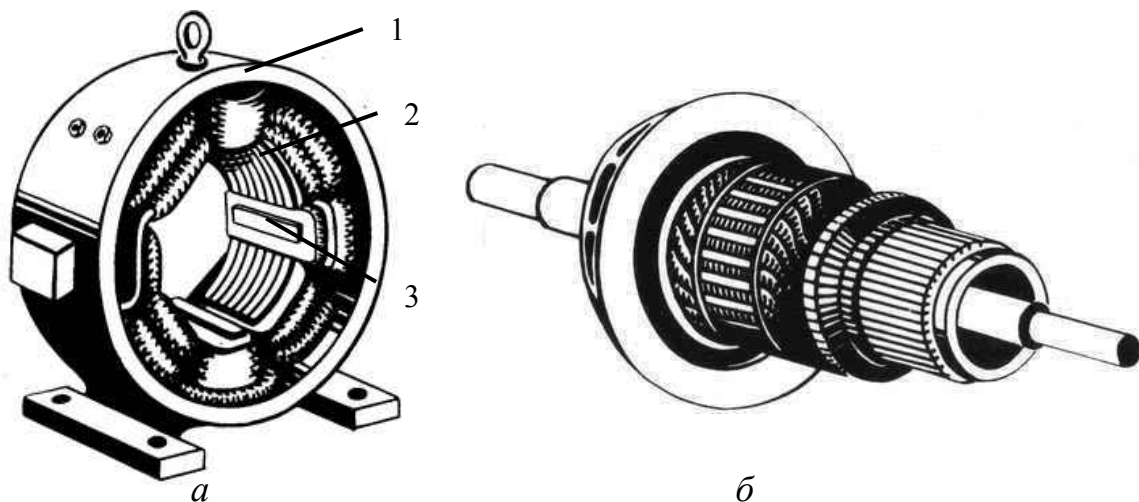


Рис.10.1 - Індуктор (а) і якір (б) машини постійного струму

Головні полюси набирають з лакованих листів електротехнічної сталі товщиною 0,5 мм для зменшення втрат від вихрових струмів, що виникають через пульсацію магнітного поля при обертанні якоря. Додаткові полюси виконують звичайно з кованої сталі, а їхню обмотку збудження включають послідовно з обмоткою якоря. Додаткове магнітне поле, створюване ними, служить для поліпшення комутації.

Обертова частина машини постійного струму - якір з обмотками і колектором (рис. 10.1,б). Осердя якоря набирають з пластин електротехнічної сталі. На зовнішній поверхні якоря є пази, у які укладають замкнуту обмотку. Обмотку якоря виконують з мідного ізолюваного проводу у вигляді секцій. Секції обмотки укладають в пази у два шари (двошарова обмотка), ізолюють і закріплюють в них дерев'яними клинами, а частини обмотки, що виходять по торцях якоря з пазів, кріплять сталевими дротовими бандажами, щоб запобігти вириванню обмотки з пазів при обертанні якоря. Секції обмотки з'єднують між собою і з колекторними пластинами й утворюють замкнуту обмотку з певним числом паралельних гілок. Кількість гілок визначається типом обмотки.

Розрізняють паралельні (петльові) і послідовні (хвильові) обмотки. Петльові (рис. 10.2,а) мають число паралельних гілок, яке дорівнює числу пар полюсів машини, а хвильові (рис. 10.2,б) утворюють одну пару паралельних гілок. Простота і надійність послідовної обмотки обумовлюють її велике поширення в машинах загального застосування.

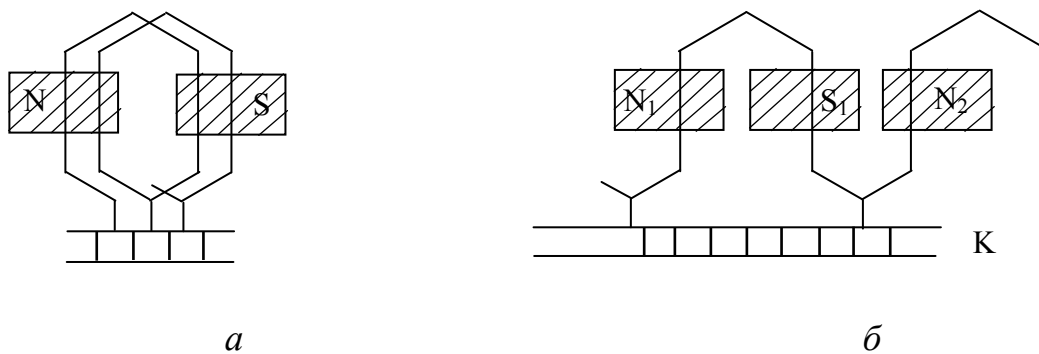


Рис.10.2 - Види обмоток МПС

Колектор (рис. 10.3), до якого приєднують обмотку якоря, складається з окремих мідних пластин 1, ізолюваних одна від одної і від вала прокладками з міканіту 2 (ізоляційний матеріал на основі слюди).

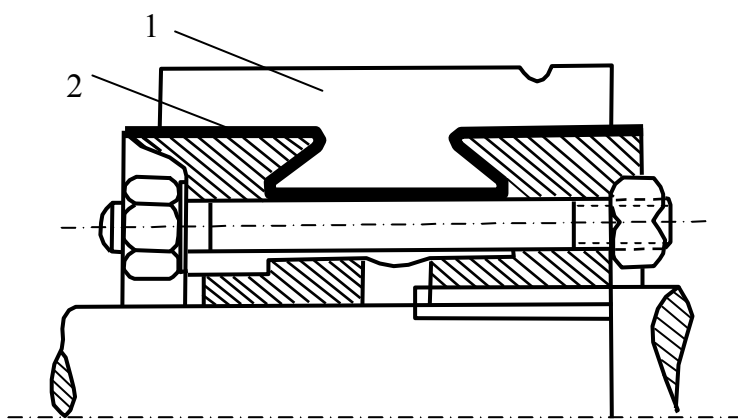


Рис.10.3 - Будова колектора МПС

Колектор призначений для випрямлення змінного струму якоря для зовнішнього кола у генераторів; у двигунів - для зміни напрямку струму в провідниках обмотки якоря при його обертанні. З однієї сторони до пластин колектора припаюють секції обмотки якоря. По колектору ковзають нерухомі щітки, які закріплюють у спеціальних щіткотримачах.

Будова МПС у зібраному вигляді показана на рис.10.4. До станини 6 болтами кріплять головні полюси, що складаються з осердя 4 і котушки обмотки збудження 5. З торцевих сторін до станини кріплять бічні щити 7 з підшипниками, що утримують вал машини. Якір машини складається з осердя 3, обмотки

9 і колектора 1. На валу якоря укріплений вентилятор 8, на колекторі розташовані нерухомі щітки 2.

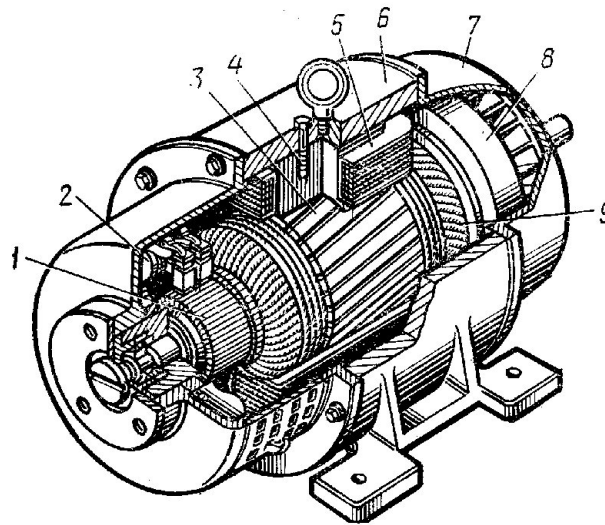


Рис.10.4 - Будова машини постійного струму

10.2. Принцип дії генератора постійного струму

У генераторі постійного струму відбувається перетворення механічної енергії, що підводиться від первинного двигуна, на електричну, яка знімається з обмотки якоря за допомогою колектора й щіток. До щіток генератора приєднуються споживачі електричної енергії.

Дія генератора основана на явищі електромагнітної індукції (див. п.4.2.2). ЕРС обмотки якоря E машини постійного струму визначається конструкцією машини, швидкістю обертання якоря і величиною магнітного потоку, створюваного системою збудження:

$$E = \frac{N}{\alpha} \frac{pn}{60} \Phi = cn\Phi, \text{ В}, \quad (10.1)$$

де $c = \frac{N}{\alpha} \frac{pn}{60}$ - конструктивна постійна машини, що залежить від типу обмотки якоря і числа пар полюсів; N - загальне число провідників якоря; α - число пар паралельних гілок обмотки якоря; p - число пар полюсів; n - швидкість обертання, об/хв; Φ - магнітний потік пари полюсів машини, Вб.

Таким чином, ЕРС якоря прямо пропорційна швидкості обертання машини і магнітному потоку. Звичайно швидкість обертання якоря теж є постійною величиною, тому регулювання величини ЕРС, а отже, і напруги генератора одержують зміною магнітного потоку шляхом регулювання струму в обмотках збудження полюсів. Якщо зовнішнє коло генератора розімкнуте (режим холостого ходу), то напруга на затискачах машини дорівнює ЕРС $U_0 = E$. Якщо генератор навантажений, то по обмотці якоря протікає струм, і напруга на затискачах машини стає меншою за ЕРС на величину падіння напруги на опорі в колі якоря:

$$U = E - I_{\text{я}} R_{\text{я}}, \quad (10.2)$$

де $R_{\text{я}}$ - сумарний опір кола якоря.

10.3. Втрати енергії і ККД

Процеси перетворення механічної енергії на електричну і навпаки, що відбуваються в машині постійного струму, супроводжуються втратами енергії. Ці втрати підрозділяють на електричні, магнітні, механічні і додаткові. До електричних втрат відносять втрати в обмотках якоря і збудження, а також втрати в щітковому контакті.

Втрати в обмотці якоря і в послідовній обмотці збудження пропорційні квадрату струму і дорівнюють $I^2 \cdot R$ (R - опір якорного кола машини). Електричні втрати в щіткових контактах визначають, виходячи із струму якорного кола і падіння напруги під щітками однієї полярності:

$$\Delta P_{щ} = 2\Delta U_{щ} I_{я} . \quad (10.3)$$

Електричні втрати в опорах якорного кола, включаючи щітковий контакт, становлять приблизно 50% всіх втрат енергії у машині.

Втрати енергії в обмотці збудження машин з незалежним, паралельним і змішаним збудженням прийнято визначати через потужність, що поглинається цією обмоткою $\Delta P_{зб} = U_{зб} \cdot I_{зб}$. Вони становлять 0,5 - 7% від номінальної потужності машини, причому менший відсоток втрат належить до більш потужних машин. Сумарні електричні втрати в машині постійного струму

$$\Delta P_E = I_{я}^2 R_{я} + I_{я}^2 R_{зб.} + I_{я}^2 R_{д.п.} + \Delta P_{щ} + \Delta P_{зб} , \quad (10.4)$$

де $R_{зб}$, $R_{д.п.}$, - опори послідовної обмотки збудження й обмотки додаткових полюсів.

У машинах постійного струму магнітний потік нерухомий у просторі і постійний у часі. Тому при обертанні перемагнічується тільки сталь якоря, в силу чого його осердя виконують набраним з листового матеріалу. Магнітні втрати в сталі якоря ΔP_c становлять менше 1 - 3% від номінальної потужності машини. До магнітних відносять також втрати в полюсних наконечниках, головних полюсах і в ярмі, обумовлені пульсаціями магнітного потоку, причиною яких є зубчаста конструкція якоря.

Механічні втрати $\Delta P_{мех}$, до яких відносять втрати від тертя в підшипниках, вентиляційні втрати і втрати на тертя щіток об колектор, залежать від частоти обертання якоря, і для машин потужністю 10 - 500 кВт становлять 0,5 - 2% від $P_{ном}$ (менший відсоток належить потужним машинам).

У машинах постійного струму є ще інші втрати, об'єднані в групу додаткових втрат $\Delta P_{дод}$. Вважають, що вони дорівнюють 0,01 $P_{ном}$.

Знаючи суму всіх втрат у машині

$$\Delta P_{\Sigma} = \Delta P_E + \Delta P_c + \Delta P_{мех} + \Delta P_{дод} , \quad (10.5)$$

можна визначити її ККД (у відсотках):

$$\text{для генераторів} \quad \eta = \left(1 - \frac{\Delta P_{\Sigma}}{P_2 + \Delta P_{\Sigma}} \right) 100 , \quad (10.6)$$

$$\text{для двигунів} \quad \eta = \left(1 - \frac{\Delta P_{\Sigma}}{P_1} \right) 100 , \quad (10.7)$$

де P_1 - потужність, яку підводять до двигуна; P_2 - корисна потужність, що віддається генератором.

Машини потужністю до 100 кВт мають ККД 75 - 90%, потужністю 500 ÷ 1000 кВт - 91 - 95%.

10.4. Схеми включення обмоток збудження

Залежно від схеми включення розрізняють МПС з незалежним, паралельним, послідовним і змішаним збудженням. У машинах з незалежним збудженням (рис. 10.5,а) обмотка збудження живиться від стороннього джерела електричного струму, безпосередньо не зв'язаного з якірними колами машини. У МПС паралельного збудження обмотка збудження з'єднана паралельно з колом якоря (рис. 10.5,б). При необхідності обмотку збудження цієї машини можна включити і за схемою з незалежним збудженням. У машинах послідовного збудження обмотка збудження з'єднана послідовно з колом якоря (рис. 10.5,в). Її виконують проводами великого перерізу з малою кількістю витків і малим опором. На головних полюсах машин змішаного збудження (рис. 10.5,г) є по дві котушки, одна з яких з'єднана з колом якоря послідовно, а друга - паралельно.

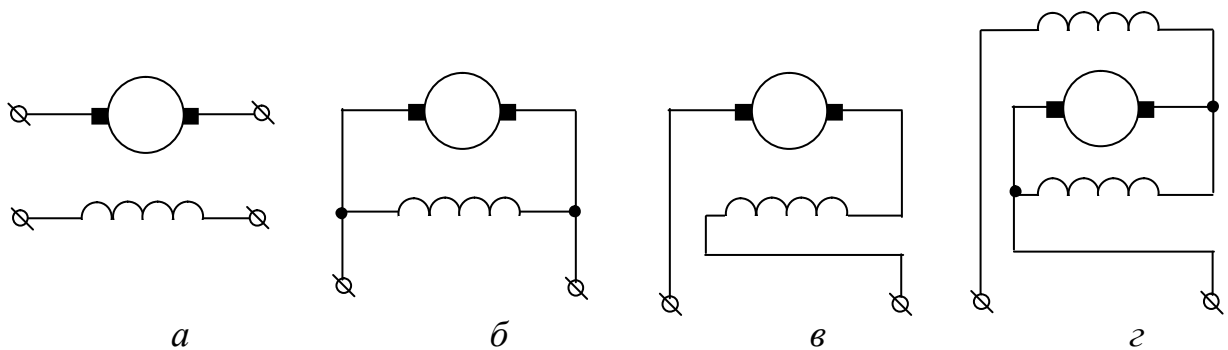


Рис. 10.5 - Схеми включення обмоток збудження машин:

а - з незалежним збудженням; б - паралельного збудження; в - послідовного збудження; г - змішаного збудження.

У МПС невеликої потужності (десятки - сотні ват) магнітне поле збудження створюється постійними магнітами.

10.5. Номінальні параметри і характеристики машин постійного струму

Номінальними параметрами електричних машин називають такі параметри, що характеризують номінальний режим роботи машини, тобто режим роботи при умовах, для яких вона призначена.

Під номінальною потужністю МПС розуміють:

а) у режимі генератора - електричну потужність, що віддається зовнішньому колу;

б) у режимі двигуна - корисну механічну потужність на валу.

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

Найбільший практичний інтерес для генераторів представляє залежність напруги на його затискачах U від струму навантаження $I_{\text{я}}$ при постійних швидкості обертання ω і струмі обмотки збудження $I_{\text{зб}}$ - $U = f(I_{\text{я}})$. Цю залежність називають зовнішньою характеристикою. Часто використовують характеристику холостого ходу, що являє собою залежність напруги U від струму збудження $I_{\text{зб}}$

при постійній швидкості обертання і розімкнутому зовнішньому колі. Оскільки при цьому напруга на генераторі дорівнює його ЕРС E , то характеристика холостого ходу є залежністю $E = f(I_{зб})$ при $\omega_{ном} = \text{const}$ і $I_{я} = 0$.

Для двигунів постійного струму найбільший інтерес становить залежність швидкості обертання ω від струму $I_{я}$ або від обертового моменту M при постійній нарузі живлення. Залежність $\omega = f(I_{я})$ називають швидкісною характеристикою, а залежність $\omega = f(M)$ - механічною характеристикою.

10.6. Електродвигуни постійного струму

10.6.1. Двигун постійного струму з незалежним збудженням. Схема включення двигуна постійного струму незалежного збудження подана на рис. 10.6. Якір двигуна M і його обмотка збудження отримують живлення від різних, незалежних один від одного джерел напруги U і $U_{зб}$, що дозволяє окремо регулювати напругу на якорі двигуна і на обмотці збудження й виконувати їх на різну номінальну напругу. Тільки при наявності мережі постійного струму обмотка збудження живиться від того ж джерела напруги, що і якір двигуна. Але й в цьому випадку струм збудження $I_{зб}$ не залежить від струму I якоря двигуна.

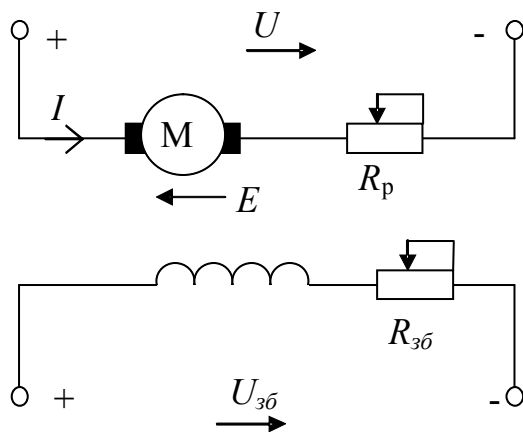


Рис.10.6 - Схема включення двигуна постійного струму незалежного збудження

З механіки відомо, що механічну потужність двигуна P можна виразити через обертовий момент і кутову швидкість:

$$P = \omega \cdot M, \quad (10.8)$$

де $\omega = \frac{2\pi \cdot n}{60}$ - кутова швидкість обертання якоря, рад/с; n - частота обертання, об/хв.

Тоді корисний обертовий момент двигуна M (Н·м), виражений через корисну потужність P , кВт, визначиться в такий спосіб

$$M = \frac{P}{\omega}. \quad (10.9)$$

Залежність між M і ω двигуна визначається його механічною характеристикою. Аналітичний вираз механічної характеристики двигуна може бути отриманий з

рівняння рівноваги напруг, складеного для якірного кола схеми (рис. 10.6). При сталому режимі роботи двигуна прикладена напруга U урівноважується падінням напруги в якірному колі $I \cdot R$ і наведеною в якорі ЕРС обертання E , тобто

$$U = I \cdot R + E, \quad (10.10)$$

де I - струм в якірному колі двигуна, А; R - сумарний опір якірного кола, Ом, що включає зовнішній опір резистора R_p і внутрішній опір якоря двигуна $R_{я}$.

ЕРС обертання визначається швидкістю обертання якоря і величиною магнітного потоку

$$E = k \cdot \Phi \cdot \omega, \quad (10.11)$$

де k - коефіцієнт, що залежить від конструктивних даних двигуна, $k = p \cdot N / 2\pi a$ (де p - число пар полюсів двигуна; N - число активних провідників обмотки якоря; a - число пар паралельних гілок обмотки якоря); Φ і ω - відповідно магнітний потік, Вб, і кутова швидкість двигуна, рад/с.

Якщо в (10.10) замість E підставити її значення з (10.11), то одержимо рівняння для швидкості двигуна

$$\omega = \frac{U - IR}{k\Phi}, \quad (10.12)$$

яке являє собою залежність швидкості двигуна від струму якоря. Таку залежність $\omega = f(I)$ називають *електромеханічною характеристикою двигуна*.

Для одержання рівняння механічної характеристики необхідно знайти залежність швидкості від моменту двигуна. Момент, що розвивається двигуном, зв'язаний із струмом якоря і магнітним потоком залежністю

$$M = k \cdot \Phi \cdot I. \quad (10.13)$$

Підставимо до (10.12) значення струму I , знайдене з (10.13), і одержимо вираз для *механічної характеристики двигуна*:

$$\omega = \frac{U}{k\Phi} - \frac{M \cdot R}{k^2 \cdot \Phi^2}, \quad (10.14)$$

або

$$\omega = \frac{U}{c} - \frac{M \cdot R}{c^2}, \quad (10.15)$$

де

$$c = k \cdot \Phi. \quad (10.16)$$

Механічна характеристика двигуна незалежного збудження при незмінних параметрах U , Φ і R є прямою лінією. Змінюючи той або інший параметр, можна регулювати швидкість обертання двигуна.

На рис. 10.7 представлені механічні характеристики двигуна незалежного збудження для різних опорів якірного кола. З рис.10.7 видно, що при $M = 0$ всі характеристики проходять через одну точку на осі ординат. Кутова швидкість в цій точці має значення, що не залежить від опору якірного кола, вона зветься швидкістю ідеального холостого ходу ω_0 і визначається виразом

$$\omega_0 = \frac{U}{k\Phi}. \quad (10.17)$$

При швидкості ідеального холостого ходу, коли струм у якірному колі дорівнює нулю, ЕРС якоря, спрямована назустріч прикладеній напрузі, дорівнює їй за абсолютним значенням. Якщо двигун до прикладання навантаження мав кутову швид-

кість ω_0 , то з появою на його валу моменту опору кутова швидкість буде знижуватися. Наслідком цього буде зменшення ЕРС обертання E відповідно до (10.11) і збільшення струму якоря відповідно до (10.10) і моменту двигуна за (10.13). Кутова швидкість буде знижуватися доти, поки момент двигуна не зрівняється з моментом опору. Різниця значень сталих швидкостей електропривода до й після прикладання заданого статичного навантаження називається **статичним падінням швидкості**.

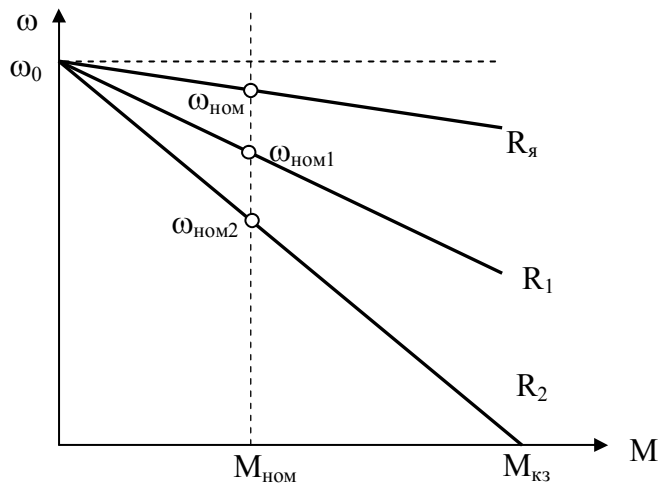


Рис.10.7 - Механічні характеристики двигуна постійного струму незалежного збудження

Другий член (10.15) характеризує статичне падіння кутової швидкості (перепад) відносно кутової швидкості ідеального холостого ходу:

$$\Delta\omega = \frac{M \cdot R}{k^2 \cdot \Phi^2}. \quad (10.18)$$

Таким чином, рівняння для швидкості двигуна можна записати в такий спосіб:

$$\omega = \omega_0 - \Delta\omega. \quad (10.19)$$

Верхня характеристика на рис. 10.17, називається природною. **Природною характеристикою** називають таку характеристику двигуна, що має

місце при відсутності зовнішніх резисторів в якірному колі і номінальних значеннях напруги і магнітного потоку двигуна. Жорсткість природної характеристики залежить від внутрішнього опору якірному кола двигуна $R_я$. Відповідно перепад швидкості для природної характеристики

$$\Delta\omega = \frac{M \cdot R_я}{k^2 \cdot \Phi_{ном}^2}.$$

За (10.18) визначається статичне падіння швидкості для кожної з характеристик двигуна незалежного збудження, поданих на рис. 10.7. Наприклад, при додатково включеному реостаті, який має опір R_p , статичне падіння швидкості визначиться із співвідношення

$$\Delta\omega = \frac{M \cdot (R_я + R_p)}{k^2 \cdot \Phi^2}. \quad (10.20)$$

Розділивши (10.19) на ω_0 , отримаємо статичне падіння швидкості у відносних одиницях:

$$\Delta\omega^* = \frac{\Delta\omega}{\omega_0} = \frac{\omega_0 - \omega}{\omega_0}.$$

Якщо до якірному кола двигуна включений додатковий резистор (реостат), то отримані при цьому механічні характеристики називаються штучними або **реостатними характеристиками**. Ці характеристики перетинаються всі в одній точці ω_0 . Реостатні характеристики так само лінійні, як і природна характеристика, але мають значно більший нахил до осі моментів, тобто мають меншу жорсткість. Чим більшим є введений до кола якоря опір резистора, тим крутіше йде характеристика, і тим менша її жорсткість.

З рівняння електричної рівноваги кола якоря двигуна (10.10) видно, що в момент пуску коли $\omega = 0$ і ЕРС обертання $E = 0$, пусковий струм двигуна $I_n = \frac{U}{R_{\text{я}}}$ набагато (у $10 \div 30$ разів) перевищує номінальне значення. Тому прямий пуск двигуна, тобто безпосереднє включення якоря на напругу мережі, неприпустимий. Щоб обмежити великий пусковий струм якоря, перед пуском послідовно з якорем включають пусковий реостат $R_{\text{п}}$.

10.6.2. Двигун з послідовним збудженням. Обмотка збудження двигуна включається послідовно з якорем (рис. 10.8,а), тому струм у навантаженні є струмом якоря і струмом збудження ($I = I_{\text{я}} = I_{\text{зб}}$). Це істотно впливає на властивості й характеристики двигуна, тому що зміна моменту навантаження неминуче супроводжується зміною магнітного потоку статора.

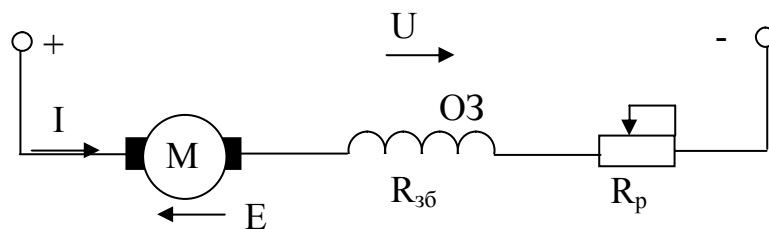


Рис. 10.8 - Схема включення двигуна постійного струму послідовного збудження.

Для електродвигуна послідовного збудження рівняння електромеханічної характеристики, так само як і для двигуна незалежного збудження, має вигляд

$$\omega = \frac{U - I \cdot R}{k \cdot \Phi}, \quad (10.21)$$

де $R = R_{\text{я}} + R_{\text{зб}} + R_{\text{п}}$ - сумарний опір якрного кола.

На відміну від двигуна незалежного збудження тут магнітний потік Φ є функцією струму якоря I . Ця залежність (рис. 10.9) називається кривою намагнічування. Для неї немає точного аналітичного виразу, тому важко надати точне аналітичне вираження для механічної характеристики двигуна. Якщо припустити лінійну залежність між потоком і струмом якоря, тобто вважати $\Phi = \alpha \cdot I$, то момент двигуна можна виразити наступним чином:

$$M = k \cdot \Phi \cdot I = \alpha \cdot k \cdot I^2. \quad (10.22)$$

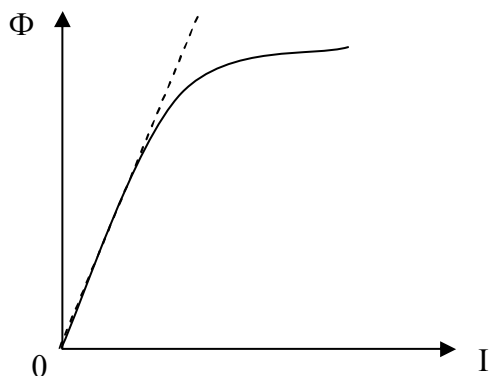


Рис.10.9 - Крива намагнічування двигуна постійного струму послідовного збудження

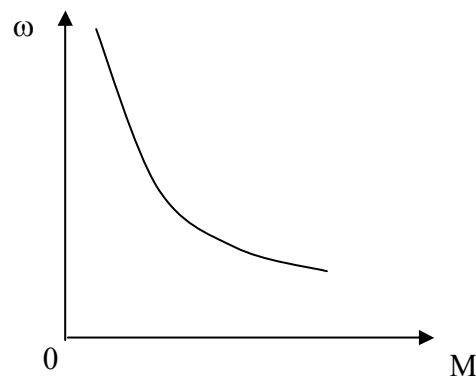


Рис.10.10 - Природна механічна характеристика двигуна постійного струму послідовного збудження

Підставивши у (10.21) значення струму з (10.22), отримаємо вираз для механічної характеристики:

$$\omega = \frac{U}{\alpha k \sqrt{\frac{M}{\alpha k}}} - \frac{R}{\alpha k} = \frac{A}{\sqrt{M}} - B \quad (10.23)$$

Звідси випливає, що при ненасиченому магнітному колі двигуна механічна характеристика зображується кривою (рис. 10.10), для якої вісь ординат є асимптотою. Значне збільшення кутової швидкості при малих навантаженнях викликано відповідним зменшенням магнітного потоку.

Рівняння (10.23) дає загальне уявлення про механічну характеристику двигуна послідовного збудження, але у розрахунках ним користуватися не можна, тому що машин з ненасиченою магнітною системою не будують. Побудову дійсних механічних характеристик виконують на підставі даних каталогів, де наводять природні характеристики: $\omega = f(I)$ і $M = f(I)$. Для серії двигунів певного типу ці характеристики дають у відносних одиницях: $\omega^* = f(I^*)$ і $M^* = f(I^*)$.

Двигуни послідовного збудження широко застосовують в піднімальних установках (кранові двигуни) і на електротранспорті (тягові двигуни), де потрібний великий обертовий момент (особливо при пуску).

10.6.3. Двигун змішаного збудження (рис. 10.11) має дві обмотки збудження: незалежну ОЗ2 і послідовну ОЗ1, тому його механічні характеристики займають проміжне положення між відповідними характеристиками двигунів незалежного і послідовного збудження. Механічна характеристика розглянутого двигуна внаслідок зміни магнітного потоку при зміні навантаження не має аналітичного виразу, тому при розрахунках звичайно користуються природними універсальними характеристиками моменту й швидкості від струму якоря, які дають в каталогах. Такі характеристики у відносних одиницях подані на рис. 10.12.

На відміну від двигуна послідовного збудження двигун змішаного збудження має кінцеве значення швидкості ідеально холостого ходу, яка визначається тільки магнітним потоком, створеним магніторушійною силою незалежної обмотки, і дорівнює:

$$\omega_0 = \frac{U}{k \cdot \Phi_0},$$

де Φ_0 - магнітний потік, створений струмом збудження незалежної обмотки.

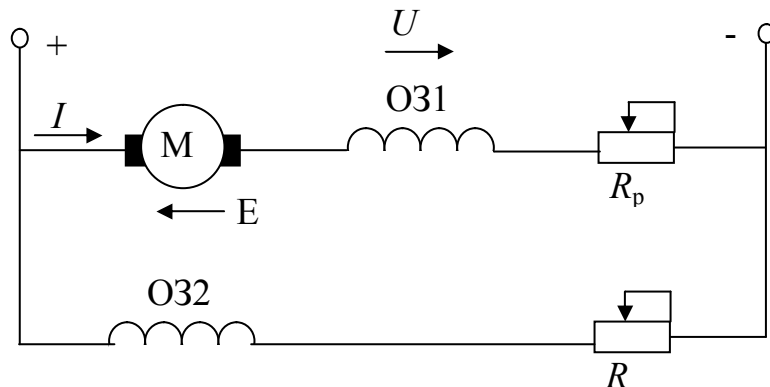


Рис. 10.11 - Схема включення двигуна постійного струму змішаного збудження.

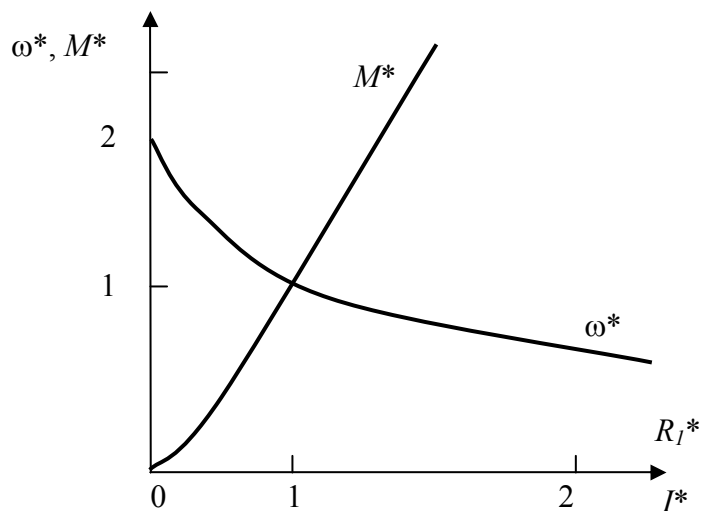


Рис. 10.12 - Залежність моменту і кутової швидкості від струму якоря для двигуна постійного струму змішаного збудження

гуна незалежного збудження. Це відбувається внаслідок того, що при великих навантаженнях настає насичення машини, і хоча магніторушійна сила послідовної обмотки зростає, магнітний потік уже майже не змінюється.

Співвідношення магніторушійних сил незалежної і послідовної обмоток різні для двигунів різних серій. Найбільш уживаним є співвідношення, яке при номінальному струмі дає рівність магніторушійних сил обох обмоток збудження. Швидкість двигуна змішаного збудження при малих навантаженнях змінюється значно, а потім при збільшенні навантаження повільно зменшується майже за прямою, як у дви-

Контрольні запитання з теми 10

1. Назвіть основні частини машини постійного струму, поясніть її конструкцію.
2. Поясніть принцип дії генератора постійного струму і призначення колектора у генератора та у двигуна.
3. Як можна змінити ЕРС генератора?
4. Поясніть принцип дії двигуна постійного струму.
5. Запишіть рівняння противо-ЕРС і струму якоря двигуна.
6. Виведіть рівняння обертового моменту двигуна. Як змінити напрямок обертання якоря двигуна?
7. Виведіть рівняння швидкості двигуна і поясніть можливості її регулювання.
8. Поясніть призначення пускового реостата й вибір величини його опору.
9. Особливості схеми двигуна з паралельним збудженням.
10. Поясніть регулювання швидкості двигуна зміною струму збудження. Чому розрив кола збудження небезпечний для двигуна?
11. Поясніть регулювання швидкості двигуна з паралельним збудженням зміною напруги на якорі.
12. Як змінюється швидкість двигуна з послідовним збудженням при зміні навантаження на його валу? Чому робота з малим навантаженням для двигуна є неприпустимою?
13. Поясніть, як регулюють швидкість двигуна з послідовним збудженням.
14. Як змінюються обертовий момент і швидкість двигуна із змішаним збудженням із зростанням навантаження?
15. Які з втрат у машині постійного струму залежать від навантаження? Які втрати є постійними?

Задачі до теми 10 і приклади їхнього розв'язання

Задача 10.1. Машина постійного струму в режимі двигуна має наступні номінальні дані: P_H ; U_H ; I_H ; $R_{я}$; $I_{зб}$; n_H . Визначити необхідну швидкість обертання якоря МПС, що працює в режимі генератора з напругою U_G . Обчислити номінальну потужність цього генератора, якщо насичення сталі і нагрівання прийняти такими ж, як у двигуна. Вихідні дані наведені в табл. 10.1.

Таблиця 10.1

Параметр	Варіант завдання										
	К	0	1	2	3	4	5	6	7	8	9
P_H , кВт	11	13	15	18	16	14	12	10	12	14	16
U_H , В	220	230	240	230	220	230	240	230	220	230	240
n_H , об/хв	1000	960	900	840	800	1100	1180	960	900	860	800
I_H , А	62	64	66	68	66	64	62	60	62	64	66
$R_{я}$, Ом	0,09	0,1	0,14	0,16	0,08	0,1	0,12	0,14	0,16	0,13	0,15
$I_{зб}$, А	3	3,4	3,6	3,8	4	3,8	3,6	3	3,2	3,4	3,6
U_G , В	230	240	230	240	230	240	230	240	230	240	230

Розв'язання задачі для варіанта К.

Визначаємо струм якоря двигуна й генератора

$$I_{я,дв} = I_H - I_{зб} = 62 - 3 = 59 \text{ А} = I_{н,г}.$$

Обчислюємо ЕРС двигуна й генератора без урахування падіння напруги в щітковому контакті:

$$E_{дв} = U_H - I_{я,дв} \cdot R_{я} = 220 - 59 \cdot 0,09 = 214,7 \text{ В};$$

$$E_G = U_G + I_{яг} \cdot R_{я} = 230 + 59 \cdot 0,09 = 235,3 \text{ В}.$$

Швидкість обертання якоря генератора визначаємо із співвідношення

$$\frac{E_G}{E_{дв}} = \frac{c \cdot n_G \cdot \Phi_G}{c \cdot n_{дв} \cdot \Phi_{дв}} = \frac{n_G}{n_{дв}},$$

оскільки за умовою $\Phi_G = \Phi_{дв}$,

$$n_G = \frac{E_G}{E_{дв}} n_{дв} = \frac{235,3}{214,7} 1000 = 1096 \text{ об/хв}.$$

Якщо врахувати падіння напруги в щітковому контакті, наприклад при $\Delta U_{щ} = 2 \text{ В}$, тоді

$$E'_{дв} = U_H - I_{я,дв} \cdot R_{я} - \Delta U_{щ} = 214,7 - 2 = 212,7 \text{ В},$$

$$E'_G = U_G + I_{яг} \cdot R_{я} + \Delta U_{щ} = 235,3 + 2 = 237,3 \text{ В},$$

і швидкість обертання повинна бути

$$n_G = \frac{E'_G}{E'_{дв}} n_{дв} = \frac{237,3}{212,7} 1000 = 1116 \text{ об/хв}.$$

Знаходимо номінальний струм і номінальну потужність:

$$I_{н,г} = I_{яг} - I_{зб} = 59 - 3 = 56 \text{ А},$$

$$P_{нг} = U_G \cdot I_{нг} = 230 \cdot 56 = 12880 \text{ Вт} = 12,9 \text{ кВт}.$$

Задача 10.2. Визначити швидкість обертання якоря генератора з $P_H = 16,5$ кВт, $U_H = 230$ В, $n_{H.G} = 1460$ об/хв, $R_{я} = 0,18$ Ом, $R_{зб} = 82$ Ом при роботі двигуном з $U_{дв} = 220$ В, якщо насичення сталі й нагрівання двигуна прийняти такими ж, як у генератора. Обчислити електромагнітну потужність двигуна. Вихідні дані наведені в табл. 10.2.

Таблиця 10.2

Параметр	Варіант завдання										
	К	0	1	2	3	4	5	6	7	8	9
$P_{H.G}$, кВт	16,5	18	20	22	21	19	17	15	16	18	20
$U_{H.G}$, В	230	240	230	240	230	240	230	240	230	240	230
$n_{H.G}$, об/хв	1460	1400	1540	1500	1460	1400	1540	1600	1500	1460	1400
$R_{я}$, Ом	0,18	0,2	0,22	0,21	0,2	0,19	0,18	0,17	0,16	0,18	0,2
$R_{зб}$, Ом	82	84	86	85	83	81	80	82	84	85	83
$U_{дв}$, В	220	220	220	230	210	220	210	220	210	220	220

Розв'язання задачі для варіанта К.

Знаходимо струм якоря генератора й двигуна:

$$I_{я.г} = I_H + I_{зб} = P_{H.G}/U_{H.G} + U_H/R_{зб} = 16500/230 + 230/82 = 72 + 2,8 = 74,8 \text{ А}$$

$$I_{я.дв} = I_{я.г} \text{ (за умовою завдання).}$$

Струм, споживаний двигуном з мережі, дорівнює

$$I_{дв} = I_{я.дв} + I_{зб} = 74,8 + 2,8 = 77,6 \text{ А.}$$

Обчислюємо ЕРС генератора й двигуна:

$$E_G = U_{H.G} + I_{я.г} \cdot R_{я} = 230 + 74,8 \cdot 0,18 = 243,5 \text{ В;}$$

$$E_{дв} = U_{дв} - I_{я.дв} \cdot R_{я} = 220 - 74,8 \cdot 0,18 = 206,5 \text{ В.}$$

Швидкість обертання якоря двигуна знаходимо із співвідношення

$$n_{дв} = \frac{E_{дв}}{E_G} n_{H.G} = \frac{206,5}{243,5} 1460 = 1238 \text{ об/хв.}$$

Визначаємо електромагнітну потужність двигуна:

$$P_{ем} = E_{дв} \cdot I_{я.дв} = 206,5 \cdot 74,8 = 15446 \text{ Вт} = 15,5 \text{ кВт.}$$

Номінальна потужність двигуна буде трохи меншою.

ТЕМА 11 АСИНХРОННІ ЕЛЕКТРИЧНІ МАШИНИ

Ключові поняття: статор, ротор, обертове магнітне поле, ковзання, режими роботи асинхронної машини, коефіцієнт трансформації ЕРС асинхронного двигуна (АД), електрична рівновага кола статора (ротора), схема заміщення АД, повна векторна діаграма АД, характеристика холостого ходу, швидкісна характеристика, механічна характеристика.

Асинхронні машини переважно застосовують як двигуни. За оцінками експертів із загальної кількості електричних двигунів, що перебувають в експлуатації, на асинхронні двигуни припадає 90-95%. Простота, висока надійність у роботі, малі габаритні розміри і низька вартість трифазних АД потужністю більше 0,5 кВт обумовили їхнє широке застосування в електроприводах металорізальних верстатів, підйомно-транспортних механізмів, ковальсько-пресових машин, насосів, вентиляторів, компресорів та ін.

Асинхронні двигуни потужністю до 0,5 кВт виконують одно- і двофазними. Їх застосовують у системах автоматики, в побутових приладах, в електрифікованому інструменті та ін.

11.1. Будова і принцип дії трифазної асинхронної машини

11.1.1. Будова асинхронної машини. Асинхронна машина, як і будь-яка електрична машина, може працювати в режимі двигуна і режимі генератора.

На рис.11.1 показана будова АД. Його основними конструктивними елементами є *нерухомий статор і обертовий ротор*. Статор складається із станини 1 (рис.11.2), що є одночасно корпусом двигуна, і закріплених у ній магнітопроводу 2 і обмотки 3. Магнітопровід статора, який являє собою основну частину магнітного кола машини, виконаний з шихтованої електротехнічної сталі. На його внутрішній циліндричній поверхні є пази, в які укладають провідники обмотки статора. До станини кріплять два бічних щити 4 з наскрізними центральними отворами для підшипників вала ротора. Ротор АД 5 (рис. 11.2) складається з пакета магнітопроводу і обмотки. Насаджений на вал 6 пакет магнітопроводу має форму циліндра, на зовнішній поверхні якого виконані пази, де розміщується обмотка.

Залежно від типу обмотки ротор АД може бути короткозамкненим або фазним. У пази короткозамкнених роторів вкладені мідні стрижні, що з'єднуються з торців короткозамкненими кільцями; така обмотка має вигляд «білячої клітки» (рис. 11.3,а). Умовне графічне позначення асинхронного двигуна з короткозамкненим ротором наведено на рис. 11.3,а.

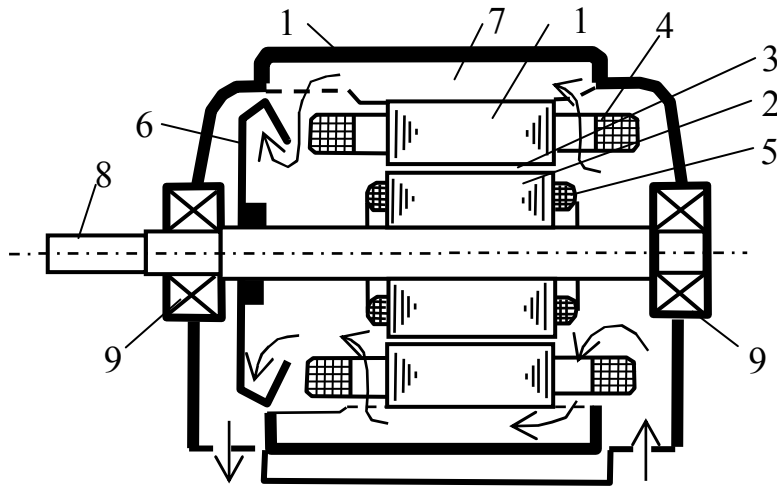


Рис.11.1 - Будова асинхронного двигуна:

1 - осердя статора; 2 - осердя ротора; 3 - повітряний зазор; 4 - обмотка статора; 5 - обмотка ротора; 6 - вентилятор; 7 - вентиляційні канали (стрілками показаний напрямок руху повітря, що охолоджує, по каналах); 8 - вал; 9 - підшипники; 10 - станина.

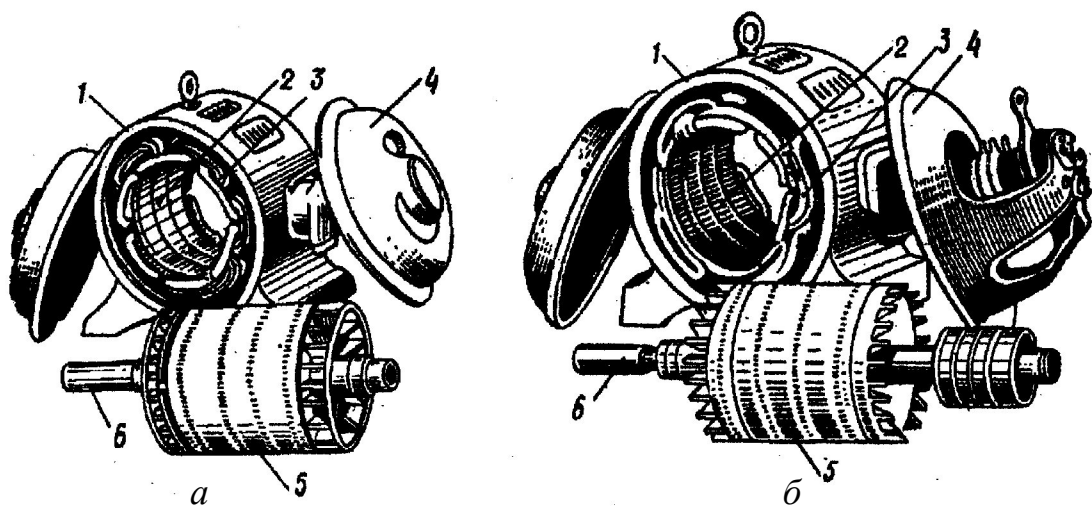


Рис.11.2 - Конструктивні елементи асинхронних двигунів:
а - АД з короткозамкненим ротором; *б* - АД з фазним ротором

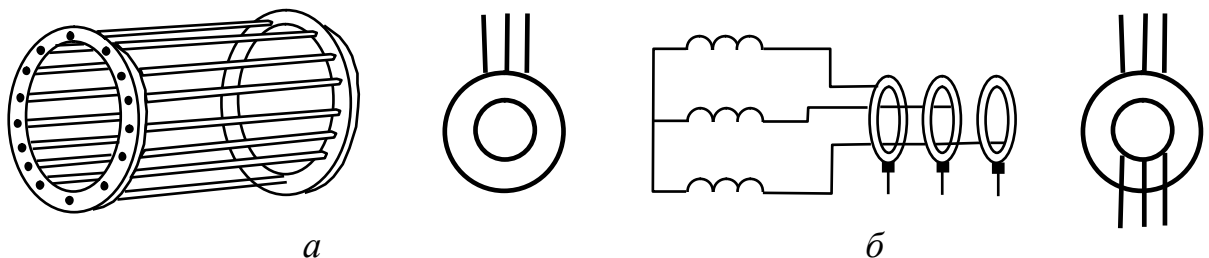


Рис.11.3 - Обмотки ротора АД:

а - короткозамкнена; *б* - з фазним ротором.

У пази фазного ротора укладають провідники секцій трифазної обмотки, що з'єднуються в «зірку» (рис. 11.3,б). Вільні виводи фаз обмотки ротора приєднують до трьох (за числом фаз) ізольованих одне від одного контактних кілець. На кільця

накладені закріплені в щіткотримачах щітки, за допомогою яких обмотки ротора з'єднується з регулювальним або пусковим реостатом. Умовне графічне позначення асинхронного двигуна з фазним ротором наведено на рис. 11.3,б.

11.1.2. Принцип роботи асинхронної машини заснований на використанні обертового магнітного поля. При підключенні до мережі трифазної обмотки статора створюється обертове магнітне поле, кутова швидкість якого визначається частотою мережі f і числом пар полюсів обмотки p :

$$\omega = \frac{2\pi \cdot f}{p}, \text{ рад/с.}$$

Перетинаючи провідники обмотки статора і ротора, це поле відповідно до закону електромагнітної індукції наводить в обмотках ЕРС. При замкнутій обмотці ротора в її колі протікає струм, взаємодія якого з результуючим магнітним полем створює електромагнітний момент на валу асинхронної машини. Якщо цей момент перевищує момент опору на валу двигуна, вал починає обертатися і обертатиме робочий механізм. Кутову швидкість магнітного поля ω_1 називають синхронною. Звичайно кутова швидкість ротора ω_2 не дорівнює кутовій швидкості магнітного поля ω_1 . Звідси і назва двигуна асинхронний, тобто несинхронний.

Робота асинхронної машини характеризується **ковзанням** s , що являє собою **відносну різницю кутових швидкостей поля ω_1 і ротора ω_2** :

$$s = \frac{\omega_1 - \omega_2}{\omega_1}. \quad (11.1)$$

Значення і знак ковзання залежать від кутової швидкості ротора відносно магнітного поля і визначають режим роботи асинхронної машини. Так, у режимі ідеального холостого ходу ротор і магнітне поле обертаються з однаковою частотою в одному напрямку, тобто ротор нерухомий відносно обертового магнітного поля, і ковзання s дорівнює нулю. ЕРС в обмотці ротора не індуктується, струм ротора й електромагнітний момент машини дорівнюють нулю. При пуску АД в перший момент часу ротор нерухомий: $\omega_2 = 0$, $s = 1$. Таким чином, ковзання в режимі двигуна змінюється від $s = 1$ в початковий момент пуску до $s = 0$ у режимі ідеального холостого ходу.

При обертанні ротора із швидкістю $\omega_2 > \omega_1$ у напрямку обертання магнітного поля ковзання стає від'ємним. Машина переходить у генераторний режим і розвиває гальмовий момент. При обертанні ротора в напрямку, протилежному напрямку обертання магнітного поля ($s > 1$), асинхронна машина переходить у режим противключення і також розвиває гальмовий момент. Таким чином, залежно від ковзання розрізняють **режими двигуна** ($s = 1 \div 0$), **генераторний** ($s = 0 \div -\infty$) і **противключення** ($s = 1 \div +\infty$). Режими генераторний і противключення використовують для гальмування асинхронних двигунів.

У сучасних АД, залежно від їхнього типу, при номінальному навантаженні ковзання становить $s_{\text{ном}} = 0,015 \div 0,07$.

11.1.3. Схеми з'єднання обмоток статора. Початки фазних обмоток позначаються C_1, C_2, C_3 ; кінці - C_4, C_5, C_6 . Для включення двигуна до електричної мережі обмотки статора з'єднують в «зірку» або «трикутник». Питання про схему з'єднання вирішують залежно від лінійної напруги мережі і номінальної фазної напруги обмоток статора. Вказівки про це наводять у паспорті двигуна. При схемі з'єднання в «зірку» (рис. 11.4,а) всі три кінці фазних обмоток C_4, C_5, C_6 з'єднують в нульову точку, при схемі з'єднання в «трикутник» (рис. 11.4,б) з'єднують між собою попарно початки й кінці сусідніх фаз: $C_1 - C_6, C_2 - C_4, C_3 - C_5$. Мережа приєднується в першому випадку до трьох початків обмоток C_1, C_2, C_3 , в другому — до загальних точок $C_1 - C_6, C_2 - C_4, C_3 - C_5$.

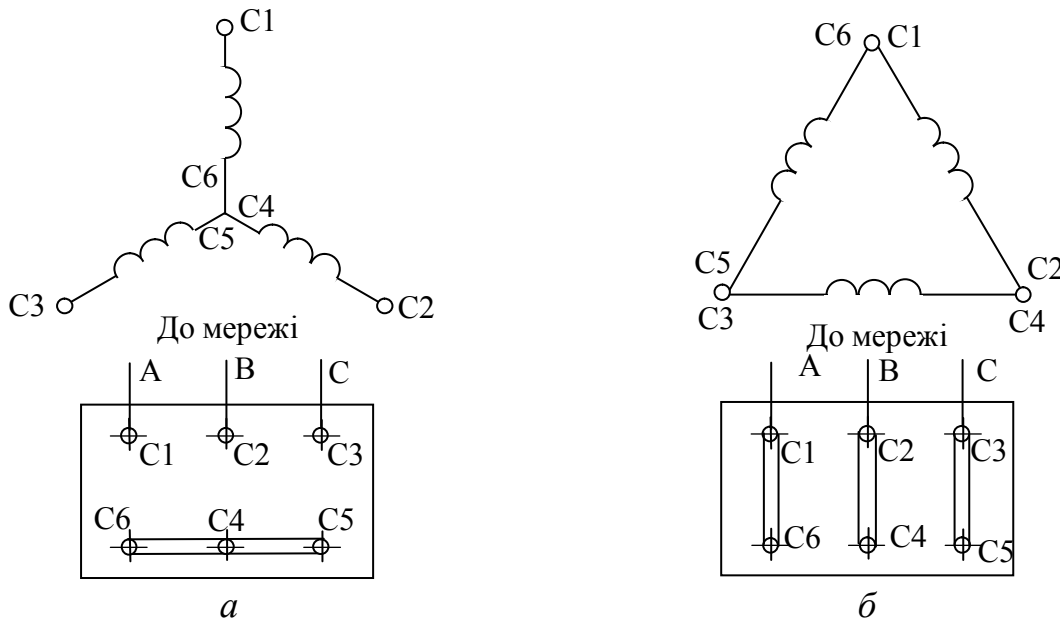


Рис.11.4 - Схеми з'єднання фазних обмоток АД:
а – «зірка»; б – «трикутник»

11.2. ЕРС статора і ротора

Обертове магнітне поле в кожній з обмоток статора і ротора індуктує змінну ЕРС. ЕРС окремих секцій обмотки мають різні фази і їх необхідно скласти як вектори. Тому загальна ЕРС фазної обмотки менша за арифметичну суму ЕРС окремих секцій. Для врахування цієї обставини до формули ЕРС вводять обмоточний коефіцієнт k . Таким чином, ЕРС фазної обмотки статора визначається за формулою

$$E_1 = 4,44 \cdot f_1 \cdot w_1 \cdot k_1 \cdot \Phi, \quad (11.2)$$

де f_1 - частота струму статора; w_1 - число витків фазної обмотки; k_1 - обмоточний коефіцієнт статора ($k_1 = 0,9 \div 0,95$); Φ - магнітний потік обертового поля.

Аналогічною формулою визначають ЕРС фази ротора:

$$E_2 = 4,44 \cdot f_2 \cdot w_2 \cdot k_2 \cdot \Phi, \quad (11.3)$$

де f_2 - частота струму ротора; w_2 - число витків фази ротора; k_2 - обмоточний коефіцієнт ротора. У випадку короткозамкненого ротора $k_2 = 1$.

Магнітне поле, обертаючись у просторі з синхронною швидкістю n_1 (об/хв), відносно обертового ротора має швидкість

$$n_s = n_1 - n_2. \quad (11.4)$$

За кожний оберт поля відносно ротора фаза його ЕРС змінюється на $p \cdot 360$ електричних градусів, що відповідає p повним періодам ЕРС. Частота ЕРС ротора при цьому стає рівною

$$f_2 = \frac{n_s \cdot p}{60} \quad \text{або} \quad f_2 = f_1 \cdot s, \quad (11.5)$$

тобто частота ЕРС ротора, а отже, і величина ЕРС E_2 (11.3) пропорційні ковзанню. Найбільшою частота ЕРС ротора буде в початковий момент пуску, коли $s = 1$. При цьому вона дорівнює частоті живильної мережі f_1 . З розгоном двигуна убуває ковзання і зменшується частота струму ротора. У робочому режимі двигуна, що живиться струмом частотою $f_1 = 50$ Гц, частота струму ротора становить 1 - 2 Гц. При $s = 1$ $f_2 = f_1$, тоді ЕРС нерухомого ротора має вигляд

$$E_{2H} = 4,44 \cdot f_1 \cdot w_2 \cdot k_2 \cdot \Phi. \quad (11.6)$$

Підставивши E_{2H} у формулу (11.3), одержимо ЕРС обертового ротора:

$$E_2 = E_{2H} \cdot s. \quad (11.7)$$

Таким чином, ЕРС E_2 , як і її частота, з розгоном ротора зменшується. Відношення ЕРС статора E_1 (11.2) до ЕРС нерухомого ротора E_{2H} (11.6) називають **коефіцієнтом трансформації ЕРС асинхронного двигуна**

$$k_e = \frac{E_1}{E_{2H}} = \frac{w_1 \cdot k_1}{w_2 \cdot k_2}. \quad (11.8)$$

ЕРС статора і ротора E_1 і E_2 створюються головним обертовим потоком, який замикається через повітряний зазор між статором і ротором. Крім головного потоку, **кожна з обмоток створює потік, що зчіплюється лише з нею самою**. Цей потік називається **потокм розсіювання**. Він замикається через пази, а також навколо лобових частин обмоток. З огляду на, те що потоки розсіювання проходять в основному по повітрю, можна вважати їх пропорційними струмам в обмотках. Потоки розсіювання індуктують в обмотках статора і ротора ЕРС розсіювання E_{p1} і E_{p2} . Ці ЕРС можуть бути враховані як індуктивні падіння напруги в обмотках:

$$E_{p1} = -I_1 \cdot X_1 = -I_1 \cdot \omega_1 \cdot L_1; \quad (11.9)$$

$$E_{p2} = -I_2 \cdot X_2 = -I_2 \cdot \omega_2 \cdot L_2, \quad (11.10)$$

де I_1 і I_2 - струми статора і ротора; X_1 і X_2 - індуктивні опори статорної і роторної обмоток; L_1 і L_2 - індуктивності розсіювання статора і ротора.

Оскільки ми виходимо з пропорційної залежності між потоками розсіювання і струмами, що їх створюють, то індуктивності розсіювання L_1 і L_2 є величинами постійними. Вони залежать від конструктивних особливостей обмоток, форми пазів статора й ротора. Оскільки частота ротора не залишається постійною, а залежить від ковзання, залежним від ковзання виявляється і індуктивний опір ротора

$$X_2 = \omega_2 \cdot L_2 = 2\pi \cdot f_2 \cdot L_2 = 2\pi \cdot f_1 \cdot L_2 \cdot s,$$

$$\text{або} \quad X_2 = X_{2H} \cdot s, \quad (11.11)$$

де $X_{2H} = 2\pi \cdot f_1 \cdot L_2$ - індуктивний опір обмотки нерухомого ротора (при $s = 1$).

11.3. Рівняння електричної рівноваги статора і ротора

ЕРС кожної фазної обмотки статора врівноважуються прикладеною напругою мережі U_1 . Крім того, за рахунок напруги мережі покривається падіння напруги в активному опорі обмотки статора R_1 , створюване струмом статора I_1 і рівне $I_1 \cdot R_1$. **Рівняння електричної рівноваги статора** має вигляд:

$$\bar{U}_1 + \bar{E}_1 + \bar{E}_{p1} - \bar{I}_1 \cdot R_1 = 0,$$

або
$$\bar{U}_1 = -\bar{E}_1 - \bar{E}_{p1} + \bar{I}_1 \cdot R_1. \quad (11.12)$$

E_1 за фазою відстає від обертового потоку на чверть періоду або на кут 90° . ЕРС розсіювання E_{p1} відстає на кут 90° від струму I_1 . Активне падіння напруги $I_1 \cdot R_1$ збігається із струмом за фазою.

Оскільки $E_{p1} = I_1 \cdot X_1$, то

$$\bar{U}_1 = -\bar{E}_1 + \bar{I}_1 \cdot R_1 + \bar{I}_1 \cdot X_1, \quad (11.13)$$

або
$$\bar{U}_1 = -\bar{E}_1 + \bar{I}_1 \cdot Z_1, \quad (11.14)$$

де $Z_1 = \sqrt{R_1^2 + X_1^2}$ - повний опір фази статора. У комплексній формі рівняння електричної рівноваги статора має вигляд

$$\dot{U}_1 = -\dot{E}_1 + \dot{I}_1(R_1 + jX_1) = -\dot{E}_1 + \dot{I}_1 \cdot \underline{Z}_1. \quad (11.15)$$

Оскільки опір фазних обмоток статора Z_1 звичайно невеликий, можна знехтувати падінням напруги $I_1 \cdot Z_1$, тоді

$$U_1 \approx E_1 \equiv \Phi. \quad (11.16)$$

Отже, при постійній напрузі мережі обертовий магнітний потік практично постійний і не залежить від навантаження. Це є дійсним для невеликих значень струмів статора.

Обертовий магнітний потік індуктує у фазах ротора ЕРС E_2 , що викликає струм I_2 . Струм ротора створює потік розсіювання, ЕРС розсіювання має вигляд $E_{p2} = -I_2 \cdot X_2$ і падіння напруги в активному опорі ротора $I_2 \cdot R_2$.

Таким чином, **рівняння електричної рівноваги ротора**

$$\bar{E}_2 + \bar{E}_{p2} = \bar{I}_2 \cdot R_2,$$

або
$$\bar{E}_2 = \bar{I}_2 \cdot R_2 + \bar{I}_2 \cdot X_2 = \bar{I}_2 \cdot Z_2, \quad (11.17)$$

де $Z_2 = \sqrt{R_2^2 + X_2^2}$ - повний опір фази ротора.

У комплексному запису

$$\dot{E}_2 = \dot{I}_2 \cdot (R_2 + jX_2) = \dot{I}_2 \cdot \underline{Z}_2. \quad (11.18)$$

Цьому рівнянню відповідає векторна діаграма ротора, зображена на рис. 11.5. З рівняння напруг струм ротора дорівнює

$$I_2 = \frac{E_2}{Z_2} = \frac{E_2}{\sqrt{R_2^2 + X_2^2}}. \quad (11.19)$$

Величини E_2 і X_2 залежать від ковзання. Взевши до уваги що $E_2 = E_{2H} \cdot s$ і $X_2 = X_{2H} \cdot s$, дістанемо

$$I_2 = \frac{E_{2H} \cdot s}{\sqrt{R_2^2 + X_2^2 \cdot s^2}} = \frac{E_{2H}}{\sqrt{\left(\frac{R_2}{s}\right)^2 + X_{2H}^2}}. \quad (11.20)$$

У цій формулі змінною, залежною від навантаження величиною, є ковзання s . Формула показує, що струм ротора буде максимальним при максимальному ковзанні, тобто в початковий момент пуску двигуна, коли $s = 1$. Із зменшенням ковзання струм ротора знижується.

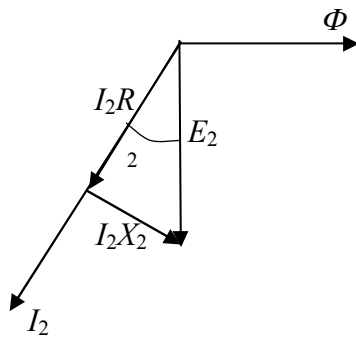


Рис.11.5 - Векторна діаграма за рівнянням (11.18)

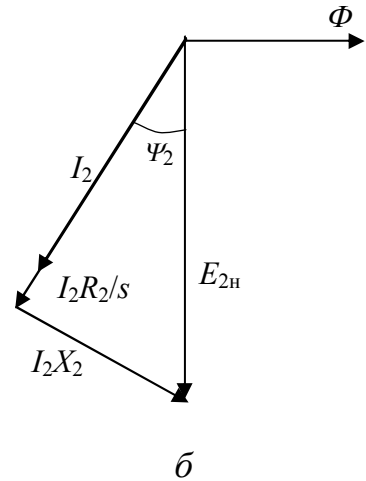
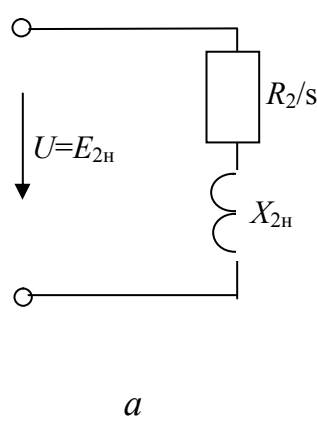


Рис.11.6 - Схема ротора (а) і векторна діаграма (б) при малих ковзаннях

Як правило, $R_2 < X_{2H}$, тому складова R_2/s під коренем у знаменнику формули (11.20) впливає на величину струму лише при малих ковзаннях.

Фаза струму відносно ЕРС E_2 також залежить від ковзання:

$$\operatorname{tg} \psi_2 = \frac{X_2}{R_2} = \frac{X_{2H} \cdot s}{R_2}. \quad (11.21)$$

При малому ковзанні кут ψ_2 невеликий. На підставі (11.20) електричне коло ротора можна зобразити схемою, що складається з активного R_2/s і індуктивного X_{2H} (замість реальних R_2 і X_2) опорів, до якої прикладена напруга U , рівна ЕРС нерухомого ротора E_{2H} (рис. 11.6,а). Векторна діаграма такої схеми ротора показана на рис. 11.6,б.

11.4. Схема заміщення асинхронного двигуна

Перетворимо рівняння напруг ротора (11.18), розділивши обидві його частини на ковзання:

$$\frac{\dot{E}_2}{s} = \dot{I}_2 \frac{R_2}{s} + \dot{I}_2 \cdot j \frac{X_2}{s}. \quad (11.22)$$

З огляду на те, що $\frac{\dot{E}_2}{s} = \dot{E}_{2H}$, а $\frac{X_2}{s} = X_{2H}$, можна записати

$$\dot{E}_{2H} = \dot{I}_2 \frac{R_2}{s} + \dot{I}_2 \cdot j X_{2H}. \quad (11.23)$$

Беручи до уваги, що $I_2 = I_2' k_i$, де I_2' - наведений струм ротора, тобто частина струму статора, що врівноважує розмагнічуючу дію струму ротора; $k_i = \frac{m_1 \cdot w_1 \cdot k_1}{m_2 \cdot w_2 \cdot k_2}$; - коефіцієнт трансформації струмів АД, помноживши (11.23) на коефіцієнт трансформації ЕРС k_e (11.8), одержимо

$$\dot{E}_{2H} \cdot k_e = \dot{I}_2' \frac{R_2 \cdot k_e \cdot k_i}{s} + \dot{I}_2' \cdot jx_{2H} \cdot k_e \cdot k_i,$$

або

$$\dot{E}_2' = \dot{I}_2' \frac{R_2'}{s} + \dot{I}_2' \cdot jX_{2H}', \quad (11.24)$$

де $E_2' = E_{2H} \cdot k_e$ - приведена до статора ЕРС нерухомого ротора, вона дорівнює ЕРС статора E_1 ; $R_2' = R_2 \cdot k = R_2 \cdot k_e \cdot k_i$ - приведений до статора активний опір обмотки ротора; $X_{2H}' = X_{2H} \cdot k = X_{2H} \cdot k_e \cdot k_i$ - приведений індуктивний опір нерухомого ротора; $k = k_e \cdot k_i = \frac{m_1 \cdot \omega_1^2 \cdot k_1^2 \cdot k^2}{m_2 \cdot \omega_2^2 \cdot k^2}$ - коефіцієнт приведення опорів ротора до статора.

Така заміна дійсних величин ротора приведеними не змінює енергетичних співвідношень в ньому, але дозволяє перейти від електромагнітного зв'язку між колами ротора і статора до електричного зв'язку між ними.

АД може бути представлений електричною схемою заміщення, наведеною на рис. 11.7. Даній схемі заміщення відповідає повна векторна діаграма асинхронного двигуна, що зображена на рис. 11.8. Гілка схеми із струмом I_0 називається гілкою намагнічування. Опори R_0 і X_0 визначаються магнітними властивостями магнітопроводу. Падіння напруги, викликане струмом I_0 , дорівнює й протилежне за фазою ЕРС статора E_1 і наведеної ЕРС ротора E_2' :

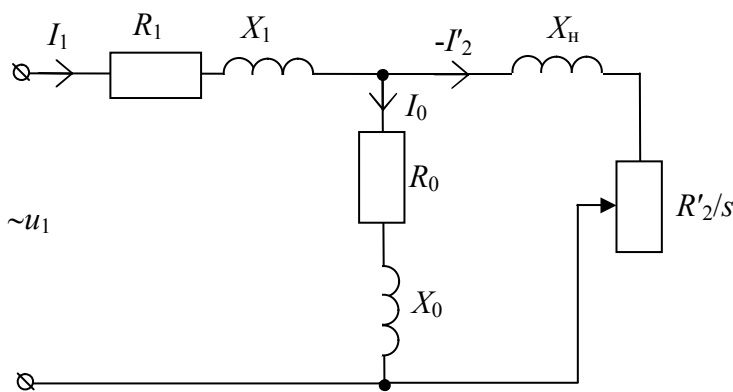


Рис.11.7 - Схема заміщення АД

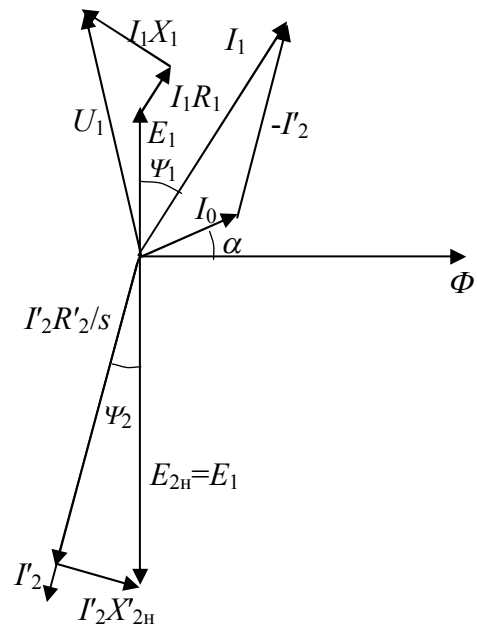


Рис.11.8 - Повна векторна діаграма АД

$$\dot{I}_0 \cdot R_0 + \dot{I}_0 \cdot jX_0 = -\dot{E}_1 = -\dot{E}_2' . \quad (11.25)$$

Параметри схеми заміщення можуть бути встановлені розрахунком або за дослідними даними. Для АД, як і для трансформаторів, проводяться досліди холостого ходу і короткого замикання.

11.5. Втрати і ККД асинхронного двигуна

У АД електрична енергія перетворюється на механічну. В процесі такого перетворення частина її втрачається в самому двигуні. Потужність P_1 , споживана обмоткою статора від мережі, витрачається на втрати в статорі та в роторі.

Втрати в статорі складаються з потужності втрат в осерді статора на гістерезис і вихрові струми (втрати в сталі статора) P_c і потужності електричних втрат в обмотці статора на її нагрівання струмом $P_{E.C}$:

$$P_{E.C} = m_1 \cdot I_1^2 \cdot R_1, \quad (11.26)$$

де m_1 - число фаз статора; I_1 - струм статора; R_1 - активний опір фази статора.

Якщо від потужності P_1 відняти втрати в статорі, то отримаємо потужність, яка називається електромагнітною потужністю двигуна $P_{E.M}$. Це потужність обертового поля. Деяка її частина є електричними втратами в роторі $P_{E.P}$:

$$P_{E.P} = m_2 \cdot I_2^2 \cdot R_2, \quad (11.27)$$

де I_2 - струм ротора; R_2 - активний опір фази ротора; m_2 - число фаз ротора.

Втратами в сталі ротора внаслідок малої частоти струму ротора можна зневажити. Частина електромагнітної потужності, що залишилася, перетворюється на механічну P'_2 . Якщо від неї відняти потужність механічних втрат P_m , обумовлених тертям у підшипниках і об повітря, і потужність додаткових втрат P_d , пов'язаних з пульсаціями магнітного потоку в зубцевій зоні магнітопроводу і з полями розсіювання, то одержимо механічну потужність на валу P_2 . Тоді ККД двигуна

$$\eta = \frac{P_2}{P_1} = \frac{P_1 - \Delta P}{P_1}, \quad (11.28)$$

де ΔP - сумарні втрати у двигуні.

Деякі з втрат (наприклад, втрати в сталі) практично не залежать від навантаження; інші (наприклад, електричні в обмотках статора й ротора) - пов'язані з навантаженням. В цілому із зростанням навантаження зростають і втрати, а отже, і нагрівання двигуна. Гранична механічна потужність на валу, яку двигун може розвивати довгостроково (необмежено довго), не перегріваючись понад припустиму температуру, **називається номінальною потужністю двигуна**. Вона вказується у паспорті. ККД двигуна при номінальному навантаженні значною мірою залежить від номінальної потужності двигуна. Чим більша потужність двигуна, тим менші відносні втрати в ньому й більший ККД. Для великих асинхронних двигунів номінальний ККД досить високий і досягає значень $0,9 \div 0,97$, в той час як для двигунів малих потужностей (близько 1 кВт) він дорівнює лише $0,7 \div 0,8$. Крім того, за інших рівних умов, номінальний ККД вищий у двигуна з більшою синхронною швидкістю.

Електромагнітна потужність двигуна P_{EM} може бути записана як добуток моменту електромагнітних сил M і кутової швидкості поля ω_1 :

$$P_{EM} = M \cdot \omega_1 = M \frac{2\pi \cdot n_1}{60}. \quad (11.29)$$

У свою чергу, механічна потужність ротора P'_2 дорівнює добутку моменту і кутової швидкості ротора ω_2 :

$$P'_2 = M \cdot \omega_2 = M \frac{2\pi \cdot n_2}{60}; \quad (11.30)$$

Електромагнітна потужність ротора:

$$P_{E.P} = P_{EM} - P_2' = M \frac{2\pi}{60} (n_1 - n_2) = M \frac{2\pi \cdot n_1}{60} \frac{n_1 - n_2}{n_1} = M \cdot \omega_1 \cdot s = P_{EM} \cdot s. \quad (11.31)$$

При пуску двигуна, коли $s = 1$, електромагнітна потужність P_{EM} дорівнює потужності втрат у роторі $P_{E.P}$. З розгоном двигуна втрати в роторі зменшуються. Таким чином, ковзання s є мірою втрат у роторі.

У нормальному режимі роботи двигуна мале значення ковзання s (порядку декількох відсотків) є важливою умовою його економічності.

11.6. Обертовий момент асинхронного двигуна

Виразимо обертовий момент через втрати в роторі й ковзання:

$$M = \frac{P_{E.P}}{\omega_1 \cdot s} = \frac{m_2 \cdot I_2^2 \cdot R_2}{\omega_1 \cdot s}. \quad (11.32)$$

Відповідно до векторної діаграми на рис. 11.5 $I_2 \cdot R_2 = E_2 \cdot \cos \psi_2$, а за формулами (11.6) і (11.7) ЕРС ротора дорівнює

$$E_2 = E_{2H} \cdot s = 4,44 f_1 \cdot w_2 \cdot k_2 \cdot \Phi \cdot s. \quad (11.33)$$

Підставляючи (11.33) до формули моменту, дістанемо

$$M = \frac{4,44 \cdot m_2 \cdot f_1 \cdot w_2 \cdot k_2}{\omega_1} \Phi \cdot I_2 \cdot \cos \psi_2 = C \cdot \Phi \cdot I_2 \cdot \cos \psi_2, \quad (11.34)$$

де $C = \frac{4,44 m_2 \cdot f_1 \cdot w_2 \cdot k_2}{\omega_1}$ - постійна величина для даного двигуна.

Величини Φ , I_2 і $\cos \psi_2$ в більшому або меншому ступені залежні від ковзання, що обумовлює залежність від ковзання обертового моменту. Для з'ясування цієї залежності перетворимо вихідний вираз моменту (11.32), використовуючи формули (11.8) і (11.20):

$$M = \frac{m_2 \cdot I_2^2 \cdot R_2}{\omega_1 \cdot s} = \frac{m_2}{\omega_1 \cdot s} \cdot \frac{E_{2H}^2 \cdot s^2 \cdot R_2}{R_2^2 + X_{2H}^2 \cdot s^2} = \frac{m_2}{\omega_1 \cdot k_e^2} \cdot \frac{E_1^2 \cdot s \cdot R_2}{R_2^2 + X_{2H}^2 \cdot s^2}.$$

Позначивши постійну величину $\frac{m_2}{\omega_1 \cdot k_e^2} = C_1$ дістанемо

$$M = C_1 \cdot E_1^2 \frac{s \cdot R_2}{R_2^2 + X_{2H}^2 \cdot s^2}. \quad (11.35)$$

Якщо знехтувати падінням напруги в обмотці статора $I_1 \cdot Z_1$, то можна ЕРС E_1 замінити напругою U_1 (11.16). Це припущення можливе тільки у відомих межах. При великих навантаженнях і ковзаннях падіння напруги в обмотці статора сильно зростає і різниця між напругою і ЕРС може стати істотною. З урахуванням сказаного формула моменту набуває вигляду

$$M = C_1 \cdot U_1^2 \frac{s \cdot R_2}{R_2^2 + X_{2H}^2 \cdot s^2}. \quad (11.36)$$

При $U_1 = \text{const}$, що звичайно має місце в нормальному режимі експлуатації двигуна, обертовий момент є функцією ковзання, графік якої зображується кривою 1 (рис. 11.9).

З формули (11.36) і графіка випливає, що при малих ковзаннях ($s < s_K$) момент приблизно пропорційний ковзанню. Із збільшенням ковзання стає від-

чутнішим вплив s у знаменнику формули (11.36) і момент, досягши свого найбільшого значення M_k при ковзанні $s = s_k$, далі убуває до величини пускового моменту M_{Π} при $s = 1$. **Максимальний момент M_k і ковзання s_k , при якому він розвивається, називаються критичними.**

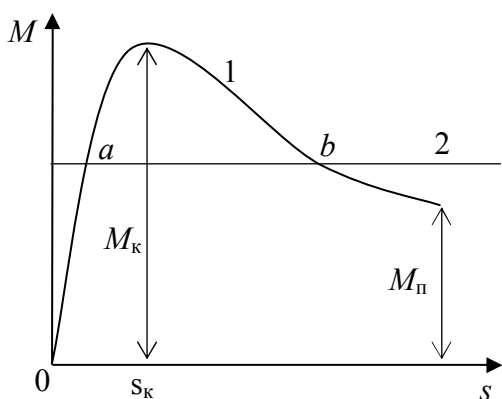


Рис.11.9 - Механічна характеристика АД

Двигун працює із сталою, тобто незмінною швидкістю обертання при рівновазі обертового моменту і моменту опору. Характер кривої моменту опору M_{on} залежно від ковзання (або швидкості) визначається властивостями робочого механізму. Якщо $M_{on}=F(s)$ має вид кривої 2 (рис. 11.9), то умова рівноваги моментів виконується при двох різних ковзаннях - точка a , якій відповідає невелике ковзання $s < s_k$, і точка b при ковзанні $s > s_k$. Однак для усталеної роботи

двигуна недостатньо простої рівноваги моментів. Необхідно, щоб двигун міг відновити рівновагу при можливих його порушеннях. Це можливо, тільки якщо

$$\frac{dM}{ds} > \frac{dM_{on}}{ds} \quad (11.37)$$

Як видно з рис. 11.9, зазначена нерівність має місце тільки в області $s < s_k$ (точка a), тобто на лівій частині кривої $M=F(s)$. Тому асинхронний двигун працює стійко лише при ковзаннях, менших критичного. Права частина кривої $M = F(s)$, що належить до області ковзань $s > s_k$ називається нестійкою. При таких ковзаннях двигун працювати не може. Так, при роботі з ковзанням, що відповідає точці b , будь-яке випадкове порушення рівноваги моментів в ту або іншу сторону викликає розгін двигуна до ковзань $s < s_k$ (перехід у точку a) або його зупинку.

Обертовий момент в режимі номінального навантаження, що відповідає допустимому нагріванню двигуна, повинен бути з певним запасом меншим за критичний M_k . Коли момент опору навантаження досягає величини критичного моменту, двигун переходить на нестійку частину характеристики $M = F(s)$ і зупиняється. Відбувається «перекидання» двигуна. Чим більшим є перевищення критичного моменту над номінальним, тим більші короточасні перевантаження здатний переборювати двигун. Перевантажувальну здатність двигуна прийнято характеризувати **коефіцієнтом перевантажувальної здатності k_m**

$$k_m = \frac{M_k}{M_H} \quad (11.38)$$

де M_H - номінальний момент двигуна.

Для АД звичайно $k_m = 1,6 \div 2,5$. При оцінці пускових властивостей двигуна важливе значення має величина початкового пускового моменту M_{Π} .

Для визначення критичного ковзання необхідно прирівняти до нуля похідну $\frac{dM}{ds}$ і розв'язати отриманий вираз відносно s . Такий аналіз показує, що

$$s_k = \frac{R_2}{X_{2H}}, \quad (11.39)$$

а сам критичний момент, який можна одержати з виразу (11.39) після підстановки значення $s = s_k$, дорівнює

$$M_k = C_1 \cdot U_1^2 \frac{1}{2X_{2H}}. \quad (11.40)$$

Звідси виходить, що, по-перше, *критичний момент*, а отже, і *перевантажувальна здатність асинхронного двигуна, залежить від квадрата напруги*. Це обумовлює високу чутливість цих двигунів до відхилень напруги мережі. Навіть при невеликих зниженнях напруги різко зменшується перевантажувальна здатність, що може викликати зупинку («перекидання») двигуна.

По-друге, величина M_k не залежить від активного опору ротора R_2 , але від R_2 залежить ковзання s_k . У двигунів з контактними кільцями за рахунок введеного до кола ротора додаткового активного опору можливо отримати ряд кривих $M = F(s)$. Залежність $M = F(s)$ визначає також зв'язок між швидкістю обертання і моментом.

Таким чином, графік $M=P(s)$ являє собою видозмінену, тобто побудовану в інших координатах, *механічну характеристику*. У звичайних координатах $n = P(M)$ вона має вигляд на рис. 11.10, де крива 1 - для двигуна короткозамкненого і двигуна з контактними кільцями без додаткового опору в колі ротора; крива 2 - для двигуна з контактними кільцями при введеному до кола ротора додатковому активному опорі.

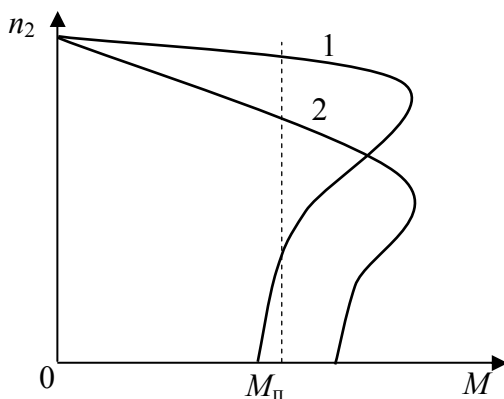


Рис.11.10 - Механічні характеристики АД

відомими величинами - M_k і s_k , які можна одержати з каталогу.

Перетворимо (11.36), підставивши замість U_1 його значення з (11.40):

$$M = \frac{C_1 \cdot 2M_k \cdot X_{2H} \cdot R_2 \cdot s}{C_1(R_2^2 + X_{2H}^2 \cdot s^2)} = \frac{2M_k}{\frac{R_2}{X_{2H} \cdot s} + \frac{X_{2H} \cdot s}{R_2}}. \quad (11.41)$$

З огляду на (11.39) маємо

$$M = \frac{2M_k}{\frac{s_k}{s} + \frac{s}{s_k}}. \quad (11.42)$$

Ця проста формула зручна для розрахунку механічної характеристики двигуна за двома

11.7. Робочі характеристики асинхронних двигунів

Під робочими характеристиками АД розуміють залежності ряду величин, що визначають ті або інші властивості двигуна, від корисної потужності P_2 , яка розвивається на валу двигуна, при постійній прикладеній напрузі мережі. До таких величин належать швидкість обертання n_2 або ковзання s , обертовий момент M , коефіцієнт потужності $\cos\phi$, ККД і струм статора I_1 .

Приблизний графік вказаних залежностей для двигуна нормального виконання зображений на рис. 11.11.

Залежність $n_2 = f(P_2)$ або $s = f(P_2)$ називається *швидкісною характеристикою*.

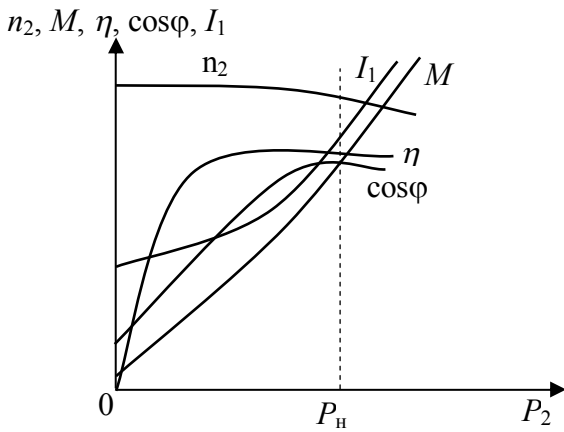


Рис.11.11 - Робочі характеристики АД

При холостому ході ($P_2 = 0$) швидкість обертання n_2 близька до синхронної n_1 (ковзання близьке до нуля). Із збільшенням навантаження швидкість обертання зменшується, ковзання зростає відповідно до відношення $s = \frac{P_{E.P}}{P_{EM}}$ (див. 11.28). З міркувань забезпечення високого ККД це відношення обмежується вузькими межами. Звичайно при $P_2 = P_n$ ковзання $s = 1,54 \div 5\%$. Відповідно $n_2 = f(P_2)$ являє собою слабо похилу до осі абсцис криву.

Моментна характеристика $M = f(P_2)$. Оскільки швидкість обертання двигуна в робочому діапазоні навантажень майже не змінюється, залежність $M = f(P_2)$ виявляється досить близькою до лінійної.

Залежність $\cos\phi = f(P_2)$. Внаслідок наявності в магнітному колі двигуна повітряного зазору струм статора містить порівняно велику реактивну складову. Це впливає на коефіцієнт потужності. Тому $\cos\phi$ АД завжди менший одиниці. Найбільше його значення ($0,8 \div 0,9$) має місце при номінальному навантаженні. Із зменшенням навантаження він різко убуває, досягаючи при холостому ході значень $0,15 \div 0,2$. Недовантажений асинхронний двигун має низький коефіцієнт потужності.

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

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

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

Головним чином за рахунок I_0 асинхронний двигун при відсутності навантаження споживає порівняно великий струм холостого ходу $I_{x.x}$. Він може бути більшим за 50% від номінального. Із зростанням навантаження струм статора зростає.

Крім перелічених, до робочих характеристик відносять також перевантажувальну здатність двигуна і його механічну характеристику.

11.8. Пуск асинхронних двигунів

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

У початковий момент пуску ротор АД нерухомий і в його обмотці індуктується ЕРС максимальної величини, частота якої дорівнює частоті живлячої

напруги. Ковзання ротора в цей момент часу $s = 1$, і струм ротора досягає найбільшого значення. Споживаний двигуном струм при $s = 1$ називається пусковим струмом $I_{\text{п}}$. Кратність пускового струму відносно номінального струму $I_{\text{н}}$ велика і звичайно становить $k_{\text{п}} = 5 \div 7$.

Залежно від типу двигуна, його потужності, опору навантаження виконавчого механізму використовують різні способи пуску АД.

11.8.1. Пуск АД з короткозамкненим ротором. Пуск АД шляхом безпосереднього підключення до мережі змінного струму без обмеження струмів називають *прямим пуском*. Втрати в обмотках АД пропорційні квадрату струму, тому тривалість прямого пуску обмежують, щоб уникнути перегріву обмоток і виходу з ладу двигуна.

Прямий пуск застосовують для двигунів з короткозамкненим ротором, які використовують для приводу механізмів з невеликим моментом інерції і час розгону яких до сталої швидкості порівняно невеликий. Схема прямого пуску АД (рис. 11.12) досить проста, що сприяло її широкому поширенню. Для прямого

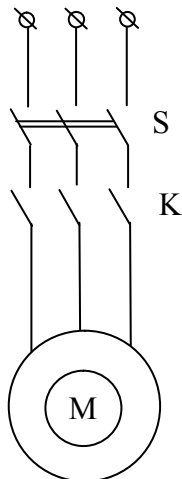


Рис.11.12 - Схема прямого пуску АД

пуску необхідно, щоб обертовий момент АД перевищував момент опору механізму. Пуск двигунів механізмів з великим моментом інерції здійснюється або подачею зниженої напруги на АД, або введенням до кола статора струмообмежуючих опорів. При пуску за схемою з струмообмежуючими опорами (рис. 11.13) спочатку включається контактор К і розгін двигуна здійснюється з ввімкненими в коло обмотки статора активними (рис. 11.13,а) або реактивними (рис. 11.13,б) опорами. Потім з витримкою часу включається

контактор К1 і своїми контактами шунтує струмообмежуючі опори в колі обмотки статора. Пуск за схемою 11.13,б називається реакторним.

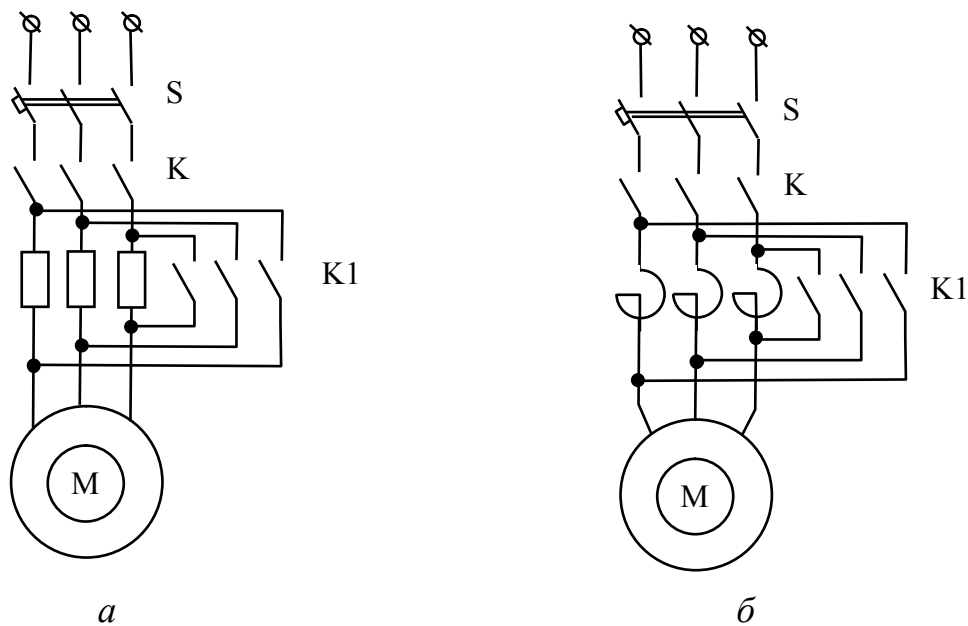


Рис.11.13. Схема пуску асинхронного двигуна: *а* – з активними опорами в колі статора; *б* – з реактивними опорами в колі статора

11.8.2. Пуск асинхронних двигунів з фазним ротором. Основною позитивною якістю цих двигунів є можливість введення додаткових опорів у коло ротора, а, отже, обмеження струму ротора в період пуску.

На рис. 11.14,а показано схему реостатного пуску з введенням у коло ротора резисторів. У цьому випадку пуск АД найчастіше здійснюється у функції часу. Для включення двигуна командоконтролер (кола керування на схемі не показані) ставиться у вихідне положення, при якому контакти 1КУ – 3КУ розімкнуті і у коло ротора повністю введені резистори R_1 , R_2 і R_3 . Після пуску двигуна (замикання силових контактів пускача S) з витримкою часу t_1 замикаються контакти контактора прискорення 1КУ, які шунтують перший ступінь резисторів $R_1 - R_3$. Далі з витримкою часу t_2 замикаються контакти контактора прискорення 2КУ, які шунтують другий ступінь резисторів $R_1 - R_3$. І з витримкою часу t_3 шунтується третій ступінь резисторів $R_1 - R_3$.

Включення активних опорів у ротор АД приводить до збільшення критичного ковзання:

$$s_k = \frac{c_1(R_2' + R_{2д}')}{\sqrt{R_1^2 + (X_{1\sigma} + c_1 \cdot X_{2\sigma}')^2}}, \quad (11.43)$$

де $R_{2д}$ – додатковий активний опір у колі ротора, приведений до обмотки статора АД.

Зростання s_k , у свою чергу, збільшує нахил механічних характеристик (рис. 11.14,б). Критичний момент АД не залежить від активного опору роторного кола, його величина, незважаючи на включення $R_{2д}'$, зберігається незмінною. Схему керування реостатним пуском виконують таким чином, щоб моменти перемикання $M_{п1}$ і $M_{п2}$ для всіх ступенів пуску були однаковими.

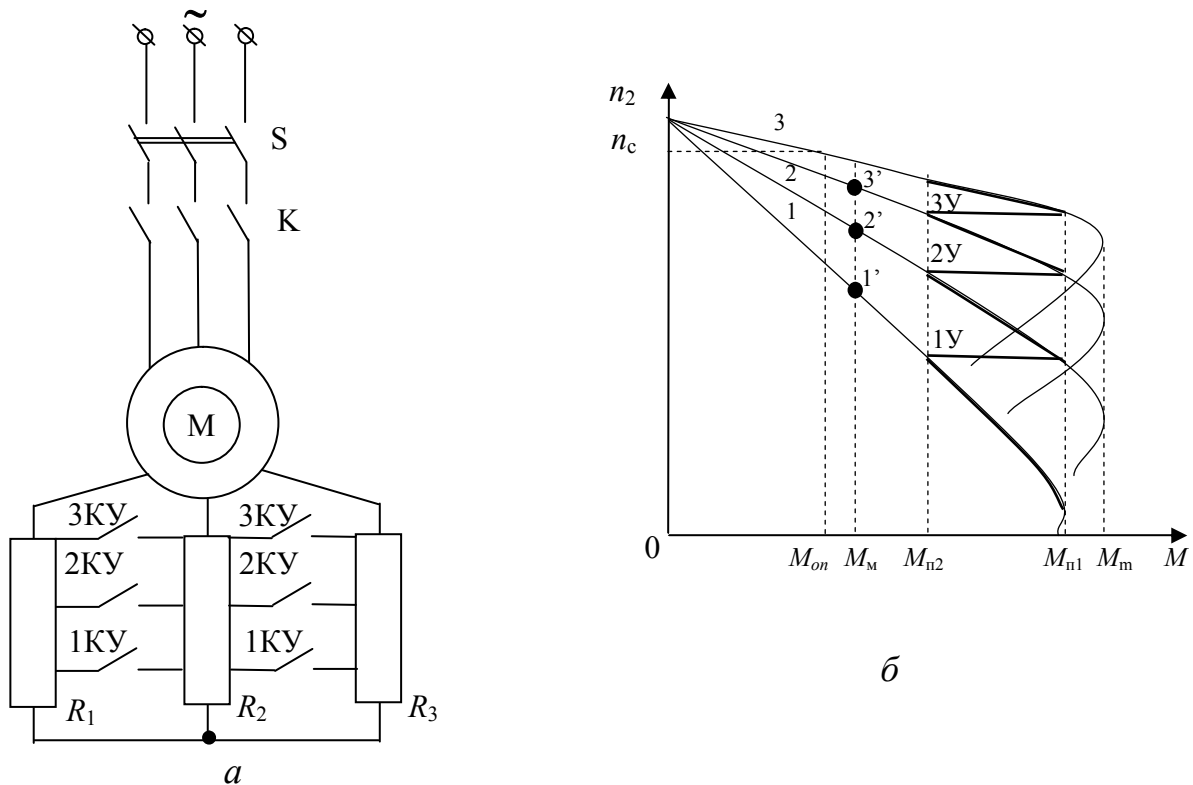


Рис.11.14 - Схема (а) і пускова діаграма (б) реостатного пуску колекторного АД

На рис. 11.14,б пусковим механічним характеристикам 1, 2, 3 відповідають додаткові активні опори $R_{2д1} > R_{2д2} > R_{2д3}$. Після включення АД працює на характеристиці 1. У точці 1У включаються контакти 1КУ і АД переходить на характеристику 2, а в точці 2У відбувається його перехід на характеристику 3. Після шунтування додаткових резисторів у точці 3У АД переходить на природну характеристику і досягає сталої швидкості n_c , обумовленої моментом опору M_{on} . Значення моменту перемикавання $M_{п2}$ визначається величинами витримки реле часу кіл керування, які настраюються на необхідні значення.

На практиці застосовують також інші схеми пуску АД [2.2].

11.9. Механічні характеристики асинхронного двигуна в гальмових режимах

У розділі 11.6 були розглянуті механічні характеристики асинхронної машини, яка працює в режимі двигуна. Однак АД працює й у гальмових режимах: режимі гальмування з віддачею енергії до мережі, режимі гальмування противключенням і режимі динамічного гальмування.

Механічні характеристики асинхронного двигуна в координатах M і ω представлені на рис. 11.15. У квадранті I розташовані ділянки характеристик режиму двигуна для трьох різних опорів роторного кола. У міру наближення швидкості двигуна до швидкості ідеального холостого ходу, або синхронної швидкості, момент двигуна наближається до нуля.

При подальшому збільшенні кутової швидкості під впливом зовнішнього моменту, коли $\omega = \omega_0$, двигун переходить у режим генератора і працює паралельно з мережею, якій він віддає електричну енергію, споживаючи при цьому реакти-

вну потужність для збудження. Гальмуванню з віддачею енергії до мережі відповідають ділянки характеристик, розташовані у верхній частині квадранта II. У цьому режимі значення максимального моменту перевищує максимальний момент режиму двигуна. Цей режим застосовують для двигунів з перемиканням полюсів, а також для приводів вантажопідйомних машин і в деяких інших випадках.

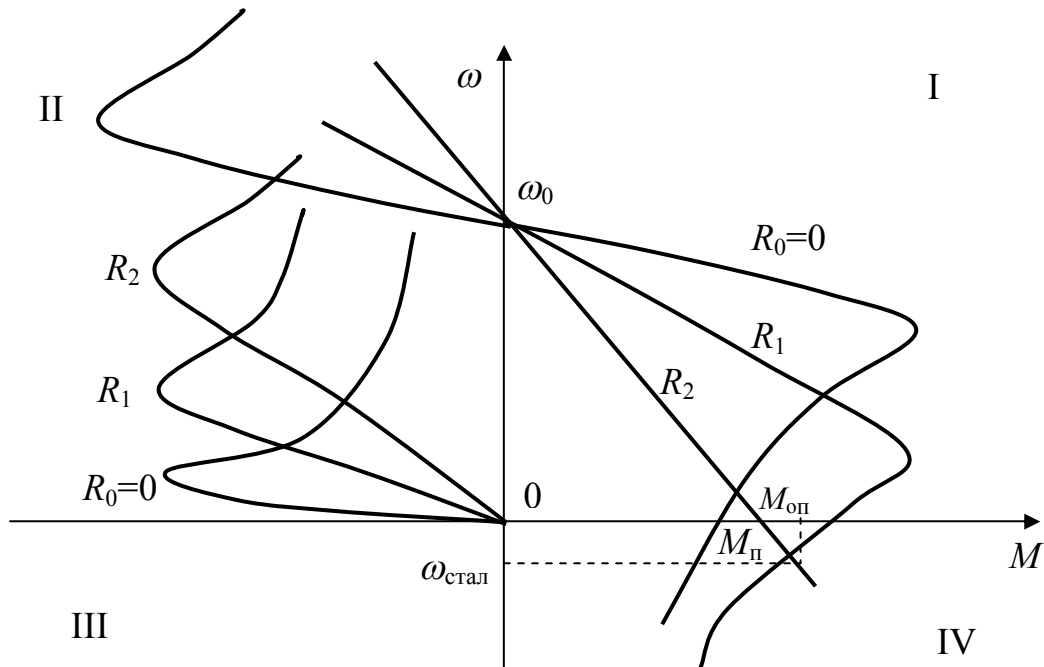


Рис. 11.15 - Механічні характеристики АД в різних режимах роботи

Гальмування противключенням застосовують на практиці частіше. Цей режим отримують, так само як і для двигуна постійного струму, при русійному моменті навантаження $M_{оп} > M_{п}$. Щоб обмежити струм і одержати відповідний момент необхідно при використанні двигуна з фазним ротором у його роторне коло включити додатковий резистор. Сталому режиму при гальмуванні противключенням відповідає на рис. 11.15 точка $(\omega_{стал}, M_{оп})$ на характеристиці R_2 .

Механічна характеристика R_1 у режимі гальмування противключенням і $M_{оп} = const$ не забезпечують усталеної роботи. Гальмування противключенням може бути отримане також шляхом перемикання на ходу двох фаз обмотки статора, що веде до зміни напрямку обертання магнітного поля (перехід із точки А до точки В на рис. 11.16). Ротор при цьому обертається проти напрямку руху поля і поступово сповільнюється. Коли кутова швидкість спаде до нуля (точка С на рис. 11.16), двигун потрібно відключити від мережі, інакше він може знову перейти в режим двигуна, причому його ротор буде обертатися в напрямку, зворотному попередньому (точка D).

Динамічне гальмування асинхронного двигуна здійснюється звичайно включенням обмотки статора на мережу постійного струму; обмотка ротора при цьому замикається на зовнішні резистори. Для переходу з режиму двигуна

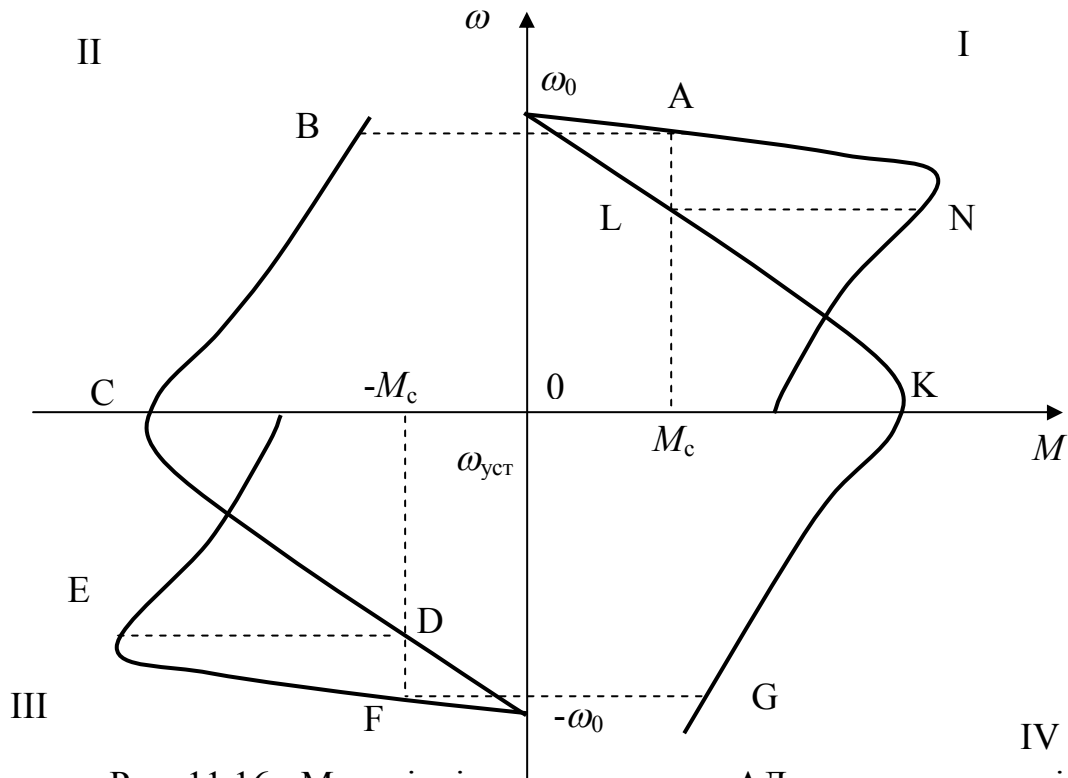


Рис. 11.16 - Механічні характеристики АД при перемиканні двох фаз статора

в режим динамічного гальмування контактор К1 (рис. 11.17) відключає статор від мережі змінного струму, а контактор К2 приєднує обмотку статора до мережі постійного струму. Для обмеження струму й одержання різних гальмових характеристик у колі ротора передбачені зовнішні резистори.

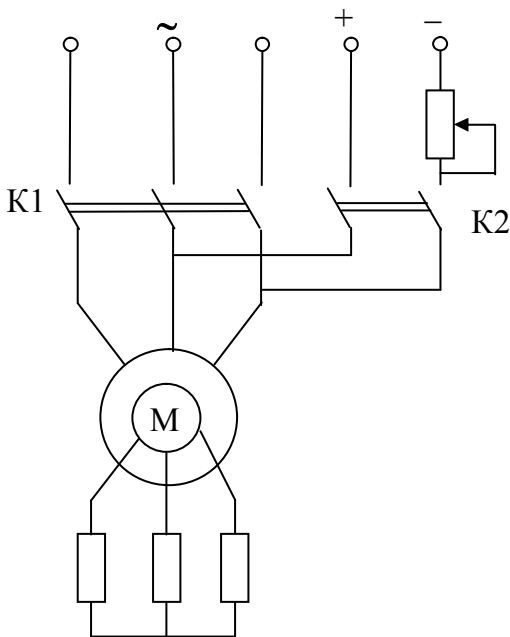


Рис.11.17 - Схема включення АД для переходу на режим динамічного гальмування

Проходячи по обмотці статора, постійний струм утворює нерухоме поле, основна хвиля якого дає синусоїдальний розподіл індукції. В обертовому роторі виникає змінний струм, який створює своє поле, що також нерухоме відносно статора. У результаті взаємодії сумарного магнітного потоку із струмом ротора виникає гальмовий момент, який залежить від магнітотривної сили статора, опору ротора і кутової швидкості двигуна. Механічні характеристики для цього режиму приведені в нижній частині квадранта II (рис. 11.15). Вони проходять через початок координат, оскільки при кутовій швидкості, яка дорівнює нулю, гальмовий момент також дорівнює нулю. Максимальний момент пропорційний

квадрату прикладеної до статора напруги і зростає із зростанням напруги. Критичне ковзання залежить від опору роторного кола. Воно збільшується пропорційно зростанню опору. Максимальний момент при цьому не змінюється. На рис. 11.15 характеристики динамічного гальмування надані для трьох різних опорів кола ротора і тому самому струмі статора.

На практиці найчастіше застосовують гальмування противключенням, особливо коли потрібно здійснити зміну напрямку обертання (реверс) або динамічне гальмування, коли реверс не потрібний.

11.10. Однофазний асинхронний двигун

Однофазний двигун має одну обмотку, розташовану на статорі. Однофазна обмотка, що живиться змінним струмом, створює пульсуюче магнітне поле. Якщо помістити в це поле ротор з короткозамкненою обмоткою, він обертається не буде. Якщо ж розкрутити ротор сторонньою механічною силою в будь-яку сторону, двигун буде стійко працювати. Пояснити це можна в такий спосіб. Пульсуюче магнітне поле можна замінити двома магнітними полями, що обертаються у протилежних напрямках з синхронною частотою n_1 і мають амплітуди магнітних потоків, які дорівнюють половині амплітуди магнітного потоку пульсуючого поля. Одне з магнітних полів називається прямим, друге - зворотним. Кожне з магнітних полів індуктує у роторній обмотці вихрові струми. При їх взаємодії з магнітними полями утворюються обертові моменти, спрямовані назустріч один одному.

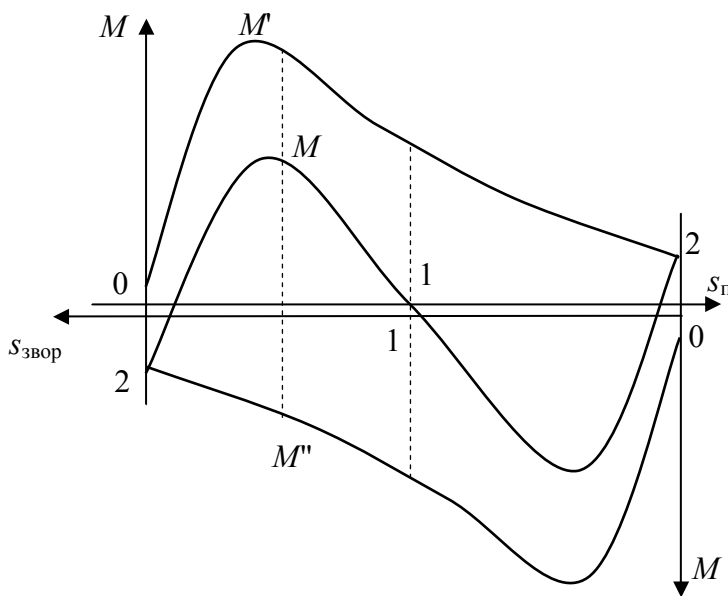


Рис. 11.18 - Залежності прямого й зворотного моментів однофазного двигуна від ковзання

На рис. 11.18 зображені залежності моменту від прямого поля M' , моменту від зворотного поля M'' і результуючого моменту $M = M' - M''$ у функції ковзання s . Осі ковзань спрямовані назустріч одна до одної. У пусковому режимі на ротор діють обертові моменти, однакові за величиною і протилежні за напрямком.

Якщо розкрутити ротор сторонньою силою в напрямку прямого магнітного поля, з'явиться надлишковий (результуючий) обертовий момент, що розганяє ротор до швидкості, близької до синхронної. При цьому ковзання двигуна відносно

прямого магнітного поля $s_n \approx 0$, $n_1 \approx n_2$.

Ковзання двигуна відносно зворотного магнітного поля

$$s \approx \frac{n_1 - (-n_1)}{n_1} \approx 2.$$

Розглядаючи результуючу характеристику, можна зробити наступні висновки:

1. Однофазний двигун не має пускового моменту. Він буде обертатися в ту сторону, в яку розкручений зовнішньою силою.

2. Через гальмову дію зворотного поля характеристики однофазного двигуна гірші, ніж трифазного.

Однофазний асинхронний двигун (рис. 11.19) розраховують на живлення від однофазної мережі, він має на статорі дві обмотки: робочу А і пускову Б; ротор двигуна виконують короткозамкненим. Змінний струм, протікаючи по робочій обмотці, що займає звичайно 2/3 пазів статора, створює пульсуючу намагнічуючу силу, а остання - пульсуюче магнітне поле.

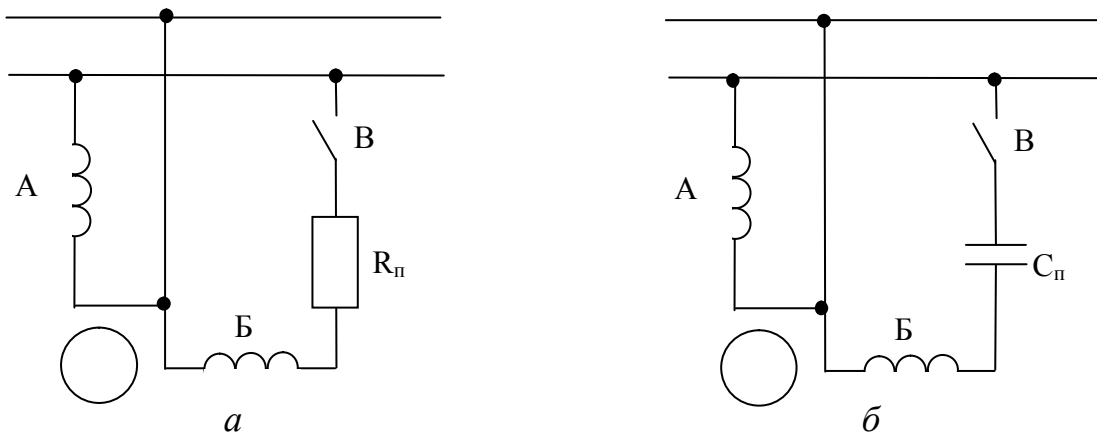


Рис.11.19 - Схеми включення однофазного двигуна:
а - з активним опором; б - з конденсатором

Для пуску однофазного асинхронного двигуна використовують пускову обмотку Б, зміщену в просторі відносно робочої обмотки на 90° . При цьому струми робочої і пускової обмоток повинні бути зміщені в часі, що досягається підключенням їх або до симетричної двофазної мережі, або до однофазної мережі. В останньому випадку для одержання зрушення фаз між струмами в обмотках робочу обмотку А підключають до мережі безпосередньо, а пускову Б - через активний опір (рис. 11.19,а) або конденсатор (рис. 11.19,б). Пускова обмотка Б включається тільки на період пуску двигуна; при частоті обертання порядку 0,7 від синхронної частоти обертання пускова обмотка за допомогою кнопки-вимикача або електромагнітного реле відключається і двигун далі працює як однофазний.

Однофазні асинхронні двигуни в порівнянні з трифазними мають гірші експлуатаційні характеристики, менші ККД і коефіцієнти потужності.

Від однофазної мережі можуть працювати й трифазні асинхронні двигуни, якщо використати одну із схем, представлених на рис. 11.20.

У схемі на рис.11.20,а статорні обмотки з'єднані «зіркою», а в схемі на рис.11.20,б – «трикутником». Конденсатор С є пусковим, включається до мережі тільки на час пуску і величина його ємності $C \approx 60$ мкф на 1 кВт потужності двигуна. Використовують ще інші схеми включення трифазних АД до однофазної мережі, наприклад, через активний опір.

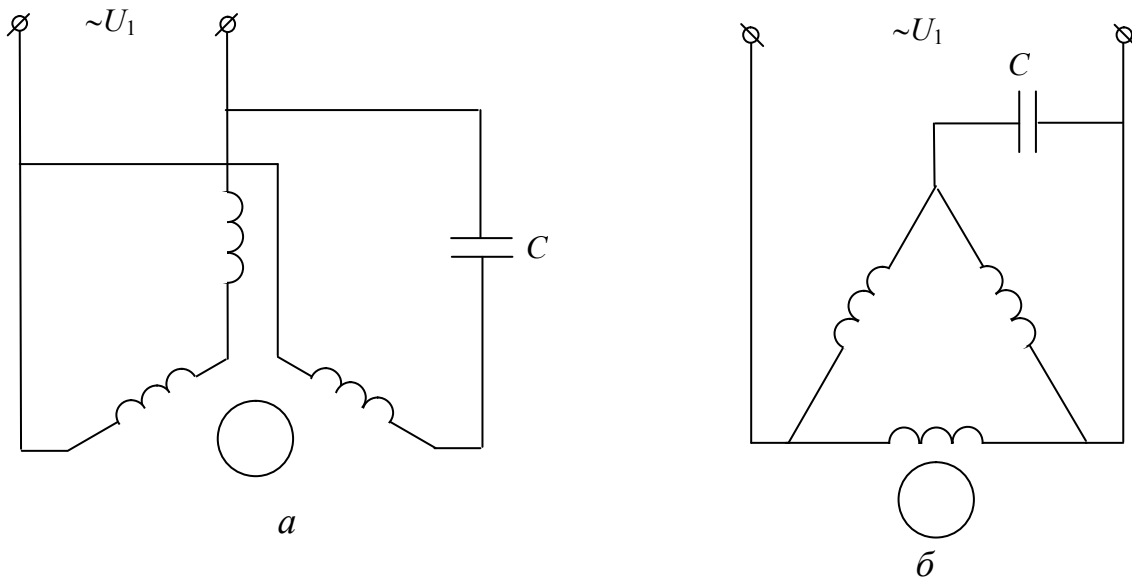


Рис.11.20 - Схеми включення трифазних двигунів в однофазну мережу

Трифазні двигуни, працюючи в однофазному режимі, можуть розвивати потужність $P = (0,45 \div 0,65) P_{\text{ном}}$, де $P_{\text{ном}}$ - номінальна потужність трифазного двигуна.

Контрольні запитання з теми 11

1. Як виконують магнітопровід АД?
2. Поясніть принцип виконання обмотки статора АД.
3. Як виконують обмотку ротора короткозамкненого двигуна?
4. Поясніть будову обмотки ротора двигуна з контактними кільцями.
5. Як вибирають схему з'єднань обмоток статора і як встановити одноім'яні виводи фазних обмоток статора?
6. Від чого залежить швидкість обертання магнітного поля? Чим визначається число пар полюсів двигуна?
7. Як створюється обертовий момент АД, чому ротор не може самостійно досягти синхронної швидкості обертання?
8. Як визначають ковзання й швидкість обертання ротора і як впливає на АД зміна навантаження на валу?
9. Що розуміють під механічною характеристикою двигуна і який вигляд механічної характеристики АД?
10. Як визначають діючі значення фазних ЕРС статора й ротора?
11. Як залежать ЕРС ротора й частота струму ротора від ковзання?
12. Як враховують ЕРС розсіювання статора й ротора?
13. Поясніть роль ЕРС статора. Як записується рівняння напруг статора?
14. Запишіть рівняння напруг ротора. Як залежить від ковзання струм ротора і його фаза?
15. На підставі яких рівнянь будується повна векторна діаграма й схема заміщення асинхронного двигуна? Як будується векторна діаграма?
16. Які види втрат потужності мають місце в АД? Що розуміють під електромагнітною й механічною потужністю двигуна?

17. Визначте поняття «номінальна потужність двигуна».
18. Як залежать електричні втрати в роторі від ковзання?
19. Від чого залежить обертовий момент двигуна?
20. Проаналізуйте залежність обертового моменту від ковзання.
21. Що розуміють під коефіцієнтом перевантажувальної здатності і яка його величина для звичайних АД?
22. Поясніть умову усталеної роботи двигуна.
23. Від чого і як залежить критичний момент і критичне ковзання?
24. Які є можливості впливу на механічну характеристику АД?
25. За якими показниками оцінюють пускові властивості двигуна?
26. Позитивні якості й недоліки прямого пуску асинхронних короткозамкнених двигунів.
27. Позитивні якості й недоліки запуску двигунів на зниженій напрузі.
28. Як пускають в хід двигуни з контактними кільцями? Дайте загальну оцінку їхніх пускових властивостей.
29. Що розуміють під робочими характеристиками двигуна? Поясніть характер цих залежностей для АД.
30. Умова переходу асинхронного двигуна до генераторного режиму. Поясніть практичне значення такого режиму.
31. Які можливі способи гальмування асинхронного двигуна? Дайте їхню оцінку й поясніть практичне значення.
32. Поясніть будову і принцип дії однофазного АД.
33. Як пускають в хід однофазні двигуни?

Задачі до теми 11 і приклади їхнього розв'язання

Задача 11.1. Багатополюсний двигун при номінальному навантаженні працює з ковзанням $s = 4\%$. Частота мережі $f_1 = 50$ Гц. Визначити швидкість обертання двигуна. Вихідні дані наведені в табл.11.1.

Таблиця 11.1

Параметр	Варіант завдання										
	К	0	1	2	3	4	5	6	7	8	9
Число полюсів	6	6	6	6	6	6	4	4	4	4	4
$s, \%$	4	3,6	3,2	2,8	4,4	4,8	3,3	3,5	3,8	4,2	4,5
$f_1 = 50$ Гц.	50	60	50	60	50	60	50	60	50	60	50

Розв'язання задачі для варіанта К.

Число пар полюсів $p = 6/2 = 3$; синхронна швидкість

$$n_1 = f_1 \cdot 60/p = 50 \cdot 60/3 = 1000 \text{ об/хв.}$$

Швидкість обертання ротора

$$n_2 = n_1 \cdot (1 - s) = 1000 \cdot (1 - 0,04) = 960 \text{ об/хв.}$$

Задача 11.2. Швидкість обертання асинхронного двигуна при номінальному навантаженні становить n_2 об/хв, при холостому ході - n_{xx} об/хв. Визначити ковзання при навантаженні й холостому ході; $f_1 = 50$ Гц. Шкала частот обертання: 3000, 2200, 1600, 1500, 1000, 850, 800, 750, 650, 600 об/хв. Вихідні дані наведені в табл.11.2.

Таблиця 11.2

Параметр	Варіант завдання										
	К	0	1	2	3	4	5	6	7	8	9
n_{xx} , об/хв	2940	2160	1550	820	630	580	580	740	730	780	840
n_2 , об/хв	2850	2040	1320	740	560	510	490	680	660	690	760
$f_1 = 50$ Гц.	50	50	50	50	60	60	50	60	50	60	50

Розв'язання задачі для варіанта К.

Синхронна швидкість для даного двигуна $n_1 = 3000$ об/хв (найближча більша). Ковзання при навантаженні

$$s = \frac{n_1 - n_2}{n_1} 100 = \frac{3000 - 2850}{3000} 100 = 5\% ;$$

при холостому ході

$$s = \frac{3000 - 2940}{3000} 100 = 2\% .$$

Задача 11.3. Двигун з контактними кільцями включений до мережі з напругою U_H , В. На розімкнутих кільцях ротора обмірювана напруга U_2 , В. Число витків фазних обмоток статора – $w_1 = 60$, обмотувальний коефіцієнт - $k_1 = 0,94$, обмоток ротора – $w_2 = 36$, $k_2 = 0,96$. Обмотки з'єднані «зіркою». Частота мережі f_1 Гц. Визначити потік, що проходить через полюси двигуна, і ЕРС статора E_1 . Вихідні дані наведені в табл.11.3.

Таблиця 11.3

Параметр	Варіант завдання										
	К	0	1	2	3	4	5	6	7	8	9
U_H , В	380	380	220	220	400	400	400	390	390	380	380
U_2 , В	228	224	129	127	300	292	268	240	236	210	216
w_1 , витків	60	60	54	54	66	68	70	64	62	62	60
k_1	0,94	0,92	0,94	0,92	0,95	0,94	0,95	0,95	0,94	0,94	0,93
w_2 , витків	36	35	32	30	40	38	42	40	38	38	36
k_2	0,96	0,94	0,96	0,92	0,93	0,96	0,96	0,96	0,95	0,96	0,94
f_1 , Гц	50	50	50	50	60	60	60	60	50	50	50

Розв'язання задачі для варіанта К.

Фазна ЕРС нерухомого ротора

$$E_{2H} = \frac{U_2}{\sqrt{3}} = \frac{228}{1,73} = 132 \text{ В.}$$

Потік
$$\Phi = \frac{E_{2H}}{4,44 f_1 \cdot w_2 \cdot k_2} = \frac{132}{4,44 \cdot 50 \cdot 36 \cdot 0,96} = 0,0173 \text{ Вб.}$$

ЕРС статора

$$E_1 = 4,44 \cdot f_1 \cdot w_1 \cdot k_1 \cdot \Phi = 4,44 \cdot 50 \cdot 60 \cdot 0,94 \cdot 0,0173 = 216 \text{ В.}$$

Задача 11.4. Визначити величину й фазу номінального струму ротора двигуна з контактними кільцями, при заданих E_{2H} , R_2 , X_{2H} і s_H .

Вихідні дані наведені в табл.11.4.

Таблиця 11.4

Параметр	Варіант завдання										
	К	0	1	2	3	4	5	6	7	8	9
E_{2H} , В	132	130	126	122	136	140	138	135	133	137	131
R_2 , Ом	0,24	0,22	0,2	0,2	0,25	0,27	0,26	0,25	0,23	0,27	0,22
X_{2H} , Ом	1,2	1,1	1,0	1,2	1,3	1,4	1,35	1,3	1,1	1,4	1,1
s_H	0,035	0,03	0,04	0,02	0,04	0,06	0,05	0,02	0,03	0,04	0,035

Розв'язання задачі для варіанта К.

$$I_{2H} = \frac{E_{2H} \cdot s}{\sqrt{R_2^2 + X_{2H}^2 \cdot s_H^2}} = \frac{132 \cdot 0,035}{\sqrt{0,24^2 + 1,2^2 \cdot 0,035^2}} = 19 \text{ А};$$

$$\operatorname{tg} \psi_2 = \frac{X_{2H} \cdot s_H}{R_2} = \frac{1,2 \cdot 0,035}{0,24} = 0,175; \quad \psi_2 = 9055'.$$

Якщо при визначенні номінального струму ротора знехтувати індуктивним опором $X_2 = X_{2H} \cdot s$, матимемо

$$I_{2H} = \frac{E_{2H} \cdot s}{R_2} = \frac{132 \cdot 0,035}{0,24} = 19,2 \text{ А}.$$

Задача 11.5. Номінальна потужність двигуна P_H кВт, напруга U_H В, ККД η_H , коефіцієнт потужності $\cos \varphi_H$, втрати в сталі ΔP_c від P_H . Втрати потужності в обмотках статора в номінальному режимі $\Delta P_{E.C}$ від P_H . Визначити споживаний струм і електромагнітну потужність двигуна в номінальному режимі. Вихідні дані наведені в табл.11.5.

Таблиця 11.5

Параметр	Варіант завдання										
	К	0	1	2	3	4	5	6	7	8	9
P_H , кВт	10	11	7,5	7,5	5,5	5,5	4	4	3	2,2	2,2
U_H , В	380	380	380	380	380	380	380	220	220	220	220
η_H	0,88	0,9	0,78	0,84	0,86	0,88	0,86	0,85	0,84	0,84	0,82
$\cos \varphi_H$	0,87	0,84	0,87	0,86	0,85	0,84	0,8	0,84	0,82	0,8	0,76
ΔP_c	0,05	0,04	0,04	0,05	0,04	0,06	0,05	0,04	0,06	0,06	0,05
$\Delta P_{E.C}$	0,03	0,05	0,03	0,03	0,02	0,05	0,04	0,03	0,04	0,03	0,03

Розв'язання задачі для варіанта К.

Споживана потужність

$$P_1 = \frac{P_H}{\eta_H} = \sqrt{3} U_H \cdot I_H \cdot \cos \varphi_H.$$

Номінальний струм

$$I_H = \frac{P_H}{\sqrt{3} U_H \cdot \cos \varphi_H \cdot \eta_H} = \frac{10 \cdot 10^3}{1,73 \cdot 380 \cdot 0,87 \cdot 0,88} = 20 \text{ А}.$$

Електромагнітна потужність у номінальному режимі

$$P_{EM} = P_1 - P_c - P_{E.C} = P_H / \eta_H - 0,05 \cdot P_H - 0,03 \cdot P_H =$$

$$= 10 / 0,88 - 0,05 \cdot 10 - 0,03 \cdot 10 = 10,55 \text{ кВт}.$$

ТЕМА 12 СИНХРОННІ ЕЛЕКТРИЧНІ МАШИНИ

Ключові поняття: збудник, неявнополіусний ротор, явнополіусний ротор, індуктор, якір, характеристика холостого ходу СМ, зовнішня характеристика СГ, номінальний струм збудження, електромагнітна потужність, кутова характеристика, синхронізація.

Синхронні машини (СМ) застосовують як генератори на електричних станціях і як двигуни змінного струму в нерегульованому електроприводі промислових установок (насосів, компресорів, повітродувок, млинів різного призначення, прокатних станів, дизель-генераторних установок та ін.). Основна позитивна якість синхронних двигунів полягає в можливості працювати з високим коефіцієнтом потужності, що приводить до поширеного їхнього застосування.

Кутова швидкість синхронного двигуна при роботі в сталому режимі із зростанням навантаження на валу до певного значення, що не перевищує максимальний момент M_{\max} , залишається строго постійною і дорівнює синхронній кутовій швидкості:

$$\omega_0 = \frac{2\pi \cdot f}{p} \quad (12.1)$$

12.1. Будова синхронних машин

СМ, як і інші електричні машини, може використовуватися як генератор і як двигун. За будовою СМ мають багато загального з асинхронними. Статор СМ не відрізняється від статора асинхронної (рис. 12.1) - таке ж зібране з листової сталі осердя, той же принцип виконання і з'єднання його обмотки. Ротор СМ являє собою електромагніт постійного струму. Його обмотка живиться від стороннього джерела. Вона називається **обмоткою збудження**. З'єднання обмотки ротора з джерелом постійного струму здійснюється за допомогою двох контактних кілець на валу і нерухомих щіток. Як джерело постійного струму для живлення обмотки збудження ротора використовують генератор постійного струму, який монтується на одному валу з ротором. Такий генератор називають **збудником**. Потужність, необхідна для живлення обмотки збудження, невелика і відповідно потужність збудника становить близько 0,3 ÷ 5% від номінальної потужності СМ. Для великих СМ встановлюють ще резервний збудник. Можливе також живлення обмотки збудження від мережі змінного струму, підключеної до статора через випрямлячі.

Застосовують два типи ротора синхронних машин - **ротор неявнополіусний**, або з неявно вираженими полюсами, і **ротор** з явно вираженими полюсами, або **явнополіусний**. У першому випадку осердя ротора являє собою масивне циліндричне тіло з сталі (бочка ротора) з поздовжніми пазами, в які розміщують обмотку збудження (рис. 12.1,а). Пази й обмотка збудження розміщуються так, щоб одержати синусоїдальний розподіл індукції в зазорі між осердями ротора і статора. Загальний вигляд неявнополіусного ротора показаний на рис. 12.1,б. Такий ротор застосовують при числі пар полюсів $p \leq 2$.

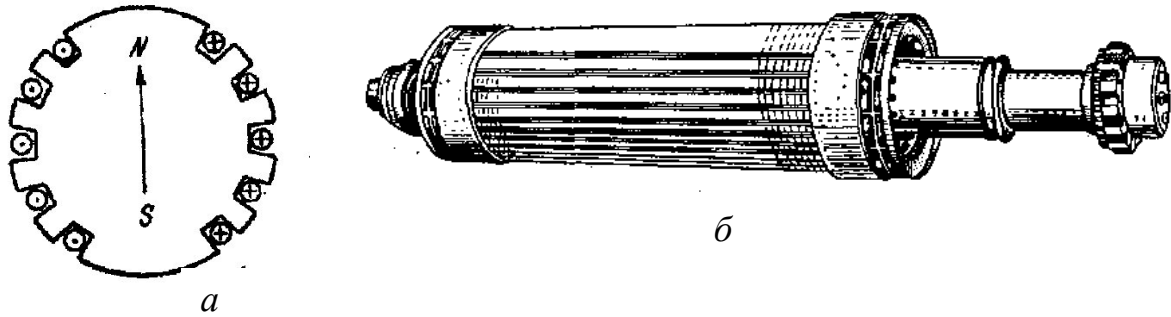


Рис.12.1 - Ротор неявнополюсної СМ: *a* - поперечний переріз;
б - загальний вигляд

Явнополюсний ротор складається з масивного сталевого колеса, насадженого на вал. На зовнішній поверхні колеса кріпляться виготовлені з листової сталі осердя полюсів (рис. 12.2,а). Для малих машин і при не занадто великому числі полюсів замість колеса на вал встановлюють сталеву втулку, до якої кріпляться полюси. Обмотка збудження у вигляді котушок розміщується на осердях полюсів. Для одержання синусоїдального розподілу індукції зазор між поверхнею полюсного наконечника і внутрішньою поверхнею статора робиться нерівномірним за рахунок особливої форми полюсних наконечників. Синусоїдальний розподіл індукції в зазорі необхідний для одержання синусоїдальної ЕРС в обмотках статора. Загальний вид явнополюсного ротора показаний на рис. 12.2,б.

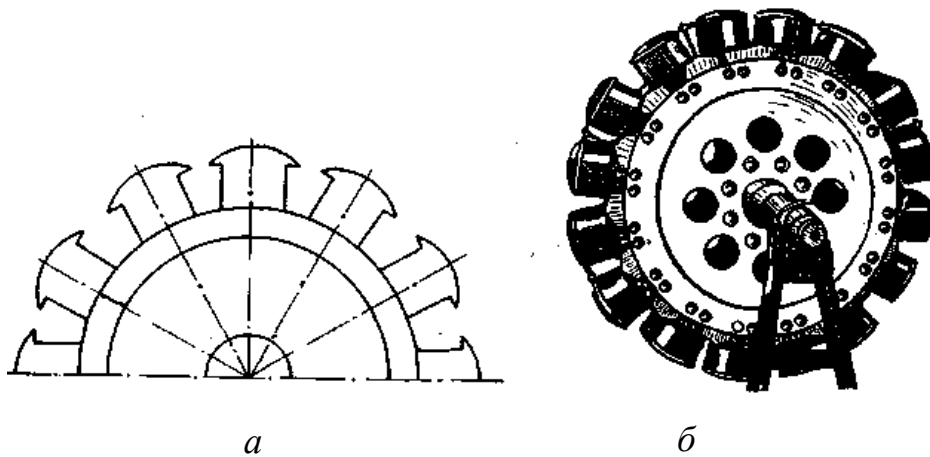


Рис.12.2 - Ротор явнополюсної СМ:
a - поперечний переріз; *б* - загальний вигляд

Таким чином, *синхронна машина*, як і асинхронна, *складається з магнітопровода, обмоток і механічних частин*. Магнітопровід містить осердя полюсів, обід ротора, або просте тіло неявнополюсного ротора, осердя статора і зазор між ротором і статором (рис. 12.3). Обмотка змінного струму СМ розміщується в пазах осердя статора. Для трифазних машин - це три фазні обмотки, зміщені у просторі на 120 електричних градусів. Ротор несе на собі обмотку збудження, що живиться постійним струмом. Механічні частини включають литий або зварений корпус, вал, підшипникові щити або стояки та інші деталі, необхідні для монтажу і зборки машини. У машин з неявнополюсним ротором вал звичайно відковують заодно з осердям ротора. Ротор синхронної машини як джерело магнітного поля називають *ін-*

дуктором. Частину машини, в обмотці якої при роботі індуктується ЕРС, прийнято називати **якорем**. У СМ звичайної конструкції якорем є статор.

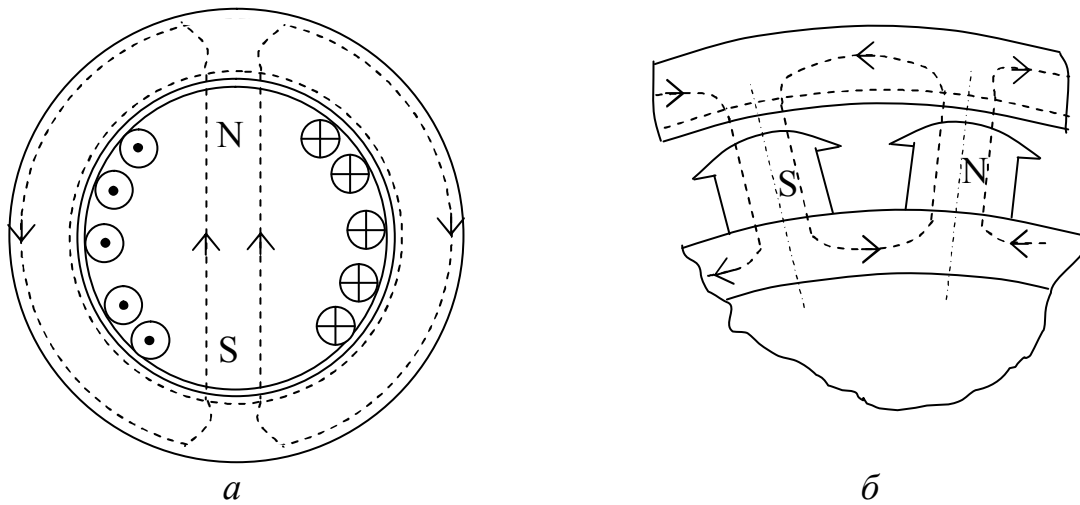


Рис.12.3 - Магнітний потік СМ: *а* - неявнополюсна; *б* - явнополюсна

12.2. Синхронний генератор

У синхронному генераторі (СГ) відбувається перетворення механічної енергії на електричну. Ротор генератора з постійним магнітним полем приводиться в обертання первинним двигуном (паровою або гідравлічною турбіною, дизелем та ін.). Внаслідок електромагнітної індукції в обмотках статора (якоря) індуктуються змінні ЕРС. Оскільки в статорі трифазного генератора розміщуються три однакові, симетрично зміщені у просторі на 120 електричних градусів обмотки, їхні ЕРС однакові за своїми діючими і амплітудними значеннями і симетрично зміщені за фазою на 120°. Частота ЕРС якоря визначається швидкістю обертання і числом пар полюсів ротора (12.1). Частота струму стандартизована і повинна бути постійною. З виразу (12.1) видно, що для одержання заданої частоти змінного струму необхідно забезпечити постійну, таку що не залежить від навантаження і дорівнює ω_0 швидкість обертання. З цією метою первинні двигуни на електричних станціях обладнують автоматичним регулюванням швидкості.

Необхідна для заданої частоти швидкість обертання ротора тим менша, чим більше число пар полюсів p . Тому генератори, що працюють від тихохідних первинних двигунів, роблять багатополюсними.

За родом первинного двигуна розрізняють **два типи синхронних генераторів - турбогенератори і гідрогенератори**. Перші встановлюють на теплових електричних станціях, вони працюють від парових турбін, другі застосовуються на гідроелектростанціях. Потужності сучасних турбо- і гідрогенераторів часто досягають кількох сотень (500 і більше) тисяч кіловат.

Для парових турбін на теплових електростанціях характерна висока швидкість обертання (звичайно 3000 об/хв). Турбогенератор стандартної частоти $f = 50$ гц, який працює з такою швидкістю, повинен мати число пар полюсів

$$p = \frac{2\pi \cdot f}{\omega} = \frac{2\pi \cdot 50 \cdot 60}{3000 \cdot 2\pi} = 1,$$

тобто його ротор повинен бути двополюсним. Крім того, при великій швидкості обертання дуже істотним є забезпечення механічної міцності ротора. Тому **турбогенератори виготовляють з неявнополюсним ротором**. Вони характеризуються порівняно невеликими радіальними і значними осьовими розмірами.

Гідрогенератори звичайно мають невеликі швидкості обертання (50 ÷ 300 об/хв). Щоб одержати змінний струм стандартної частоти $f = 50$ Гц, гідрогенератори виконують на велику кількість пар полюсів. Так, при швидкості $n = 50$ об/хв число пар полюсів повинне дорівнювати

$$p = \frac{2\pi \cdot f}{\omega} = \frac{2\pi \cdot 50 \cdot 60}{50 \cdot 2\pi} = 60$$

Для їхнього розміщення доводиться збільшувати поперечні розміри генератора. Гідрогенератори виконують явно полюсними, вони мають великі радіальні розміри при помірних осьових. Як правило, їх виготовляють для вертикальної установки. СГ виготовляють на напруги 0,4; 6,3; 10,5; 15; 20 кВ.

При холостому ході генератора струм якоря дорівнює нулю і магнітне поле створюється тільки обмоткою збудження ротора. За рахунок розподілу обмоток статора і ротора неявнополюсної машини, а також за рахунок додання особливої форми полюсним наконечникам явнополюсного ротора домагаються того, що зміна потокозчеплення обмоток якоря при обертанні ротора є практично синусоїдальною. Це необхідно для одержання синусоїдальної ЕРС у якорі. Така форма кривої ЕРС є вимогою стандарту до генераторів змінного струму. В цьому випадку діюче значення ЕРС в обмотках якоря визначається з формули, аналогічної для обмоток асинхронної машини (11.7), тобто

$$E_0 = 4,44 \cdot f \cdot w \cdot k \cdot \Phi_0, \quad (12.2)$$

де E_0 - ЕРС фазної обмотки якоря; f - частота ЕРС якоря; w - число витків фазної обмотки; k - обмоточний коефіцієнт обмотки якоря; Φ_0 - потік ротора, що проникає до осердя статора.

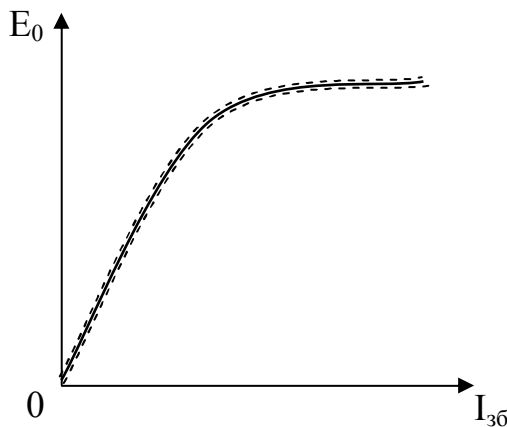


Рис.12.4 - Характеристика холостого ходу СГ

При постійній частоті f на величину ЕРС якоря можна впливати потоком Φ_0 , що створюється струмом збудження ротора I_{36} . Залежність ЕРС якоря від струму збудження при номінальній швидкості обертання і відсутності навантаження якоря ($I = 0$) називається **характеристикою холостого ходу**. Звичайний її вигляд представлений на рис. 12.4. Оскільки $E_0 \equiv \Phi_0$, то $E_0 = f(I_{36})$ визначається властивостями магнітного кола машини і в іншому масштабі повторює криву $\Phi_0 = f(I_{36})$.

Характеристика холостого ходу може бути побудована за даними розрахунку магнітного кола або на підставі досліду холостого ходу. Останній проводять при номінальній швидкості і відключеному навантаженні. Напруга на якорі вимірюється при поступовому зростанні струму збудження з нуля, а потім

при його зменшенні. Внаслідок гістерезису ці напруги можуть не збігатися. Для побудови характеристики холостого ходу приймають середні значення.

12.3. Зовнішня характеристика синхронного генератора

Зовнішньою характеристикою генератора називається залежність напруги від струму навантаження $U = f(I)$ при $n = \text{const}$, $I_{зб} = \text{const}$, $\cos\varphi = \text{const}$. Найбільший інтерес представляє зовнішня характеристика $U = f(I)$ при номінальній швидкості, $\cos\varphi$ і струмі збудження в діапазоні струмів навантаження від $I = 0$ до $I = I_{\text{ном}}$.

Струм збудження при номінальному навантаженні, тобто при $U_{\text{н}}$, $I_{\text{н}}$, $\cos\varphi_{\text{н}}$, називається **номінальним струмом збудження**.

Генератори розраховують для роботи з номінальним коефіцієнтом потужності $\cos\varphi_{\text{н}} = 0,8 \div 0,9$ для змішаного активно-індуктивного навантаження. Зовнішня характеристика для цього випадка має вид кривої 1 (рис.12.5), яка при зменшенні навантаження від $I_{\text{н}}$ до холостого ходу досить швидко зростає. Відносна зміна (підвищення) напруги при цьому може досягати декількох десятків відсотків. **Під відносною зміною напруги розуміють виражене у відсотках до номінального підвищення напруги при переході від режиму номінального навантаження до холостого ходу.** Воно дорівнює

$$\Delta U = \frac{U_0 - U_{\text{н}}}{U_{\text{н}}} 100. \quad (12.3)$$

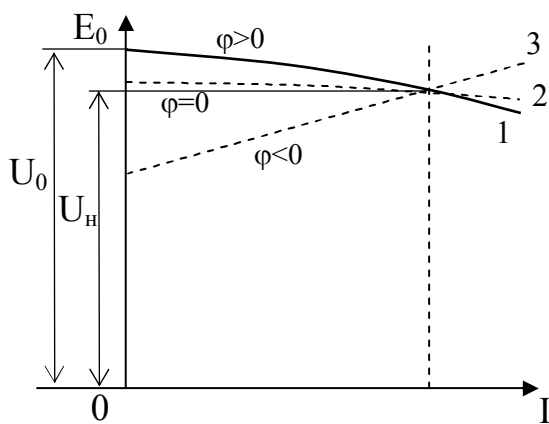


Рис. 12.5 - Зовнішні характеристики СГ

Оскільки $\cos\varphi$ навантаження може відрізнятися від номінального, то це, у свою чергу, відбивається на зовнішній характеристиці генератора. На рис. 12.5 крива 2 зображує зовнішню характеристику при активному навантаженні ($\varphi = 0$), крива 3 при активно-емісному навантаженні ($\varphi < 0$). Зовнішню характеристику можна побудувати за допомогою векторних діаграм або за даними досліду.

Для підтримки напруги генератора постійною при зміні навантаження за величиною і характером регулюють струм збудження ротора.

12.4. Електромагнітний момент синхронного генератора

Механічна потужність, що надходить на вал генератора за винятком втрат, перетворюється на електричну. Корисна електрична потужність генератора дорівнює

$$P = m \cdot U \cdot I \cdot \cos\varphi, \quad (12.4)$$

де m - число фаз якоря; U - зовнішня напруга; I - струм якоря; $\cos\varphi$ - коефіцієнт потужності.

Частина електричної потужності витрачається в обмотках якоря у вигляді електричних втрат: $P_{EЯ} = m \cdot I^2 \cdot R$. Повна електрична потужність якоря, яка дорівнює сумі корисної електричної потужності генератора і потужності втрат у якорі, називається **електромагнітною потужністю** генератора:

$$P_{EM} = P + P_{EЯ} = m \cdot U \cdot I \cdot \cos \varphi + m \cdot I^2 \cdot R = m \cdot I (U \cdot \cos \varphi + I \cdot R) \quad (12.5)$$

Так само виражається і **електромагнітна потужність двигуна**. Тільки для двигуна вона являє собою ту частину підведеної електричної потужності, що перетворюється у механічну.

Формула електромагнітного моменту СМ має вигляд

$$M = \frac{m}{\omega} \cdot \frac{E_0 \cdot U}{X} \sin \Theta, \quad (12.6)$$

де ω - кутова швидкість обертання ротора; E_0 - ЕРС, створювана основним потоком ротора; X - індуктивний опір якоря; $\sin \Theta$ - фазовий кут між ЕРС E_0 і напругою U .

На рис. 12.6 наведена спрощена векторна діаграма генератора (без урахування активного падіння напруги в якорі $I \cdot R$, оскільки активний опір якоря досить малий).

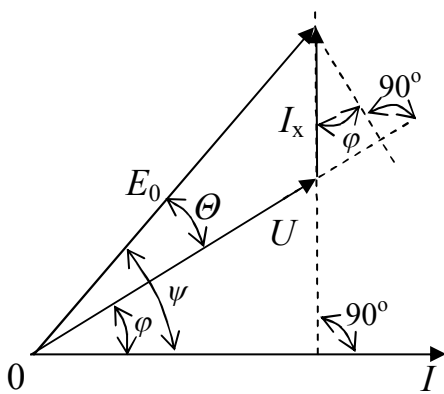


Рис.12.6 - Векторна діаграма СГ

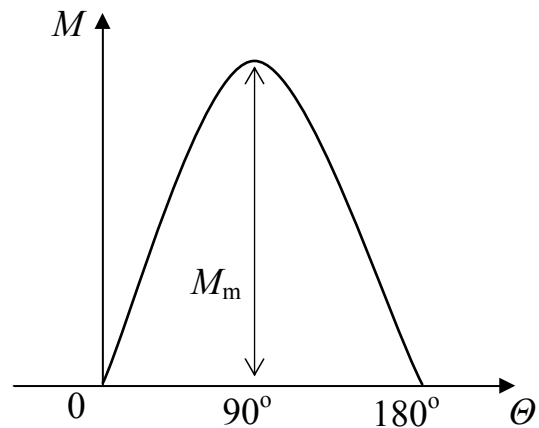


Рис.12.7 - Кутова характеристика СМ

Із співвідношення (12.6) видно, що електромагнітний момент залежить від ЕРС E_0 , напруги U і $\sin \Theta$. У генератора електромагнітний момент є протидіючим, він урівноважує момент первинного двигуна. Для СД електромагнітний момент буде обертовим. Обов'язковою умовою перетворення енергії в СМ (механічної на електричну в генераторі й електричної на механічну у двигуні) є наявність фазового зсуву між ЕРС E_0 і напругою U на кут Θ . При $\Theta = 0$ кут $\psi = 90^\circ$, оскільки I_x і I взаємно перпендикулярні (рис. 12.6). Електромагнітний момент M і потужність P_{EM} при цьому дорівнюють нулю.

Фазовий кут Θ на векторній діаграмі напруг генератора (рис. 12.6) відповідає просторовому зсуву між осями поля ротора і результуючого поля на кут Θ/p при випереджаючому полі ротора. У синхронного двигуна навпаки, поле ротора відстає від результуючого на кут Θ/p .

Якщо прийняти ЕРС E_0 і напругу U постійними, такими що не залежать від навантаження (такий режим можливий, наприклад, при паралельній роботі синхронної машини з мережею), то електромагнітний момент буде залежати тільки від $\sin \Theta$. Залежність моменту від кута Θ називають **кутовою харак-**

теристикою синхронної машини (рис. 12.7). Її використовують для оцінки статичної стійкості машини при паралельній роботі з мережею.

Як видно з формули (12.6) і графіка (рис. 12.7), максимальний момент машина розвиває при $\Theta = 90^\circ$. Він дорівнює

$$M = \frac{m}{\omega} \cdot \frac{E_0 \cdot U}{x} . \quad (12.7)$$

Величина максимального моменту, як і для асинхронної машини, характеризує перевантажувальну здатність. Його можна розглядати як межу статичної стійкості синхронної машини в умовах її паралельної роботи з мережею. Чим менший момент відповідає даному навантаженню в порівнянні з максимальним, тим більшим є запас стійкості. Одночасно для усталеної роботи необхідно, щоб при збільшенні кута Θ зростав електромагнітний момент. Ця умова виконується лише при $\Theta < 90$.

12.5. Паралельна робота синхронної машини з електричною мережею

У сучасній практиці автономна робота СГ на своє навантаження поза зв'язком з іншими джерелами трифазного струму зустрічається рідко. Звичайним є електропостачання споживачів енергією від енергетичних систем. Енергосистема по лініях високої напруги поєднує для паралельної роботи електричні станції. Наявність енергосистем дає істотні економічні вигоди, головні з яких - підвищення надійності енергопостачання і зниження вартості виробництва електроенергії.

Потужності сучасних енергосистем обчислюються мільйонами і десятками мільйонів кіловат. Кожний з генераторів, включених до енергосистеми, працює в режимі паралельної роботи з загальною мережею великої потужності. При цьому можна вважати, що режим роботи окремого генератора не впливає на режим роботи мережі, оскільки *частота і напруга на його затискачах жорстко задаються зовнішньою мережею і не залежать від струму збудження, навантаження і потужності даного генератора*. Синхронний двигун завжди включається паралельно мережі живлення.

Для включення генератора на паралельну роботу з мережею необхідно виконати наступні умови:

- а) рівність частот - генератор повинен обертатися із строго синхронною швидкістю, при якій частота ЕРС якоря точно збігається з частотою мережі;
- б) режим до комутації співпадає з режимом після комутації (режим холостого ходу, струм якоря в момент комутації відсутній);
- в) рівність напруг - фазні напруги генератора (напруги рівні ЕРС E_0) повинні дорівнювати відповідним фазним напругам мережі, а за фазою вони повинні бути протилежними.

Створення зазначених умов з наступним включенням до мережі називають *синхронізацією*.

На підставі рівняння напруг струм якоря визначається за виразом

$$\dot{I} = \frac{\dot{E}_0 - \dot{U}}{jX} . \quad (12.8)$$

Оскільки напруги генератора і мережі рівні і протилежні за фазою, можна записати

$$\dot{I} = \frac{\dot{E}_0 + \dot{U}_M}{jX}, \quad (12.9)$$

де U_M - напруга мережі.

Генератор після включення до мережі працює в режимі холостого ходу. Векторна діаграма, що відповідає цьому випадку, зображена на рис. 12.9,а. При збільшенні струму збудження зростає абсолютне значення ЕРС якоря E_0 . Оскільки напруга на затискачах задається мережею і залишається постійною, різниця напруг, що з'явилася, $\Delta U = E_0 - U = E_0 + U_M$ викличе струм у якорі

$$\dot{I} = \frac{\dot{E}_0 - \dot{U}}{jX} = \frac{\Delta \dot{U}}{jX}. \quad (12.10)$$

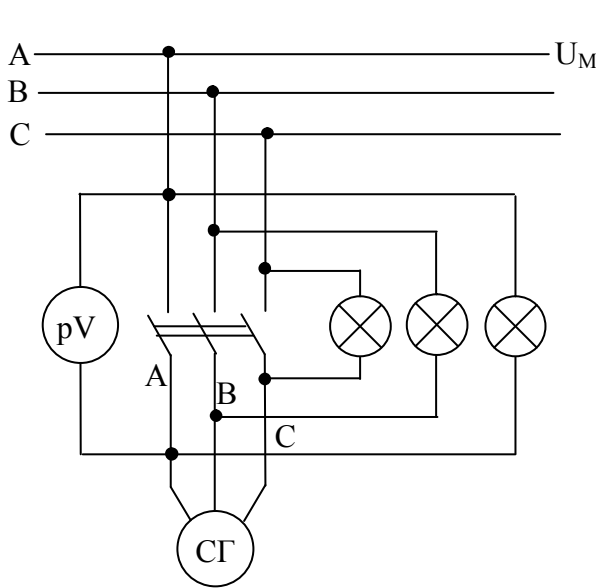


Рис.12.8 - Схема включення СГ до мережі

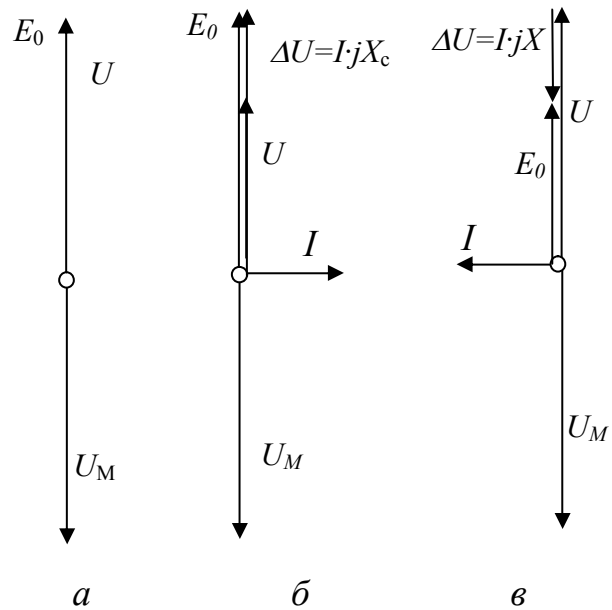


Рис.12.9 - Векторні діаграми

Струм якоря при цьому відстає за фазою від ΔU і E_0 на кут $\psi = 90^\circ$ (рис. 12.9,б). Режим виходить таким же, як немовби при автономній роботі генератора його навантажили на чисто індуктивне навантаження. Відносно мережі генератор в цьому режимі є джерелом реактивної потужності. Навпаки, при зменшенні струму збудження (недозбудження) знижується ЕРС E_0 , що приводить до зміни фази ΔU і струму I на протилежну (рис. 12.9,в). Струм якоря при цьому випереджає напругу U і ЕРС E_0 на 90° , а відносно напруги мережі U_M виявиться відстаючим на такий же кут.

У цьому режимі генератор споживає від мережі реактивну потужність, необхідну для підтримки результуючого поля на одному рівні, оскільки напруга на затискачах жорстко задана. Реакція якоря при цьому буде поздовжньо-намагнічуючою. Навантаження на первинний двигун в обох випадках залишаються на рівні холостого ходу, оскільки електромагнітна потужність при $\psi = 90^\circ$ дорівнює нулю. Таким чином, регулювання струму збудження викликає зміну лише реактивного навантаження генератора.

Щоб навантажити генератор активною потужністю, необхідно впливати на первинний двигун так, щоб додати ротору деяке прискорення. З цією метою збільшується впуск пару або води до турбіни. При прискоренні ротора з'явиться зрушення фаз між ЕРС E_0 і напругою U на кут Θ , що є наслідком просторового зрушення між осями поля ротора і результуючого поля на кут $\frac{\theta}{p}$.

Фазове зрушення між ЕРС і напругою обумовить різницю напруг ΔU , що, в свою чергу, викличе струм якоря:

$$\dot{I} = \frac{\dot{E}_0 - \dot{U}}{jX} = \frac{\Delta \dot{U}}{jX} \quad (12.11)$$

Цей струм, відстаючи від ΔU за фазою на 90° , матиме фазове зрушення стосовно ЕРС E_0 на кут $\psi < 90^\circ$ (рис. 12.10,а). Оскільки $\Theta > 0$, а $\psi < 90^\circ$, генератор при цьому буде розвивати електромагнітну потужність $P_{EM} = m E_0 U \cos \psi > 0$, яка надходить у мережу, і електромагнітний момент:

$$M = \frac{m}{\omega} \cdot \frac{E_0 \cdot U}{X} \sin \Theta, \quad (12.12)$$

який зрівноважить момент первинного двигуна при синхронній швидкості обертання.

Із збільшенням моменту первинного двигуна будуть зростати кут Θ , електромагнітна потужність і протидіючий момент. Швидкість обертання буде зберігатися синхронною доти, поки момент первинного двигуна буде врівноважуватися електромагнітним моментом генератора. При куті $\Theta = 90^\circ$ електромагнітний момент виявляється максимальним (див. співвідношення 12.7). Його величина є тією межею навантаження генератора за моментом (відповідно і за потужністю, що віддається), при якій генератор ще здатний працювати синхронно з мережею. Якщо момент первинного двигуна перевищить це значення, то генератор не зможе його зрівноважити і випадає з синхронізму. Паралельна робота з мережею стає неможливою.

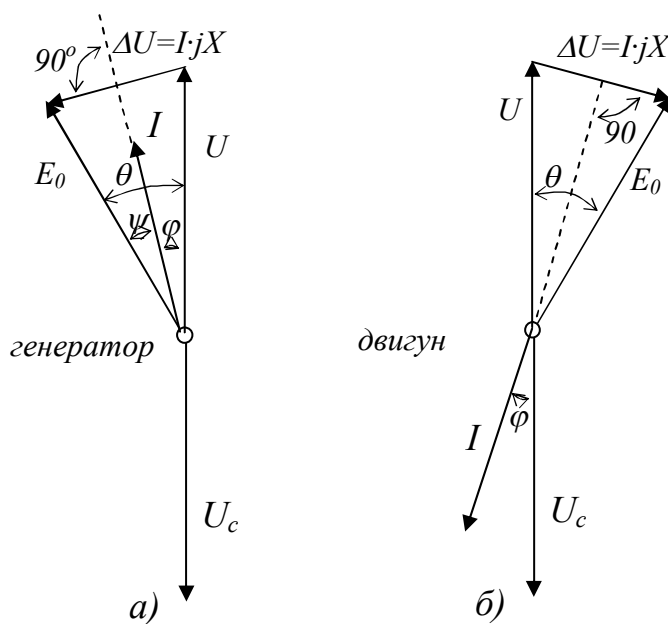


Рис. 12.10 - Векторні діаграми СД:
а - режим генератора, б - режим двигуна

Якщо після включення на паралельну роботу синхронної машини не збільшити обертовий момент первинного двигуна, а, навпаки, зменшити або навіть прикласти до вала гальмовий момент, то ротор трохи сповільниться і відстане від результуючого поля на кут Θ/p . При цьому ЕРС E_0 буде відставати від напруги U на кут Θ . Це викличе зміну фази ΔU і струму якоря майже на протилежну (рис. 12.10,б). Внаслідок цього зміниться напрямок потоку електромагнітної потужності і електромагнітного моменту, який з протидіючого стане обертовим.

Машина перейде до режиму синхронного двигуна. Обертний електромагнітний момент зрівноважить гальмовий момент опору і швидкість обертання залишиться синхронною.

Таким чином, синхронна машина, включена паралельно з мережею великої потужності, протидіє в межах її статичної стійкості як прискоренню, так і уповільненню ротора і зберігає швидкість обертання постійною. Змінюється лише кут між осями поля ротора і результуючого поля в межах ± 90 електричних градусів. Для усталеної роботи синхронні машини проектують і виготовляють так, що при номінальному навантаженні кут θ звичайно не перевищує $20 \pm 30^\circ$. Синхронна машина протидіє також зміні струму збудження відповідною зміною реактивного навантаження, оскільки напруга на затискачах є жорстко заданою.

12.6. Синхронний двигун

У синхронному двигуні (СД) електрична енергія змінного струму, що надходить з мережі на статор, перетворюється на механічну на валу. За принципом будови СД не відрізняється від генератора. В основі створення обертального моменту синхронного двигуна лежить взаємодія змінного струму статора з постійним магнітним полем ротора.

Для з'ясування особливостей цієї взаємодії скористаємося рис. 12.11. На ньому зображені елементи дуги статора і ротора. Нехай у деякий момент часу напрям струму в провідниках статора і положення полюсів відповідають рис. 12.11,а. Відповідно до правила лівої руки [2.9] кожний з провідників статора буде відчувати механічну силу від взаємодії його струму з полем ротора, спрямовану проти годинникової стрілки. Сила, що діє на полюси ротора, буде протилежною. Через півперіоду змінного струму $T/2$ у провідниках статора встановиться такий же за величиною, але протилежно спрямований струм.

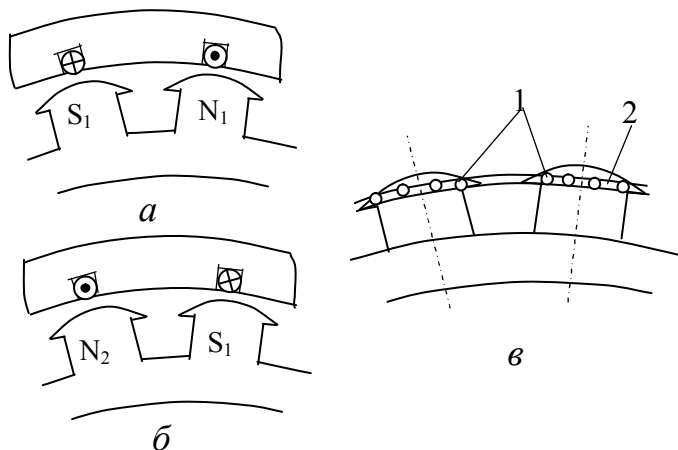


Рис. 12.11 - Принцип дії СД

Для того щоб напрям сили, що діє на ротор при цьому зберігся, необхідно, щоб за той же час ротор повернувся на один полюс і зайняв положення, показане на рис. 12.11,б. Однак внаслідок інерції ротор за час $T/2$ при частоті $f = 50$ Гц практично залишиться на місці і тому у наступний напівперіод часу на нього діятиме сила зворотного напрямку. Внаслідок

цього СД не може самостійно розкрутитися. Але якщо за рахунок зовнішньої сили ротору попередньо додати таку швидкість, при якій забезпечується зазначена умова, то двигун зможе продовжувати обертатися з синхронною швидкістю за рахунок власного електромагнітного моменту. Якщо ротор має p пар полюсів, то час одного повного оберту складе pT секунд, а швидкість обертання

$$\omega = \frac{2\pi}{p \cdot T} = \frac{2\pi \cdot f}{p}. \quad (12.13)$$

Напрямок обертання трифазного СД визначається чергуванням фаз живильної мережі.

Таким чином, робота двигуна здійснюється при синхронній швидкості обертання, що не залежить від навантаження. Зміни навантаження позначаються лише на куті просторового зсуву між осями результуючого поля якоря і поля ротора. На відміну від генератора ротор СД відстає від результуючого поля якоря на Θ електричних градусів. У двигуні ведучим є поле якоря, за ним слідкує ротор. Обертний електромагнітний момент СД виражається такою ж формулою, як і для генератора, тобто

$$M = \frac{m}{\omega} \cdot \frac{E_0 \cdot U}{X} \sin \Theta. \quad (12.14)$$

Якщо момент опору навантаження перевищить максимальне значення (при $\Theta = 90^\circ$), то рівновага моментів виявляється неможливою, двигун випадає з синхронізму і зупиняється. При швидкості обертання меншій за синхронну неминучі положення ротора, коли $360 > \Theta > 180$. При цьому момент двигуна змінить свій напрямок і ще більше сповільнить ротор, прискорюючи його зупинку.

Для включення СД у мережу він повинен бути попередньо синхронізований з нею. Вимоги при цьому такі ж, як і при включенні на паралельну роботу генераторів.

Щоб надати ротору двигуна, що синхронізується, синхронну швидкість до включення до мережі, необхідний спеціальний розгінний двигун. Ця незручність значною мірою стримувала застосування СД. Сучасні СД як правило пускаються в хід способом асинхронного пуску, при якому розгінний двигун не потрібний.

12.7. Пуск синхронного двигуна

Для самостійного пуску (без розгінного двигуна) у роторі СД укладається спеціальна короткозамкнена пускова обмотка по типу білячої клітки. Її елементи показані на рис. 12.11,в. Вона складається із стежнів 1, які укладаються в передбачені для цього пази, полюсних наконечників і двох замикаючих кілець 2, якими по торцях ротора стрижні з'єднуються між собою. Стрижні виготовляють з латуні, алюмінієвої бронзи та інших сплавів з підвищеним питомим опором. Іноді обходяться без пускової обмотки, але в цьому випадку полюсні наконечники роблять суцільними. По торцях вони електрично з'єднуються накладками, що утворюють короткозамкнений контур, який виконує роль пускової клітки. У швидкохідних двигунах з неявнополюсним ротором функції білячої клітки виконують поверхневі шари масивного циліндричного осердя ротора. При цьому СД пускається в хід за способом асинхронного пуску. Схема такого пуску подана на рис. 12.12,а.

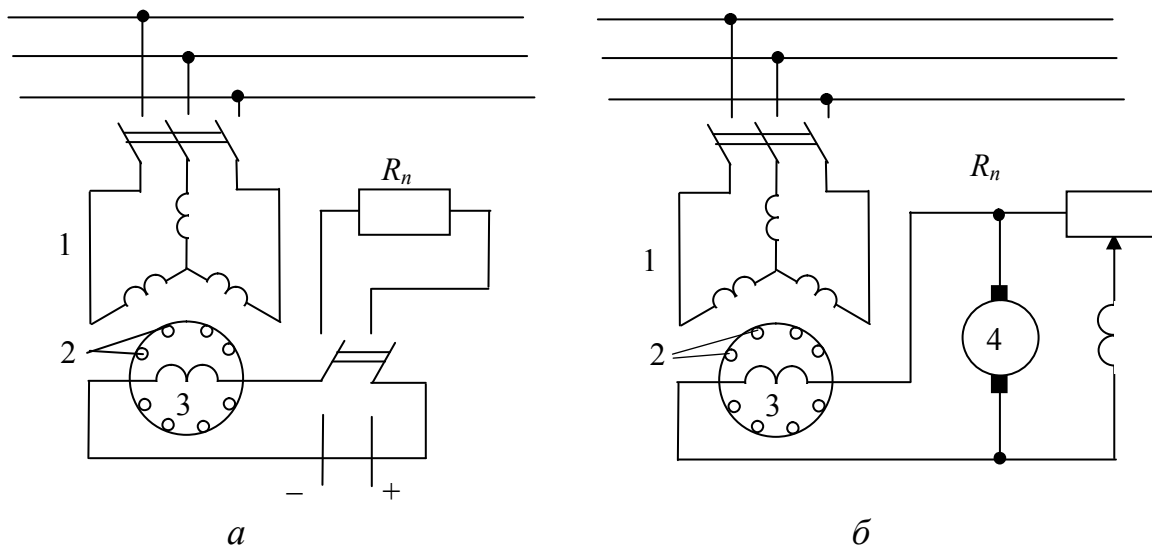


Рис.12.12 - Схеми асинхронного пуску СД:
а - з пусковим реостатом; **б** - з підключеним збудником

Статор двигуна 1 включається в мережу трифазного струму на повну напругу (прямий пуск) або на знижену напругу, якщо необхідно зменшити вплив пускового струму. Обертове магнітне поле статора індуктує у пусковій короткозамкненій обмотці 2 ЕРС і струм, який взаємодіє з полем і створює обертовий момент. Ротор приходить в обертання, як і в АД. За рахунок асинхронного моменту він досягає швидкості обертання, при якій ковзання звичайно не перевищує 0,05. Виконання пускової обмотки із збільшеним активним опором дозволяє одержати достатній пусковий момент. На час розгону ротора до зазначеного ковзання ($s = 0,05$) обмотка збудження 3 замикається на зовнішній опір R_n , який повинен бути в 10 - 15 разів більшим за її власний. Це необхідно тому, що обертове поле індуктує також в обмотці збудження ЕРС, яка в початковий момент пуску може виявитися значною, небезпечною для ізоляції обмотки і для персоналу. Після досягнення ротором швидкості, близької до синхронної ($s \approx 0,05$), обмотка збудження перемикається на живлення постійним струмом від збудника. При цьому, крім асинхронного моменту, пропорційного ковзанню, з'являється синхронний момент від взаємодії струму якоря з постійним магнітним полем ротора, який залежить від струму збудження (ЕРС E_0) і кута θ .

Внаслідок ковзання кут θ безупинно змінюється і в проміжки часу, коли $0 < \theta < 180^\circ$, синхронний момент, додаючись до асинхронного, прискорює ротор, і ковзання зменшується. При досягненні $s = 0$ двигун після деяких хитань біля синхронної швидкості входить у синхронізм і продовжує працювати як синхронний. Кут θ при цьому більший за нуль і менший за 90° . В робочому режимі струм і ЕРС пускової обмотки дорівнюють нулю, дорівнює нулю і її асинхронний момент, оскільки ротор обертається з синхронною швидкістю. Однак при змінах навантаження, коли відбувається зміна кута θ і кута між осями полів θ/p , пускова клітка позитивно впливає, зменшуючи хитання ротора біля нового положення, що відповідає навантаженню, яке змінилося.

Використовують також асинхронний пуск СД з наглухо підключеним збудником. Схема такого пуску показана на рис. 12.12,б. У цьому випадку об-

мотка збудження 3 підключається до якоря збудника 4 (змонтованого на одному валу з ротором СД) з самого початку пуску. В міру розгону двигун збуджується і по досягненні швидкості, близької до синхронної, входить у синхронізм.

Асинхронному пуску СД властиві ті ж недоліки, що й пуску асинхронних короткозамкнених двигунів, головним з яких є великий пусковий струм. Для обмеження пускового струму великих двигунів прибігають до зниження на час пуску напруги, яка подається на статор, за допомогою реакторів (індуктивних опорів), що включаються послідовно до кола статора (реакторний пуск) або за допомогою автотрансформаторів (автотрансформаторний пуск). Керування пуском СД у сучасних установках звичайно автоматизують.

12.8. Регулювання коефіцієнта потужності синхронного двигуна

У розділі 12.5 було зазначено, що при регулюванні струму збудження СМ, включеної паралельно з мережею, змінюється реактивна потужність. Оскільки синхронний двигун завжди працює в режимі паралельного підключення до мережі, то до нього повністю відноситься сказане. Зміна реактивної потужності при заданій активній означає також зміну коефіцієнта потужності $\cos\varphi$. Звідси випливає можливість регулювання струмом збудження ротора коефіцієнта потужності СД.

Пояснимо це за допомогою векторних діаграм СД, представлених на рис.12.13. Нехай при даному навантаженні струм збудження встановлений таким, що кут $\varphi = 0$, $\cos\varphi = 1$, струм статора збігається з напругою за фазою. Назвемо цей струм збудження нормальним. Відповідно до цього режиму векторна діаграма зображена на рис. 12.13 векторами

$$\overline{U_c} = \overline{OB}; \quad -\overline{E_0} = \overline{OA}; \quad \overline{I \cdot X} = \overline{AB}; \quad \overline{I} = \overline{OC}.$$

Якщо, не змінюючи навантаження на валу, змінювати струм збудження, буде змінюватися ЕРС якоря E_0 і кут Θ , але момент

$$M = \frac{m}{\omega} \cdot \frac{E_0 \cdot U}{X} \sin \Theta = \frac{m}{\omega} \cdot \frac{E_0' \cdot U}{X} \sin \Theta' \quad (12.15)$$

залишається незмінним, тобто

$$\begin{aligned} E_0 \sin \Theta &= E_0' \sin \Theta' = \\ &= E_0'' \sin \Theta'' = \text{const} \end{aligned} \quad (12.16)$$

Звідси випливає, що кінець вектора $-E_0$ при зміні струму збудження переміщується по прямій $A'A''$, яка паралельна вектору напруги U_c . За цим слідкує зміна величини й фази індуктивного падіння напруги $I \cdot X$ і струму статора I . Оскільки

$$I \cdot X \cdot \cos\varphi = E_0 \cdot \sin\Theta = \text{const},$$

то й $I \cdot \cos\varphi = \text{const}$.

Отже активна складова струму статора зберігається незмінною. Кінець вектора струму I при регулюванні струму збудження переміщується по прямій $C'C''$, перпендикулярній до вектора напруги U_c (рис. 12.13).

Таким чином, за рахунок струму збудження виявляється можливим задати СД будь-який режим за коефіцієнтом потужності. При збільшенні струму збудження, в порівнянні з нормальним, струм статора випереджає напругу. Відносно мережі двигун поводить себе при цьому як активно-ємнісне навантаження. Двигун в такому режимі називається *перезбудженим*.

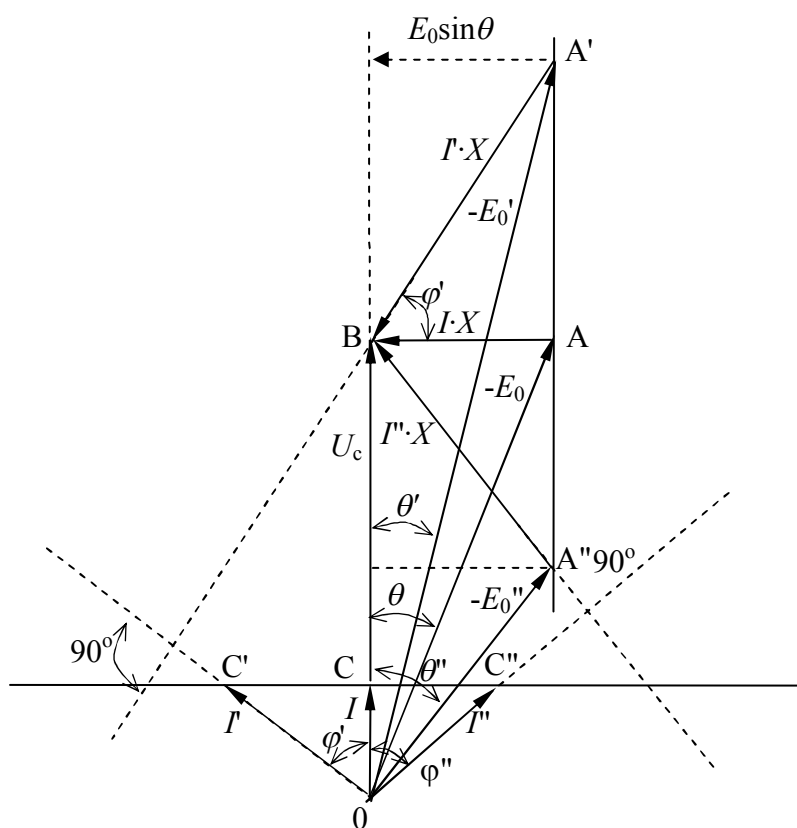


Рис.12.13 - Векторні діаграми СД

СД звичайно розраховують для роботи при номінальному навантаженні в перезбудженому режимі з $\cos\varphi = 0,8$. Із зміною струму збудження змінюється не тільки фаза, але й величина струму статора. Залежність струму статора від струму збудження при даному навантаженні зображується U-подібною кривою (рис. 12.14). Мінімум струму статора має місце при нормальному струмі збудження, коли $\cos\varphi = 1$. Із зростанням навантаження мінімум U-подібних кривих зміщується у бік більших струмів збудження.

При зменшенні механічного навантаження на валу знижується активна складова струму статора, що розширює можливий діапазон регулювання реак-

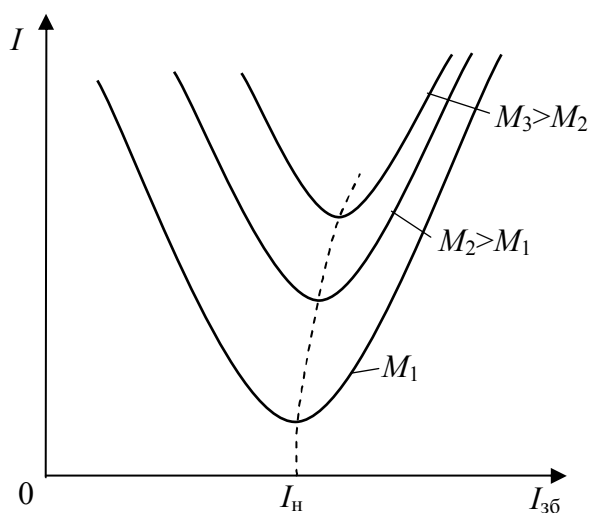


Рис.12.14 - Залежність струму статора СД від струму збудження

Перезбудженому двигуну відповідає векторна діаграма, представлена векторами $-E_0'$, $I' \cdot X$, U_c і I на рис. 12.13. Навпаки, при зменшенні струму збудження (*недозбудження*) двигун споживає відстаючий струм і являє собою активно-індуктивне навантаження мережі (вектори I'' , E_0'' , $I'' \cdot X$). Найбільший інтерес представляє режим нормальної роботи з $\cos\varphi = 1$ і режим перезбудження, коли двигун споживає випереджаючий струм. В останньому випадку за рахунок реактивної (ємнісної) складової струму двигуна досягається підвищення $\cos\varphi$ у мережі в цілому, оскільки основне навантаження мережі найчастіше має активно-індуктивний характер.

тивної складової. СД, який працює на холостому ході без навантаження, може бути використаний як регульоване джерело реактивної потужності мережі. Для цього застосовують спеціальні СМ, які називаються **синхронними компенсаторами**.

На відміну від двигуна й генератора синхронний компенсатор не відчуває механічних навантажень, тому розрахований лише на невелику механічну потужність, пов'язану з втратами холостого ходу. Синхронні компенсатори застосовують в електричних мережах енергосистем для регулювання напруги.

12.9. Робочі характеристики синхронного двигуна

Під робочими характеристиками СД розуміють залежності швидкості, моменту на валу, коефіцієнта потужності, $\cos\varphi$, ККД, споживаних потужності й струму від корисної потужності P_2 , що знімається з вала двигуна, при постійних напрузі мережі і струмі збудження. Графіки залежностей мають вигляд кривих, поданих на рис. 12.15.

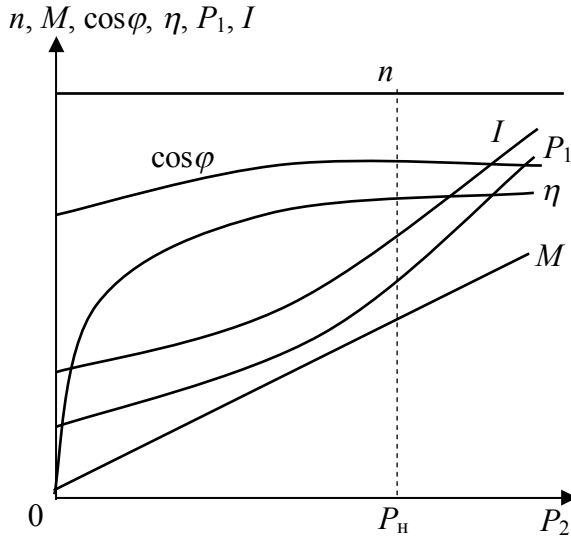


Рис.12.15 - Робочі характеристики СД

Оскільки швидкість обертання двигуна постійна, швидкісна характеристика $n = f(P_2)$, так само як і механічна $n = f(M)$, зображується прямою, яка паралельна осі абсцис, а лінія моменту на валу M - прямою, що проходить через початок координат.

Характер залежності $\cos\varphi = f(P_2)$ обумовлюється встановленим струмом збудження двигуна. Якщо дати за рахунок струму збудження $\cos\varphi = 1$ при номінальному навантаженні, то при недовантаженні двигун буде споживати випереджуючий струм (перезбудження), при перевантаженні - від-

стаючий струм (недозбудження). В обох випадках коефіцієнт потужності знижується.

Крива ККД має такий же вигляд, як і для АД. В зоні навантажень від $0,3$ до $1,3P_n$ зміни ККД невеликі. Характеристика $\eta = f(P_2)$ визначає залежність споживаної потужності $P_1 = f(P_2)$, оскільки $P_1 = P_2/\eta$. В свою чергу з $P_1 = f(P_2)$ і $\cos\varphi = f(P_2)$ впливає залежність для струму, споживаного статором з мережі, $I = f(P_2)$, оскільки

$$I = \frac{P_1}{m \cdot U \cdot \cos \varphi}.$$

12.10. Порівняння синхронних і асинхронних двигунів

За будовою СД складніше асинхронного, вартість його більша. Відносна різниця у вартостях вище при невеликій потужності машин. Для роботи СД потрібні два роди струму. Слід зазначити, що в даний час мають поширення двигуни з самозбудженням від живильної мережі змінного струму через напівпровідникові випрямлячі.

За пусковими властивостями синхронний і асинхронний двигуни приблизно однакові. Перший має меншу чутливість до коливань напруги мережі, тому що його обертовий момент, у тому числі й максимальний, пропорційний першому степеню напруги. У другого ця залежність квадратична. Крім того, використовуючи в необхідних випадках автоматичне форсування (збільшення) струму збудження СД, виявляється можливим зберегти стійкість його роботи навіть при значних короточасних зниженнях напруги мережі. За регулюванням швидкості обертання СД поступається асинхронному, хоча регульовальні властивості останнього також не можна вважати гарними.

Найважливішою перевагою СД є можливість його роботи з $\cos\varphi = 1$ або навіть з випереджувачим (ємнісним) струмом статора. Це особливо суттєве для двигунів, розрахованих на невелику швидкість обертання, оскільки АД з малими швидкостями характеризуються низьким коефіцієнтом потужності.

За сукупністю властивостей СД конкурентоспроможні або навіть перевершують асинхронні при потужності порядку 100 кВт і вище.

Контрольні запитання з теми 12

1. У чому полягає основна особливість СМ і яка область їхнього застосування?
2. Будова і призначення основних частин СМ.
3. Які відмінності в будові магнітопроводу й обмоток СМ у порівнянні з асинхронною?
4. У чому полягає принцип роботи синхронного генератора?
5. Конструктивні відмінності турбо- і гідрогенераторів.
6. Що розуміють під характеристикою холостого ходу генератора?
7. На підставі яких даних будують характеристику холостого ходу генератора?
8. Що розуміють під зовнішньою характеристикою синхронного генератора і як вона залежить від характеру навантаження?
9. Що розуміють під електромагнітною потужністю генератора і двигуна? Роль електромагнітного моменту в генераторі й у двигуні.
10. Що являє собою кутова характеристика? Яким діапазоном кута θ обмежується її стійка частина?
11. Умови включення СМ паралельно до мережі.
12. Як впливає на режим роботи СМ регулювання струму збудження?
13. Як змінюється активне навантаження генератора, включеного паралельно мережі великої потужності?
14. При яких умовах СМ переходить у режим СД? В якому діапазоні навантажень зберігається усталена робота СМ, ввімкненої паралельно з мережею?
15. Як впливає струм збудження ротора на коефіцієнт потужності СД? Проаналізуйте цей вплив за допомогою векторної діаграми.
16. Для яких цілей використовують синхронні компенсатори й у чому їхня відмінність від звичайних СМ?
17. Які залежності називаються робочими характеристиками СД і який характер вони мають?
18. Дайте порівняльну оцінку електромеханічних властивостей СД відносно асинхронного.
19. Обґрунтуйте доцільність застосування СД?

ЗМІСТОВИЙ МОДУЛЬ 3

ОСНОВИ ЕЛЕКТРОНІКИ, ЕЛЕКТРОПРИВОД ТА ЕЛЕКТРООБЛАДНАННЯ ДЛЯ БУДІВНИЦТВА

Промислова електроніка являє собою галузь науки і техніки, що займається вивченням будови й роботи різних електронних приладів і їхнього застосування у промисловості. Сьогодні електроніка проникнула до всіх галузей сучасної науки, техніки, промисловості. Електронні прилади використовуються в автоматичній, телемеханічній, зв'язку, медицині, фізиці, машинобудуванні, будівельній галузі та ін.

Однією з основних областей ефективного її використання є електропривод, що вирішує завдання керування електродвигунами різних типів і призначення. Широке промислове використання тиристорів обумовило значний прогрес в області регульованого електропривода постійного і змінного струмів. Створено високоефективні пристрої, що перетворюють струм промислової частоти на змінний струм регульованої частоти для керування швидкістю електродвигунів.

Електронні підсилювачі, випрямлячі, вимірювальні прилади та інші пристрої стали потужним засобом для автоматизації і контролю виробничих процесів. Використання керованих швидкодіючих напівпровідникових приладів у традиційних схемах істотно розширює їхні можливості в забезпеченні нових режимів роботи й, отже, нових функціональних властивостей обладнання, розробленого на їхній базі.

На рис.М3.1 показаний взаємозв'язок розділів змістового модуля "Основи електроніки, електропривод і електрообладнання". Вивчення починається з теми 13 "Основи промислової електроніки", в якій розглянуто властивості напівпровідникових діодів, тиристорів і транзисторів і їхнє застосування у випрямлячах і підсилювачах. Розділ 7 "Електропривод" розділений на дві теми "Загальні відомості про електропривод" і "Регулювання швидкості електроприводів". До розділу 8 включені теми 16 - 20, що дають уявлення про електрообладнання будівельних майданчиків і підприємств будівельної індустрії. У темі 21 описані силові електроприймачі сучасних житлових і суспільних будинків, а в темі 22 наведені відомості з електробезпеки.

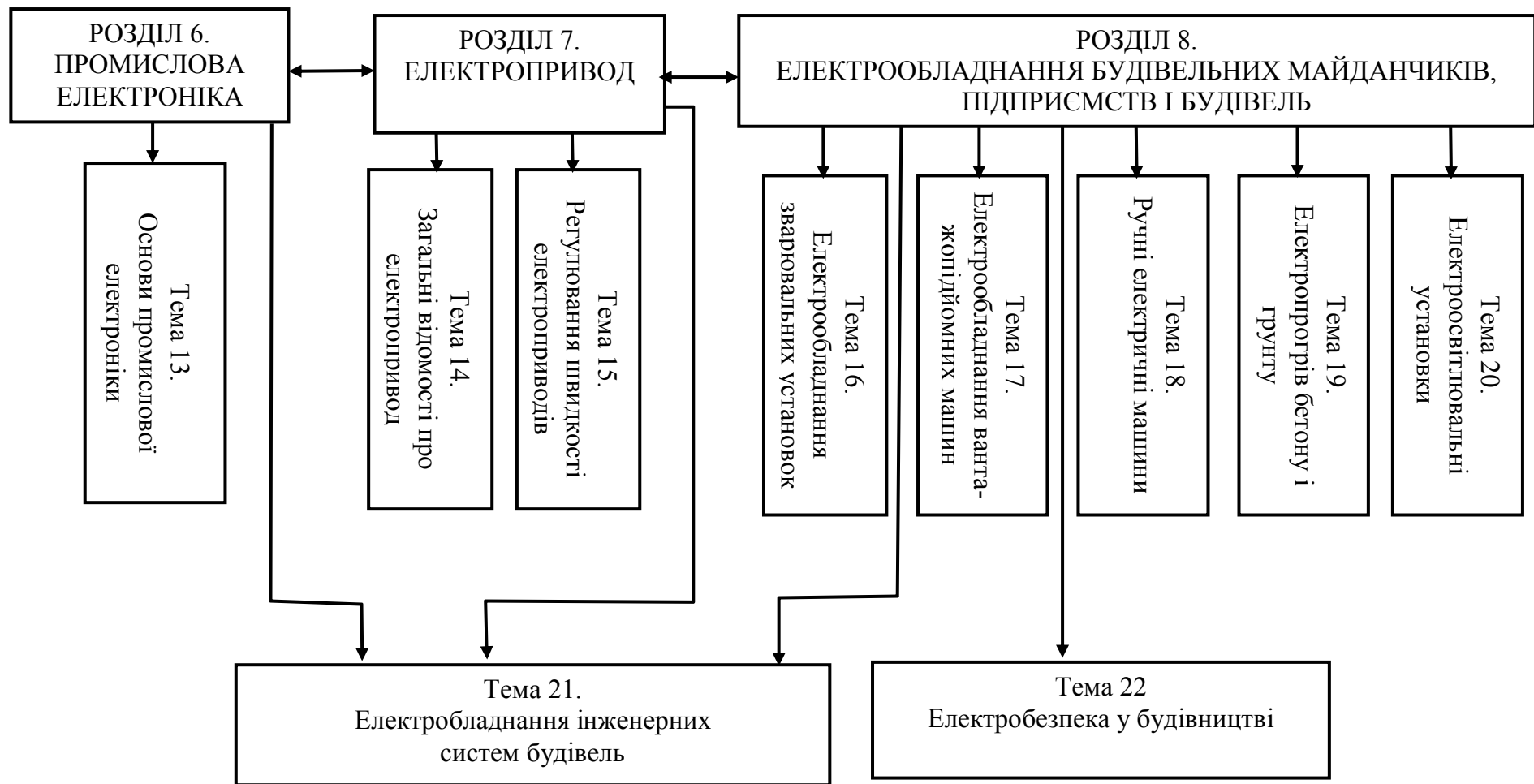


Рис. М3.1. Взаємозв'язок розділів модуля «Основи електроніки, електропривод та електрообладнання для будівництва»

ПРОМИСЛОВА ЕЛЕКТРОНІКА

ТЕМА 13 ОСНОВИ ПРОМИСЛОВОЇ ЕЛЕКТРОНІКИ

Ключові поняття: діод (вентиль), тиристор, транзистор, емітер, база, колектор, випрямляч, згладжуючий фільтр, підсилювач, смуга пропускання, коефіцієнт підсилення.

Сучасний науково-технічний прогрес в багатьох галузях промисловості, зокрема у будівництві, пов'язаний з розвитком електроніки. У даний час число різних типів приладів електроніки таке велике, що їхній повний опис виходить за межі програми курсу «Електротехніка у будівництві». Тому їх розгляд обмежений основними типами напівпровідникових приладів, які мають широке застосування в різних пристроях, зокрема в системах керування електроприводами будівельних машин і механізмів.

В електронній техніці виділяють силову і інформаційну електроніку. Одним з основних завдань силової електроніки є перетворення різних видів електричної енергії, зокрема змінного струму на постійний. Інформаційна електроніка переважно використовується для розв'язання завдань керування інформаційними потоками, зокрема для посилення сигналів.

У рамках даної теми розглянуті питання будови і принципів роботи напівпровідникових діодів, тиристорів і транзисторів та їхнього застосування у випрямлячах і підсилювачах.

13.1. Елементи напівпровідникової техніки

13.1.1. Принцип дії напівпровідникових приладів заснований на явищі односторонньої провідності межі розділу двох напівпровідників з різними типами електропровідності: електронної (електропровідність n -типу) і діркової (електропровідність p -типу). Область електропровідності n -типу характеризується тим, що проходження струму тут відбувається за рахунок переносу негативно заряджених електронів, надлишкова кількість яких створюється шляхом введення до монокристалу напівпровідника донорних домішок, наприклад сурми, миш'яку, фосфору. В області електропровідності p -типу проходження струму обумовлене переносом позитивно заряджених "дірок" (дірка - це атом, у якого не вистачає одного електрона і який має позитивний заряд, що за абсолютною величиною дорівнює заряду електрона). Дірки отримують шляхом введення до монокристалу напівпровідника акцепторних домішок, наприклад індію, бору, алюмінію.

Крім цього в примісних напівпровідниках завжди поряд з основними носіями, концентрація яких велика, існують також неосновні носії: дірки в напів-

провідниках n -типу та електрони в напівпровідниках p -типу. У напівпровідниках без домішок число електронів завжди дорівнює числу дірок.

При безпосередньому контактуванні двох напівпровідників, один з яких має електронну, а інший діркову електропровідність, отримується так званий електронно-дірковий перехід (p - n перехід), основною властивістю якого є залежність величини його опору від полярності прикладеної напруги. Для приєднання до зовнішнього кола в p - n зонах напівпровідника створюють омичні контакти з виводами.

Розглянемо на прикладі двошарового кристала кремнію процеси, що відбуваються в p - n переході при впливі на нього зовнішньої напруги. Якщо до p -області прикласти позитивний потенціал, а до n - області - негативний, то основні носії струму будуть рухатися в приграничному шарі назустріч один одному (рис. 13.1,а). В результаті опір p - n переходу зменшується і через границю розділу проходить прямий струм $I_{пр}$, обмежений практично тільки опором навантаження R_H . Зовнішня напруга $U_{пр}$ такої полярності називається прямою або провідною.

При зміні полярності прикладеної напруги (рис. 13.1,б) дірки в p -області й електрони в n -області напівпровідника будуть віддалятися від границі розділу, що приводить до збільшення опору p - n переходу, а потік основних носіїв зменшується до нуля. Через p - n перехід проходить незначний струм, створюваний неосновними носіями, для яких прикладена різниця потенціалів є прискорювальною. Зовнішня напруга такої полярності називається зворотною $U_{звор}$ або замикаючою, а обумовлений нею невеликий струм - зворотним струмом $I_{звор}$.

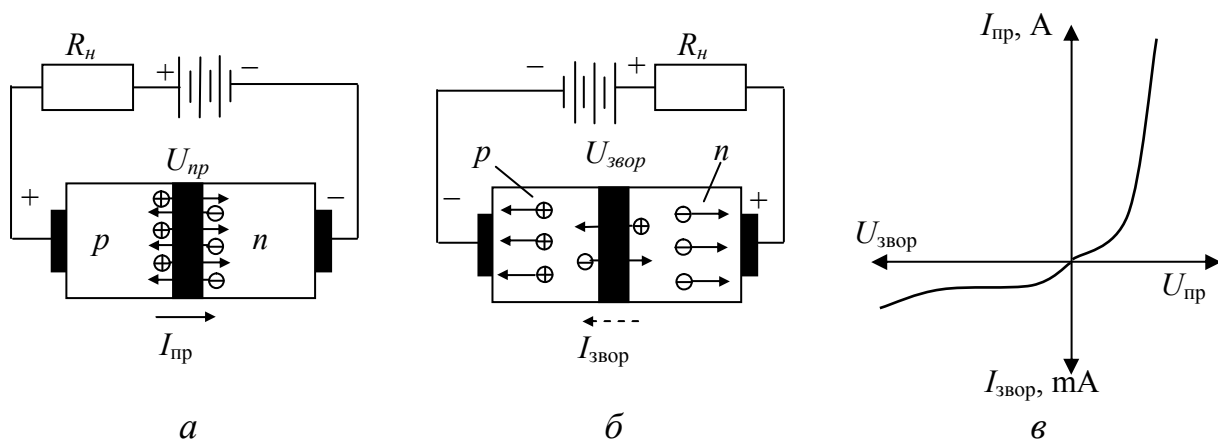


Рис. 13.1 - Проходження струму через p - n перехід напівпровідникового діода:
а - відкритий (провідний) стан; **б** - закритий (непровідний) стан;
в - вольт-амперна характеристика

Таким чином, значення і напрям струму, що проходить через p - n перехід двошарової напівпровідникової структури, залежать від значення і знака зовнішньої напруги, тобто p - n перехід має випрямляючі (вентильні) властивості.

Залежність струму I , що проходить через p - n перехід, від прикладеної до нього напруги U називається **вольт-амперною характеристикою (ВАХ) переходу**. Ця характеристика має дві гілки (рис. 13.1,в): одна розташована в першому квадранті і відповідає провідному напрямку в p - n переході (прямому струму в ньому), друга - у третьому квадранті і характеризує замикаючі властивості переходу.

13.1.2. Некеровані діоди. У пристроях промислової електроніки використовуються кремнієві, германієві і селенові некеровані діоди, або вентиля.

Кремнієві діоди. Розглянемо будову і ВАХ кремнієвого діода (рис. 13.2). Вихідним матеріалом цих діодів є тонкі пластинки, вирізані з монокристалу кремнію з електронним типом електропровідності, в яких сплавленням з алюмінієм або дифузією у кремній атомів алюмінію або бору створено шар з електропровідністю p -типу.

Кремнієвий диск з p - n переходом припаюють між молібденовими пластинками (рис. 13.2,а), які мають приблизно такий же коефіцієнт лінійного розширення, як і кремній, і гарну теплопровідність. Електрод, що приєднується до шару напівпровідника з електропровідністю n -типу, є катодом K , а електрод, що приєднується до шару з електропровідністю p -типу - анодом A . Отримана в такий спосіб двошарова монокристалічна p - n структура міститься в нерозбірному герметичному металоскляному або керамічному корпусі, який захищає її від зовнішніх впливів (вологи, бруду, механічних ушкоджень).

Нижня частина корпусу виконана у вигляді шестигранної гайки і закінчується шпилькою з різьбленням для вгвинчування вентиля до охолоджувача. Така конструкція корпусу діода забезпечує гарний відвід тепла від p - n переходу до навколишнього середовища і служить як зовнішній вивід катода. Зовнішнім виводом анода є гнучкий мідний провід з наконечником, ізольований від корпусу ізолятором.

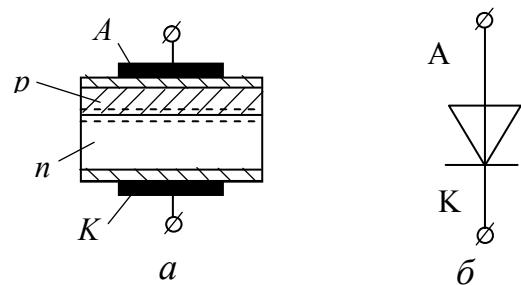


Рис. 13.2 - Кремнієвий діод: а - будова, б - умовне позначення

На рис. 13.3 зображені ВАХ кремнієвого діода на номінальний струм 200 А. Пряма гілка має дві характерні ділянки: на першій ділянці, що майже співпадає з віссю абсцис, вентиль має великий опір, із зростанням прямої напруги струм росте незначно; на другій ділянці при збільшенні $U_{пр} > U_0$ опір вентиля різко зменшується, а прямий струм $I_{пр}$ зростає до значень, обумовлених опором навантаження.

На зворотній гілці розрізняють три характерних ділянки: перша ділянка OA порівняно невелика, вентиль має ще малу провідність і через перехід проходить невеликий струм $I_{звор}$, вимірюваний міліамперами; на другій ділянці AB при значному збільшенні зворотної напруги струм $I_{звор}$ досягає насичення і зростає незначно; третя ділянка BB характерна тим, що при певних значеннях зворотної напруги струм $I_{звор}$ різко зростає і настає пробій p - n переходу. Величина напруги $U_{п}$, при якій зворотна гілка різко вигибається, називається пробивною напругою.

Для нормальної роботи вентиля припустиму (номінальну) зворотну напругу $U_{звор.н}$ беруть удвічі меншою порівняно з пробивною напругою $U_{п}$.

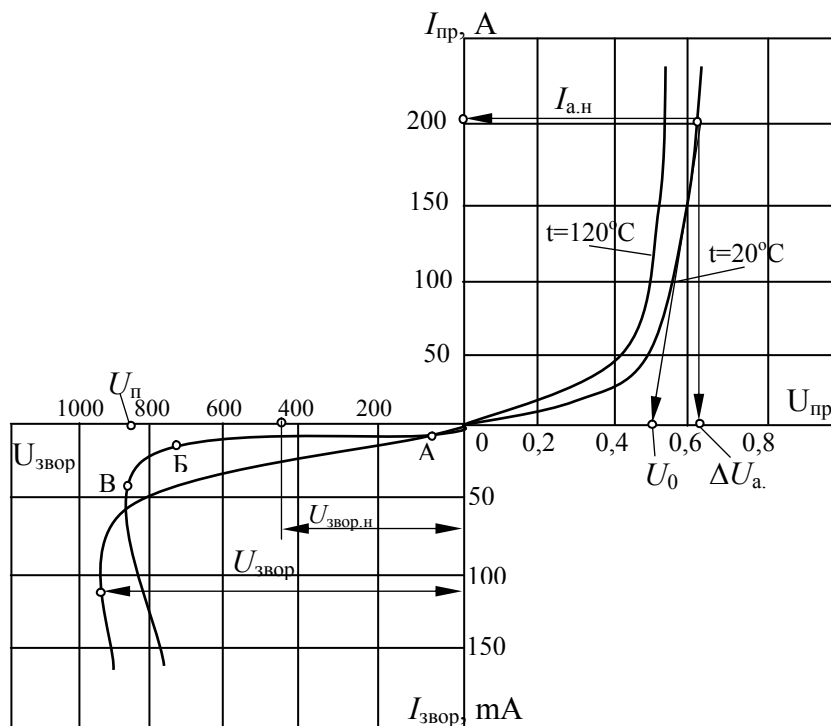


Рис. 13.3 - Статичні ВАХ при різних температурах p - n переходу кремнієвого діоду

Кремнієві силові вентиля випускають на струми від 10 до 1000 А і зворотні напруги від 100 до 1500 В.

Германієві діоди в порівнянні з кремнієвими мають менше пряме падіння напруги, а також менші значення припустимих зворотних напруг (500 – 600 В в порівнянні з 700 - 1500 В у кремнієвих діодів). Зворотний струм цих діодів на порядок більший, ніж у кремнієвих.

Селенові діоди допускають значно менші щільності прямого струму 50-60 mA/cm^2 і менші значення зворотної напруги 40÷50 В, ніж германієві і кремнієві, що допускають щільності прямого струму 40÷80 A/cm^2 і значення зворотної напруги 400÷1200 В.

Для підвищення значення $U_{звор.доп}$ широко використовують послідовне з'єднання селенових елементів в одному випрямному стовпчику, при цьому не потрібне застосування діляників напруги, як для германієвих і кремнієвих діодів. Характерною рисою селенових випрямлячів є більша перевантажувальна здатність (оскільки вони мають значну теплову інерцію) у порівнянні з германієвими і кремнієвими, а також менша чутливість до короткочасних перенапруг.

Відзначені властивості селенових діодів є стимулом до застосування їх у випрямлячах на низькі напруги і великі струми: зарядні пристрої, гальванічні й електролітичні установки та ін.

ВАХ напівпровідникових діодів залежать від температури p - n переходу. Із зростанням температури у всіх типів діодів мають місце зниження прямого падіння напруги при тих же прямих струмах, значне збільшення зворотного струму, супроводжуване невеликим збільшенням пробивної напруги в кремнієвих і селенових діодів.

13.1.3. Керовані діоди – тиристори. Основним елементом керованих діодів або, як їх частіше називають, тиристорів є кремнієвий диск з електронним типом електропровідності, в якому спеціальними технологічними методами створюється чотиришарова напівпровідникова структура, де чергуються шари з різними типами електропровідності (*p-n-p-n*). У результаті виходить монокристалічна структура з трьома *p-n* переходами $\Pi_1 - \Pi_2 - \Pi_3$, включеними послідовно (рис. 13.4,а).

Напівпровідникова структура тиристора монтується в металоскляний або в керамічний корпус, основа якого має шпильку з різьбленням і є зовнішнім виводом анода, а катодом - гнучкий мідний вивід з наконечником. Керуючий електрод виводиться у бік катода (рис. 13.4,в) або міститься в металокерамічному таблетковому корпусі круглої форми, що герметизують холодним зварюванням.

Таблетковий корпус діода за допомогою притискного пристрою з'єднується з охолоджувачами з алюмінієвих сплавів, забезпечуючи електричні і термічні контактні з'єднання структури корпусу й охолоджувачів, які мають розвинену поверхню. Струмівідвід від анода і катода тиристора здійснюється безпосередньо з охолоджувачів за допомогою мідних шин, вивід від керуючого електрода розташований збоку.

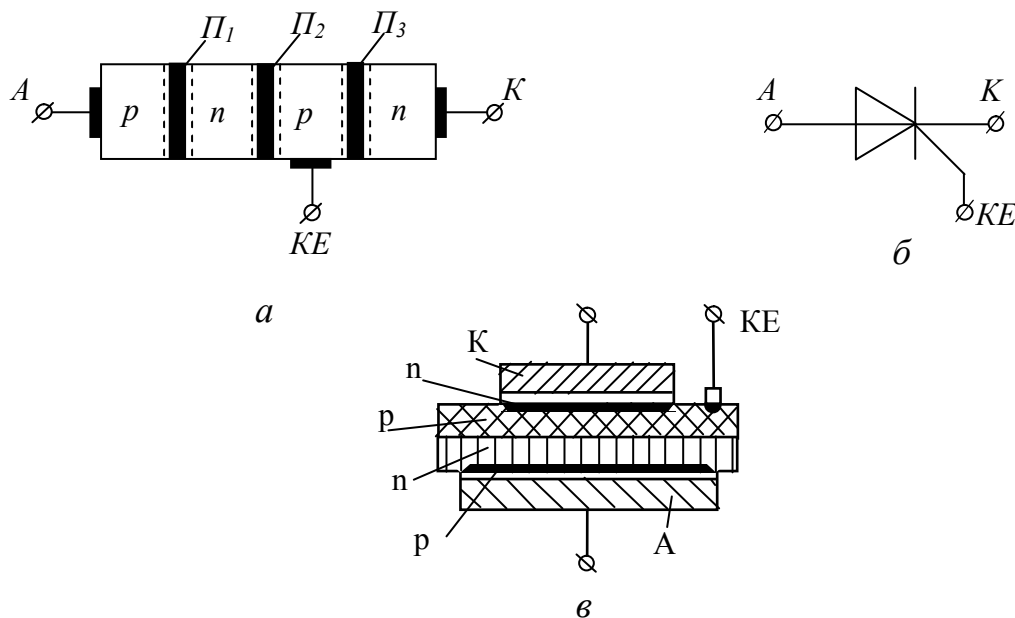


Рис. 13.4 - Керований кремнієвий діод – тиристор:
 а - схема чотиришарової структури; б - умовна позначка;
 в - будова тиристора (схематична)

При включенні тиристора до електричного кола з регульованим джерелом постійного струму (рис. 13.5), полярність якого можна змінювати, зв'язок між струмом, що проходить через тиристор у прямому і зворотному напрямках, і напругою між анодом і катодом відбиває статична ВАХ (рис. 13.6). Якщо коло керуючого електрода тиристора не підключене до джерела U_{κ} , а напруга між анодом і катодом не перевищує припустимого значення напруги перемикавання $U_{\text{пер}}$, то незалежно від полярності прикладеної напруги $U_{\text{дж}}$ між анодом і катодом струм практично не протікає.

Дійсно, якщо на анод тиристора подається негативний потенціал, а на катод - позитивний, то до середнього переходу Π_2 (рис. 13.5) буде прикладена пряма напруга $U_{\text{пр}}$, а до переходів Π_1 і Π_3 , що з'єднані послідовно, зворотна на-

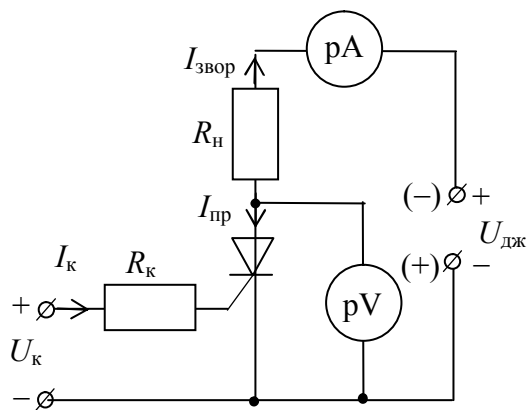


Рис.13.5 - Схема для зняття характеристик тиристора

пруга $U_{пер}$. Тиристор буде замкненим. Через нього і у зовнішньому колі проходить невеликий зворотний струм $I_{звор}$, що відповідає зворотній гілці ВАХ тиристора. Якщо ж до анода і катода тиристора прикласти потенціали з протилежною полярністю, то до переходу Π_2 буде прикладена зворотна напруга, що знову визначає закритий стан тиристора.

Перехід тиристора із закритого стану у відкритий може бути здійснений двома способами:

1) подачею на анод тиристора прямої напруги, що перевищує напругу перемикання $U_{пер}$ (рис. 13.6), при цьому різко зменшується його опір (тиристор відкривається) і збільшується струм, значення якого обмежується опором зовнішнього кола. Однак таке відкривання по аноду (напругою) для тиристорів не допускається;

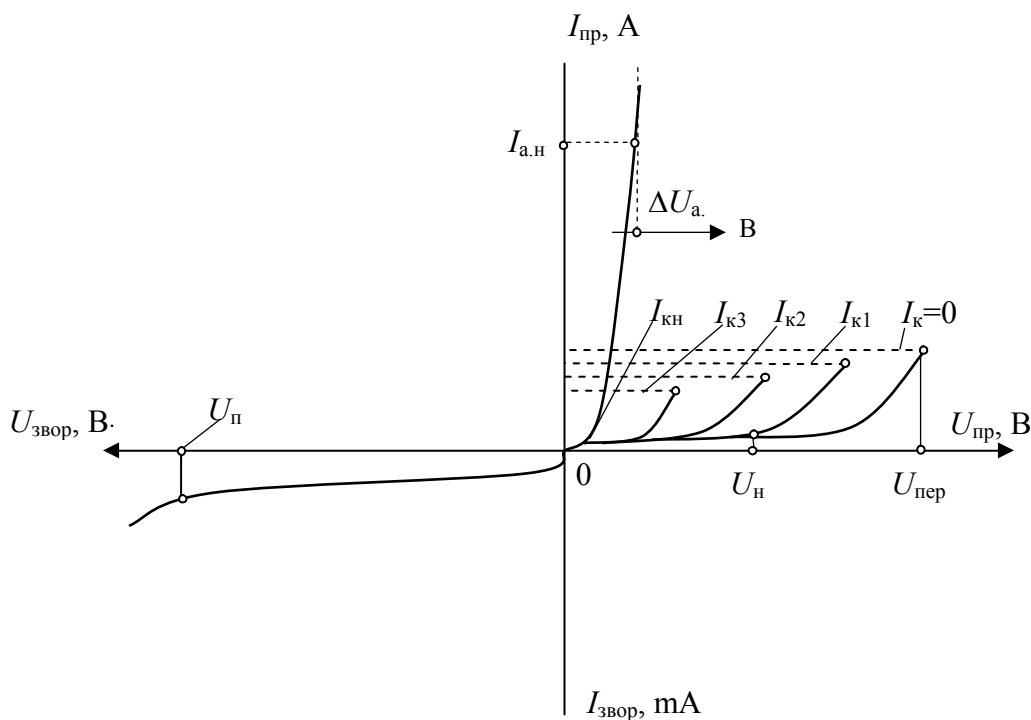


Рис.13.6 - Статичні ВАХ тиристора

2) подачею на керуючий електрод позитивного імпульсу напруги U_k при прямій напрузі на аноді тиристора. Під дією U_k через перехід Π_3 буде проходити невеликий струм I_k , що нейтралізує дію закритого переходу Π_2 , і тиристор відкривається при меншому значенні $U_{пер}$. У напрямку від анода до катода тиристора буде проходити прямий струм $I_{пр}$, значення якого практично обмежується тільки опором зовнішнього кола R_n , оскільки падіння напруги у відкритому тиристорі до-сить мале і не перевищує 0,5 - 1,2 В.

Такий процес відкриття тиристора відбувається дуже швидко (не більше 15 - 20 мкс). Із зростанням I_K знижується напруга перемикання $U_{пер}$ тиристора і відкритому стану приладу відповідає ВАХ звичайного некерованого діода. Якщо змінити полярність напруги, прикладеної між анодом і катодом тиристора, то раніше відкритий перехід Π_2 протягом 25 - 250 мкс (залежно від потужності тиристора) відновлює свої замикаючі властивості і тиристор знову готовий до роботи.

При живленні тиристора від джерела постійного струму його замикаючі властивості можна відновити тільки шляхом розриву анодного кола або за допомогою спеціальних пристроїв короткочасно створити на аноді негативну напругу. При живленні від джерела змінної напруги тиристор закривається під час негативної напівхвилі напруги.

13.1.4. Напівпровідникові тріоди – транзистори є електронними приладами, заснованими на властивостях двох розташованих досить близько один від одного електронно-діркових $p-n$ -переходів. Наявність трьох шарів з різною провідністю спричиняє на межах їхнього розділу два $p-n$ -переходи, що характеризуються динамічною рівновагою.

Транзистори діляться на дві групи - біполярні й уніполярні. До біполярних належать транзистори, струм у яких обумовлений носіями двох типів (електронами й дірками). В уніполярних (їх ще називають польовими) транзисторах струм обумовлений носіями тільки одного знака (або електронами або дірками). Будову і принцип роботи транзистора розглянемо на прикладі біполярних транзисторів.

Біполярний транзистор являє собою тришарову структуру типу $n-p-n$ (рис. 13.7) або типу $p-n-p$. На рис. 13.8,а і б показані умовні зображення цих транзисторів. Транзистор називається біполярним тому, що фізичні процеси в ньому пов'язані з рухом носіїв зарядів обох знаків (вільних дірок і електронів).

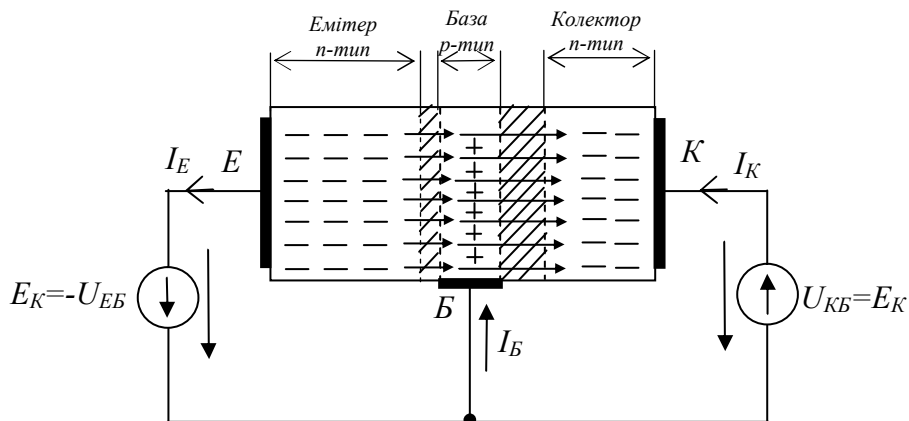


Рис.13.7 - Біполярний транзистор типу $n-p-n$

Середній шар транзистора називається **базою Б**, один крайній шар - **колектором К**, а інший крайній шар - **емітером Е**. Кожний шар має вивід, за допомогою якого транзистор включається до кола.

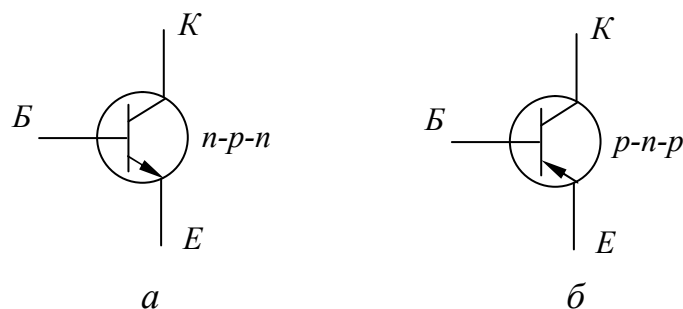


Рис.13.8 - Позначення транзисторів: *a* - типу *n-p-n*; *б* - типу *p-n-p*

Можливі три варіанти схеми включення транзистора (табл. 13.1): зі спільним емітером (СЕ), спільною базою (СБ) і спільним колектором (СК).

Незалежно від схеми включення транзистори можуть працювати в одному з чотирьох режимів, що відрізняються полярністю напруги на переходах емітер-база і колектор-база.

1. Нормальний активний режим, в якому перехід емітер-база включений в прямому напрямку, а перехід колектор-база – у зворотному;

2. Інверсний активний режим, в якому перехід емітер-база включений у зворотному напрямку, а перехід колектор-база - у прямому;

Таблиця 13.1 - Схеми включення транзисторів

зі спільним емітером	зі спільним базою	зі спільним колектором

3. Режим відсічення, в якому обидва переходи включені у зворотному напрямку;

4. Режим насичення, в якому обидва переходи включені в прямому напрямку.

Режим насичення і режим відсічення використовують в цифрових і імпульсних пристроях.

У схемах, де транзистор застосовують для посилення сигналів, основним є його активний режим роботи. При підключенні позитивного полюса джерела постійної ЕРС $E_E = -U_{EB}$ до бази потенційний бар'єр *p-n* переходу (*n-p-n* транзистор на рис. 13.7) між базою й емітером знижується. Вільні електрони дифундують (інжектуються) з емітера до бази, створюючи струм I_E в колі емітера. Якщо між колектором і базою включене джерело постійної ЕРС $E_K = U_{KB}$ негативним полюсом до бази, то збільшується потенційний бар'єр *p-n* переходу між базою і колектором. Більша частина електронів, інжектованих з емітера до бази, втягується сильним електричним полем з напруженістю E_{KB} цього *p-n* переходу, створюючи струм I_K у колі колектора. Помітимо, що електричне поле в переході колектор-база існує і при розімкнутій гілці з джерелом ЕРС E_K . Тому струм

колектора від значення напруги $U_{КБ} > 0$ залежить мало. Незначна частина вільних електронів, інжекттованих з емітера до бази, утворює струм I_B у колі бази.

Зв'язок між струмами колекторного й емітерного кіл транзистора характеризується коефіцієнтом передачі струму

$$\alpha = i_K/i_E. \quad (13.1)$$

Число рекомбінуючих у базі основних носіїв заряду емітера визначає струм бази: $i_B = i_E - i_K$. При розгляді підсилювальних властивостей транзисторів для змінних сигналів схеми їхнього включення розглядають без джерел живлення, оскільки в порівнянні з іншими опорами внутрішні опори джерел живлення досить малі. Найбільш часто використовують схему зі СЕ, за допомогою якої здійснюють посилення за струмом, напругою, потужністю. Для цієї схеми коефіцієнти підсилення визначаються з виразів:

$$\text{за струмом} \quad k_i = \frac{i_{\text{вих}}}{i_{\text{вх}}} = \frac{i_K}{i_B} = \frac{\alpha}{1-\alpha} = \beta > 1; \quad (13.2)$$

$$\text{за напругою} \quad k_u = \frac{u_{\text{вих}}}{u_{\text{вх}}} = \frac{i_K \cdot R_H}{i_B \cdot R_{\text{вх}}} = \alpha \frac{R_H}{R_{eб}} > 1; \quad (13.3)$$

$$\text{за потужністю} \quad k_p = k_i \cdot k_u = \frac{\alpha^2}{1-\alpha} \cdot \frac{R_H}{R_{eб}} > 1; \quad (13.4)$$

де $R_{eб}$ - опір переходу емітер-база; $\beta = \frac{\alpha}{1-\alpha}$.

При цьому вихідна напруга $u_{\text{вих}}$ перебуває у протифазі з вхідною напругою $u_{\text{вх}}$.

Для схеми транзистора зі СБ коефіцієнти підсилення за струмом, напругою і потужністю знаходять з виразів

$$k_i = \frac{i_{\text{вих}}}{i_{\text{вх}}} = \frac{i_K}{i_B} = \alpha < 1; \quad (13.5)$$

$$k_u = \frac{u_{\text{вих}}}{u_{\text{вх}}} = \frac{i_K \cdot R_H}{i_B \cdot R_{\text{вх}}} = \alpha \frac{R_H}{R_{eб}} > 1; \quad (13.6)$$

$$k_p = k_i \cdot k_u = \alpha^2 \cdot \frac{R_H}{R_{eб}} > 1. \quad (13.7)$$

Включення транзистора за схемою зі СБ застосовується звичайно на більш високих частотах, однак ця схема характеризується коефіцієнтом підсилення за струмом меншим за одиницю $k_i < 1$. При цьому вихідна напруга $u_{\text{вих}}$ буде у фазі із вхідною напругою $u_{\text{вх}}$.

Для схеми транзистора зі СК коефіцієнти підсилення за струмом, напругою й потужністю знаходять з виразів:

$$k_i = \frac{i_{\text{вих}}}{i_{\text{вх}}} = \frac{i_e}{i_B} = \frac{i_K + i_B}{i_B} = \beta + 1 = \frac{1}{1-\alpha} > 1; \quad (13.8)$$

$$k_u = \frac{u_{\text{вих}}}{u_{\text{вх}}} = \frac{u_{\text{вих}}}{u_{\text{вих}} + u_{eб}} = \frac{i_e \cdot R_H}{i_e (R_H + R_{eб})} = \frac{R_H}{R_H + R_{eб}} \leq 1; \quad (13.9)$$

$$k_p = k_i \cdot k_u \cong k_i = \beta + 1 = \frac{1}{1 - \alpha} > 1 . \quad (13.10)$$

Вихідна напруга для схеми зі СК перебуває у фазі з вхідною.

Розглядаючи основні підсилювальні схеми, виходять з того, що робота транзистора відбувається на лінійних ділянках його характеристик, що відповідає малим вхідним сигналам, і при розрахунку коефіцієнтів підсилення транзисторно-резисторних підсилювачів, з огляду на умови роботи на середніх частотах, впливом вхідних, перехідних і вихідних ємностей зневажають.

Основними характеристиками транзисторів є **статичні вхідна й вихідна характеристики**, вигляд яких залежить від схеми включення транзистора.

Як приклад розглянемо ці характеристики для схеми зі СЕ.

Під вхідною характеристикою транзистора розуміють залежність вхідного струму від вхідної напруги при постійній вихідній напрузі. Для схеми зі СЕ це $I_{\bar{b}}(U_{\bar{b}})$ при $U_{\kappa} = \text{const}$.

Під вихідною характеристикою розуміють залежність вихідного струму від вихідної напруги при постійному вхідному струмі. Для схеми зі СЕ це $I_{\kappa}(U_{\kappa})$ при $I_{\bar{b}} = \text{const}$.

Статичні характеристики біполярного транзистора показані на рис. 13.9. Область робочих режимів транзистора на його характеристиках обмежена максимально допустимими значеннями струму $I_{\kappa, \text{max}}$, напруги $U_{\kappa, \text{max}}$ і потужності розсіювання $P_{\text{роз. max}} \approx U_{\kappa, \text{max}} \cdot I_{\kappa}$, а також нелінійними викривленнями при малих значеннях струму колектора.

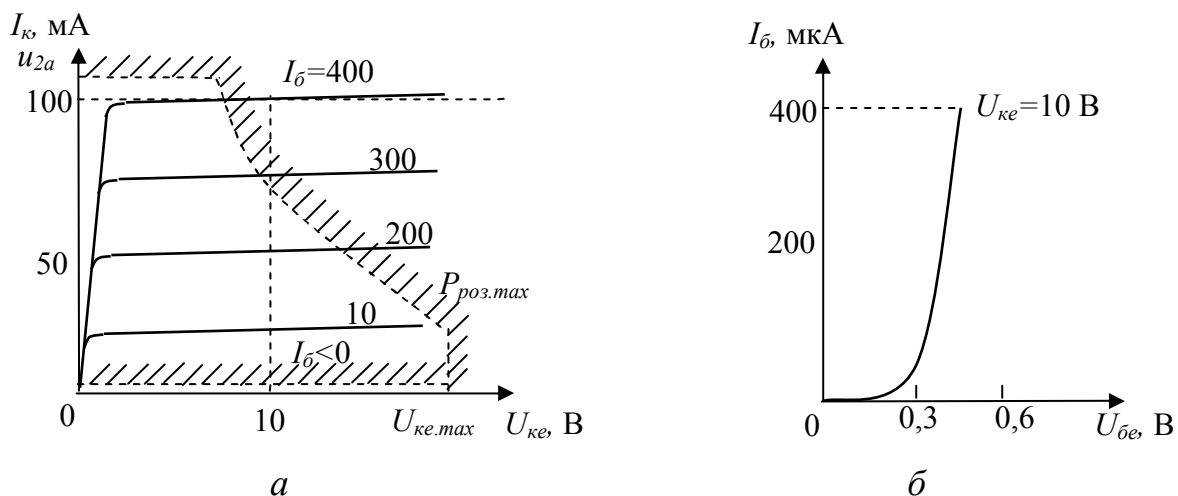


Рис.13.9 - Статичні характеристики транзистора в схемі зі СЕ:
а - вихідна характеристика; б - вхідна характеристика

Основна позитивна якість біполярних транзисторів - висока швидкодія при досить великих струмах колектора. Наявність зовнішніх тепловідводів дозволяє біполярним транзисторам працювати при потужності розсіювання до 50 Вт і струмах до 10 А. Їхній основний недолік - невеликий опір вхідного кола при включенні за схемою зі СЕ (1 - 10 кОм).

13.2. Напівпровідникові випрямлячі

Випрямлячем називається пристрій, призначений для перетворення змінного струму на постійний. На практиці застосовують багато схем випрямлячів як однофазного так і трифазного струму. Вибір тієї або іншої схеми визначається властивостями застосовуваних діодів і умовами роботи випрямляча. Наприклад, у випрямних агрегатах для зарядки акумуляторних батарей, де потрібні невеликі значення випрямленої напруги, найбільш прийнятними виявилися схеми однофазного випрямлення з селеновими діодами. При випрямленні високих напруг до 1000 - 1500 В часто застосовують послідовне з'єднання діодів або застосовують діоди на великі значення $U_{звор}$.

Розглянемо роботу основних схем випрямлення однофазного і трифазного струму, припускаючи для простоти розрахунків і полегшення розуміння фізичної сутності процесів в елементах схем, що випрямляч працює на активне навантаження і складається з ідеальних діодів і трансформатора, що дозволяє знехтувати падіннями напруги, а також зворотними струмами діодів, індуктивностями і намагнічуючим струмом трансформатора.

Основними елементами випрямляча (рис. 13.10) є: силовий трансформатор 1, необхідний для узгодження вхідної U_M і вихідної U_d напруг випрямляча, а також для електричного розділення живильної мережі і кола навантаження; блок випрямних елементів 2, що здійснює випрямлення змінного струму; згладжуючий фільтр 3, який забезпечує зменшення пульсації випрямленого стру-

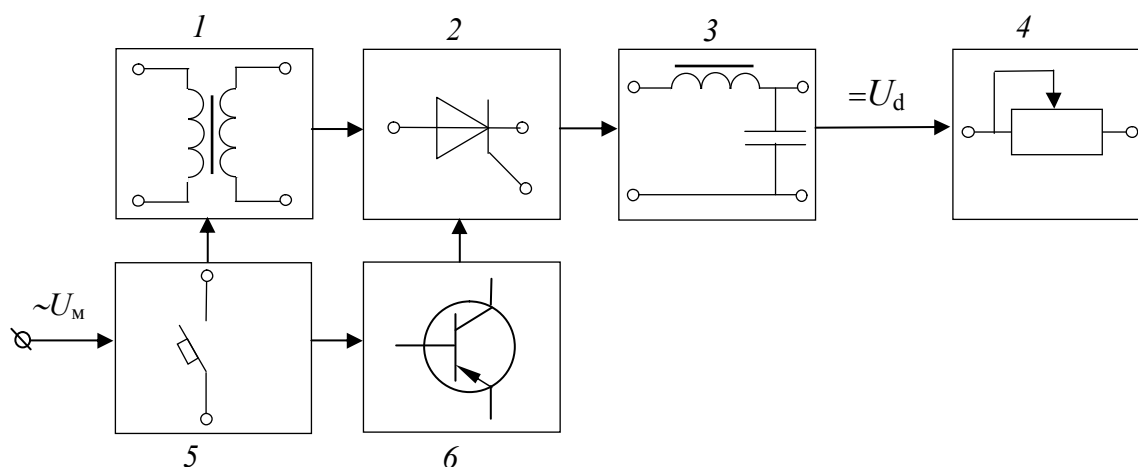


Рис.13.10 - Структурна схема випрямляча

му в колі навантаження 4. Якщо випрямляч керований, то до блок-схеми входить ще вузол 6, який містить систему керування випрямним блоком (тиристорами). Для захисту випрямляча від пошкоджень при аварійних режимах до його схеми входить блок захисту і сигналізації 5.

У деяких випадках у схемі випрямляча можуть бути відсутні окремі елементи, наприклад фільтр 3, при роботі випрямляча на навантаження індуктивного характеру, або силовий трансформатор 1 у випадку безтрансформаторного включення випрямляча.

13.2.1. Випрямлячі однофазного струму. Розглянемо схему *однапівперіодного однофазного випрямляча* (рис. 13.11). У цій схемі трансформатор має одну вторинну обмотку, напруга u_2 якої змінюється за синусоїдальним законом $u_2 = U_{2\max} \sin \omega t$. Струм у колі навантаження R_d проходить тільки в позитивні напівперіоди (рис. 13.11,б), коли точка a вторинної обмотки, до якої приєднаний анод діода VD , має позитивний потенціал відносно точки b . У негативні напівперіоди (інтервал часу $t_1 - t_2$) до діода VD прикладається зворотна напруга, і він буде закритий.

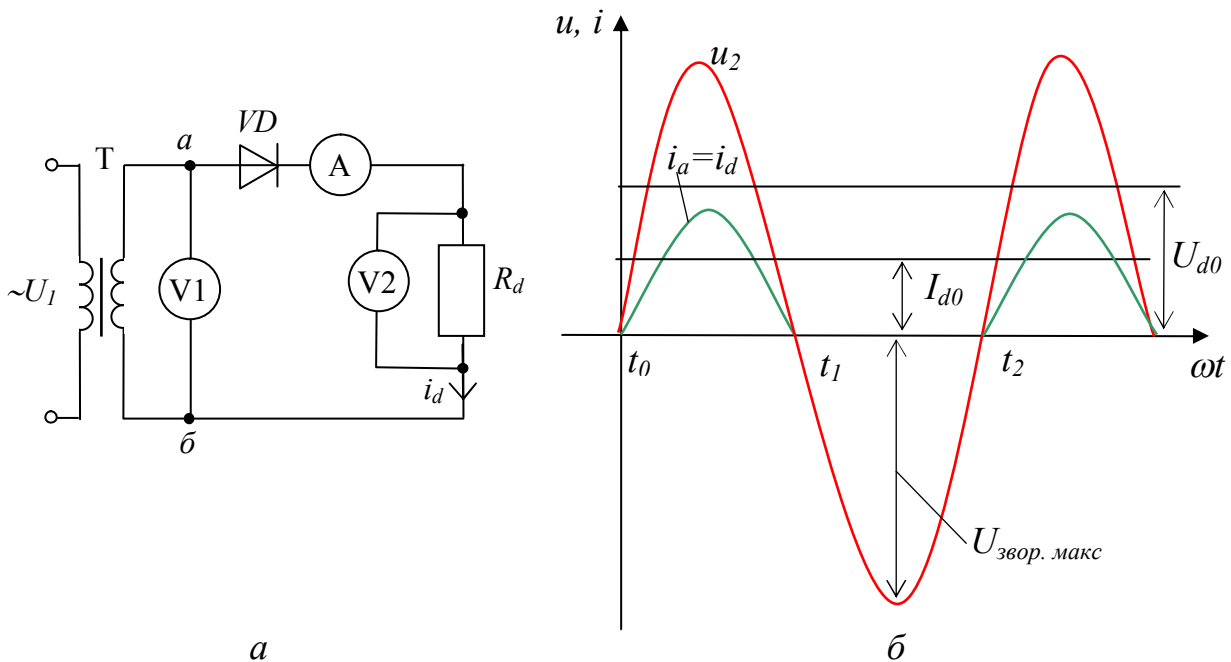


Рис.13.11 - Однапівперіодний однофазний випрямляч:
а - схема; б - діаграми напруг і струмів

Випрямлена напруга u_d описується позитивними напівхвилями напруги u_2 вторинної обмотки трансформатора. Середнє за період значення напруги на навантаженні називається *випрямленою напругою* U_d . Струм у навантаженні R_d проходить в одному напрямку, але має пульсуючий характер і являє собою випрямлений струм i_d .

Випрямлені напруга u_d і струм i_d містять постійну складову U_{d0} і I_{d0} і змінну складову (пульсації) $U_{d\sim}$ і $I_{d\sim}$. Якість роботи випрямляча оцінюють співвідношеннями між постійними складовими і пульсаціями напруги і струму.

Для однапівперіодної схеми справедливі наступні співвідношення між напругами, струмами і потужностями в окремих елементах випрямляча.

Середнє значення випрямленої напруги

$$U_{d0} = 0,45 \cdot U_2. \quad (13.11)$$

Максимальне значення зворотної напруги, що прикладається до діода в непровідну частину періоду:

$$U_{звор. макс} = \sqrt{2} \cdot U_2 = 3,14 \cdot U_{d0}, \quad (13.12)$$

де U_2 - діюче значення напруги вторинної обмотки трансформатора T .

Середнє значення струму, що проходить через діод і навантаження:

$$I_a = I_d = U_{d0}/R_d. \quad (13.13)$$

Середня потужність, що віддається до навантаження, визначається добутком напруги U_d і струму I_d , тобто $P_d = U_d \cdot I_d$.

Розрахункова (типова) потужність трансформатора, яка визначає його габарити, в 3,09 рази більша за потужність у навантаженні R_d :

$$S_{\text{тр}} = 3,09 U_d \cdot I_d. \quad (13.14)$$

Таким чином, *розрахункова потужність трансформатора, навантаженого однонапівперіодним випрямлячем, більша за потужність у навантаженні, оскільки у його вторинній обмотці проходить несинусоїдальний струм, який має постійну і змінну складові, а в первинній обмотці, крім струму основної частоти f_1 наявні струми вищих гармонік*. Стосовно мережі живлення ці струми є реактивними і, не створюючи корисної потужності, тільки нагрівають обмотки трансформатора випрямляча.

Діюче значення струму вторинної обмотки трансформатора визначається співвідношенням

$$I_2 = 1,57 \cdot I_d. \quad (13.15)$$

З формули (13.16) випливає, що показання амперметра електромагнітної системи А, який включений до кола вторинної обмотки трансформатора Т (рис. 13.11,а), будуть в 1,57 рази перевищувати показання магнітоелектричного амперметра А, оскільки перший вимірює діюче значення струму, а другий - середній струм у колі навантаження.

Діюче значення напруги вторинної обмотки

$$U_2 = 2,22 \cdot U_d. \quad (13.16)$$

Діюче значення струму первинної обмотки з урахуванням коефіцієнта трансформації $k_{\text{тр}} = w_1/w_2$

$$I_1 = 1,51 \frac{1}{k_{\text{тр}}} I_d. \quad (13.17)$$

Розглянута схема однонапівперіодного випрямляча має недоліки: погане використання трансформатора, велика зворотна напруга на діодах, великий коефіцієнт пульсації випрямленої напруги.

До позитивних якостей даної схеми можна віднести її простоту (застосовується тільки один діод) і простоту живильного трансформатора.

Двонапівперіодна однофазна (нульова) схема складається з трансформатора, що має одну первинну і дві послідовно з'єднані вторинні обмотки з виводом загальної (нульової) точки цих обмоток (рис. 13.12,а). Коефіцієнт трансформації $k_{\text{тр}}$ визначається відношенням U_1/U_2 , де U_2 - напруга однієї вторинної обмотки (фазна напруга).

Вільні кінці вторинних обмоток а і б приєднують до анодів діодів VD_1 і VD_2 , катоди яких з'єднують разом. Навантаження R_d включають між катодами діодів (позитивний полюс випрямляча), і нульовим виводом 0 трансформатора (негативний полюс випрямляча).

Діоди в цій схемі, як і вторинні обмотки трансформатора, працюють по черзі, пропускаючи до навантаження струм при позитивних значеннях анодних напруг u_{2a} і $u_{2б}$ (рис. 13.12,б), в якості яких приймають напрямки, що збігаються з провідностями діодів.

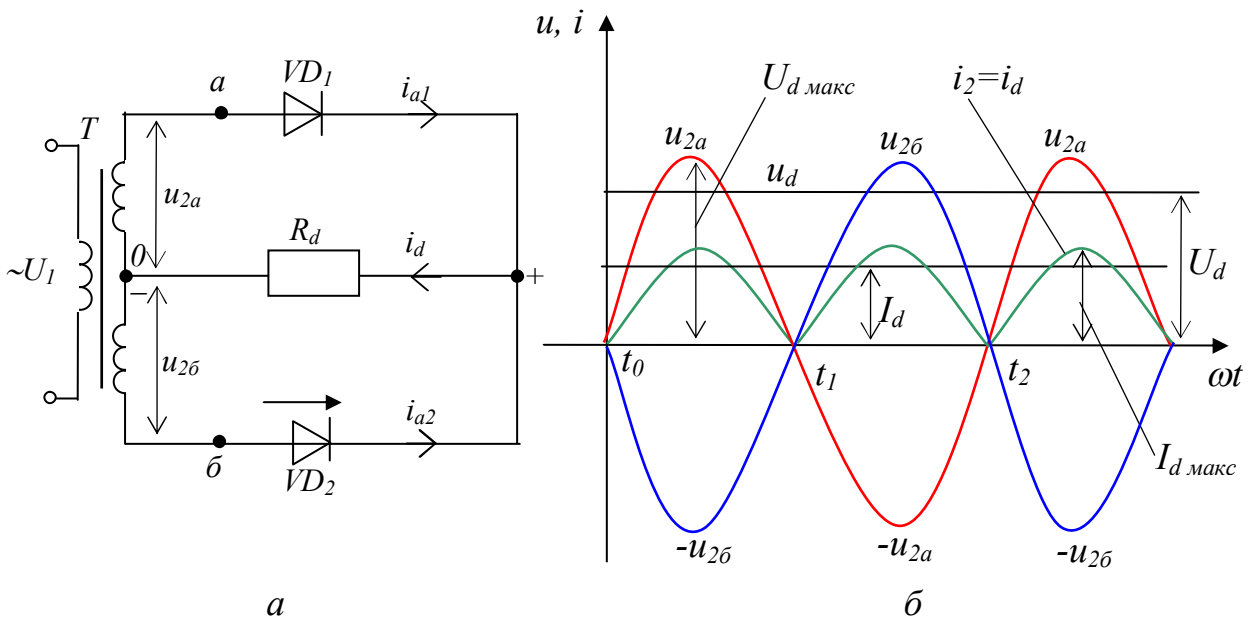


Рис.13.12 - Двонапівперіодний однофазний випрямляч:
а - схема; б - діаграми напруг і струмів

Для даної схеми справедливі наступні співвідношення між напругами, струмами і потужностями в окремих елементах випрямляча.

Середнє значення випрямленої напруги при ідеальних діодах і трансформаторі

$$U_{d0} = 0,9 \cdot U_2 . \quad (13.18)$$

Діод, що не працює в негативну частину періоду, знаходиться під впливом зворотної напруги, яка дорівнює подвійній фазній, оскільки позитивний потенціал виводу *a* (б) вторинної обмотки трансформатора через відкритий діод *VD*₁ (*VD*₂) подається до катода діода *VD*₂ (*VD*₁), а анод закритого діода має негативний потенціал.

Максимальне значення зворотної напруги

$$U_{звор.макс} = 2\sqrt{2} \cdot U_2 = 3,12 \cdot U_{d0} . \quad (13.19)$$

Середнє значення випрямленого струму в навантаженні

$$I_d = \frac{U_d}{R_d} = \frac{U_2}{1,11 \cdot R_d} . \quad (13.20)$$

Середнє значення струму через кожний діод в два рази менше за струм *I*_д, що проходить через навантаження, тобто *I*_а = 0,5 · *I*_д.

Діюче значення струму діода *I*_{а,діюч} дорівнює діючому значенню струму вторинної обмотки трансформатора *I*₂ і визначається співвідношенням

$$I_2 = 0,785 \cdot I_d = 1,57 \cdot I_a . \quad (13.21)$$

Діюче значення напруги вторинної обмотки

$$U_2 = 1,11 \cdot U_{d0} . \quad (13.22)$$

Діюче значення струму первинної обмотки з урахуванням коефіцієнта трансформації *k*_{тр} буде дорівнювати:

$$I_1 = \sqrt{2} \frac{1}{k_{mp}} I_2 = 1,11 \frac{1}{k_{mp}} I_d . \quad (13.23)$$

Розрахункові потужності обмоток трансформатора визначаються добутками діючих значень струму і напруги:

$$S_2 = 2 \cdot I_2 \cdot U_2 = 2 \cdot 0,785 \cdot I_d \cdot 1,11 \cdot U_{d0} = 1,74 \cdot P_d; \quad (13.24)$$

$$S_1 = I_1 \cdot U_1 = 1,11 \frac{1}{k_{mp}} I_d \cdot 1,11 k_{mp} U_{d0} = 1,23 P_d. \quad (13.25)$$

Розрахункова потужність трансформатора

$$S_{mp} = \frac{S_1 + S_2}{2} = \frac{1,23 + 1,74}{2} P_d = 1,48 \cdot P_d. \quad (13.26)$$

Частота основної гармоніки змінної складової випрямленої напруги в даній схемі дорівнює подвійній частоті мережі $2f_l$. Коефіцієнт пульсації напруги на виході випрямляча

$$q = \frac{2}{m^2 - 1} = \frac{2}{2^2 - 1} = 0,67, \quad (13.27)$$

де m - число фаз випрямляча, тобто число напівхвиль випрямленої напруги, що доводиться на один період змінного струму, який живить випрямляч.

Однофазна мостова схема складається з трансформатора T з двома обмотками і чотирьох діодів VD_1, VD_2, VD_3 і VD_4 , з'єднаних за схемою моста (рис. 13.13,а). До однієї діагоналі моста (точки 1, 3) приєднується вторинна обмотка, до іншої (точки 2, 4) включається навантаження R_d . Загальна точка катодів діодів VD_1 і VD_2 є позитивним полюсом випрямляча, а негативним - точка зв'язку анодів діодів VD_3 і VD_4 .

Діоди в цій схемі працюють парами по черзі. У позитивний напівперіод напруги u_2 проводять струм діоди VD_1 і VD_3 , а до діодів VD_2 і VD_4 прикладається зворотна напруга й вони закриті. У негативний напівперіод напруги u_2 будуть проводити струм діоди VD_2 і VD_4 , а діоди VD_1 і VD_3 витримують зворотну напругу.

Струм i_d у навантаженні проходить весь час в одному напрямку - від з'єднаних катодів діодів VD_1 і VD_2 до анодів діодів VD_3 і VD_4 . Струм i_2 у вторинній обмотці трансформатора (рис. 13.13,б) змінює свій напрямок кожний півперіод й буде синусоїдальним. Постійної складової струму у вторинній обмотці немає. Отже не буде підмагнічування осердя трансформатора постійним магнітним потоком. Струм у первинній обмотці трансформатора також є синусоїдальним.

Можливо використання цієї схеми випрямляча і без трансформатора, якщо напруга мережі u_1 підходить за величиною для одержання необхідного значення U_{d0} і не потрібна ізоляція кола випрямленого струму від мережі.

13.2.2. Випрямлячі трифазного струму. За аналогією з схемами однофазного струму для випрямлення трифазного струму застосовують трифазну мостову схему. **Трифазна мостова схема** наведена на рис. 13.14. Випрямляч у даній схемі складається з трансформатора, первинні і вторинні обмотки якого з'єднуються в «зірку» або «трикутник», і шести діодів, які можуть бути розбиті на дві групи:

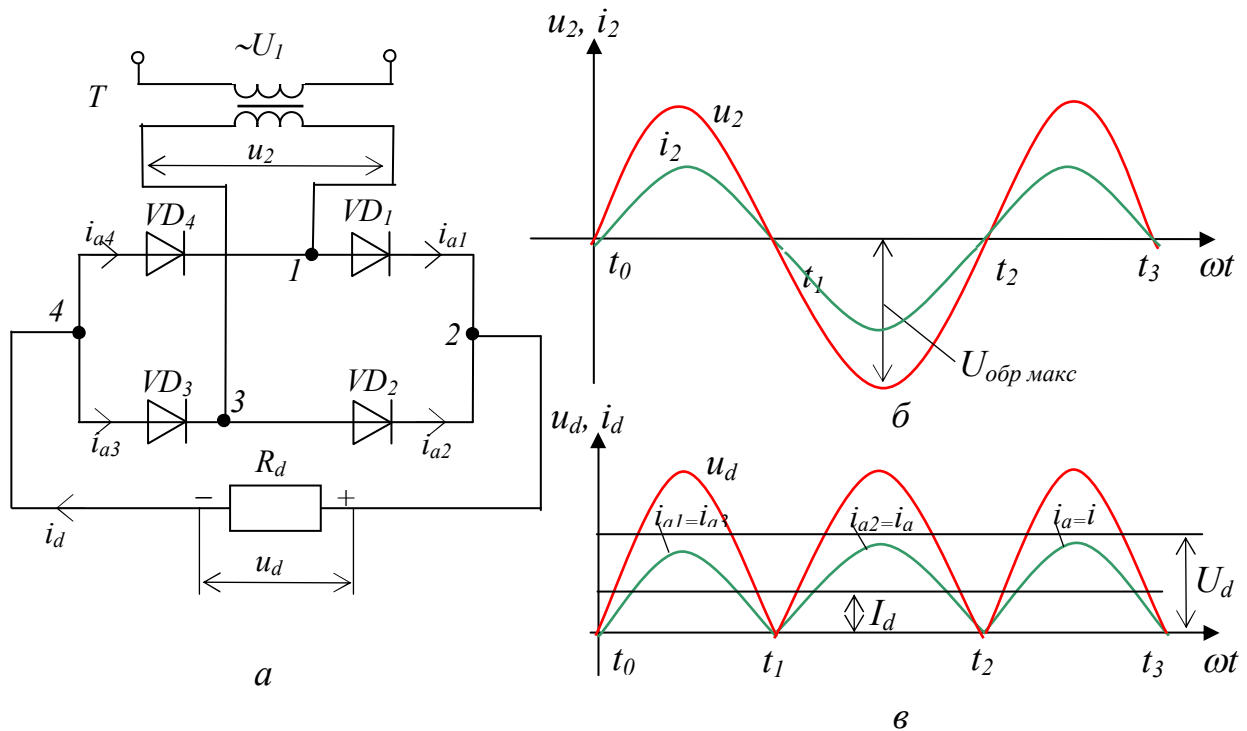


Рис.13.13 - Однофазний мостовий випрямляч: а - схема; б і в - діаграми напруг і струмів на елементах схеми

- 1) катодну або непарну (діоди VD_1 , VD_3 і VD_5), у якої катоди діодів електрично зв'язані і їхній загальний вивід є позитивним полюсом для зовнішнього кола, а аноди приєднані до виводів вторинних обмоток трансформатора;
- 2) анодну або парну (діоди VD_2 , VD_4 і VD_5), у якої аноди діодів електрично зв'язані між собою, а катоди з'єднуються з анодами першої групи. Загальна точка зв'язку анодів є негативним полюсом для зовнішнього кола.

У цій групі діодів протягом кожної третини періоду працює діод із найбільш високим потенціалом анода (рис. 13.14,б). В анодній групі в дану частину періоду працює той діод, катод якого має найбільш негативний потенціал стосовно загальної точки анодів.

Діоди катодної групи відкриваються в момент перетинання позитивних ділянок синусоїд (точки *a*, *б*, *в* і *г* на рис. 13.14,б), а діоди анодної групи - в момент перетинання негативних ділянок синусоїд (точки *к*, *л*, *м* і *н*). Кожний з діодів працює протягом однієї третини періоду (рис. 13.14,е).

При миттєвій комутації струму в трифазній мостовій схемі в будь-який момент часу проводять струм два діоди - один з катодної, інший з анодної групи, при цьому будь-який діод однієї групи працює по черзі з двома діодами іншої групи, з'єднаними з різними фазами вторинної обмотки (рис. 13.14,г і д). Через кожну фазу трансформатора струм i_2 буде проходити протягом 2/3 періоду: 1/3 періоду - позитивний і 1/3 - негативний. Струм i_d у навантаженні весь час проходить в одному напрямку.

Випрямлена напруга u_d (рис. 13.14,в) у цій схемі описується верхньою ча-

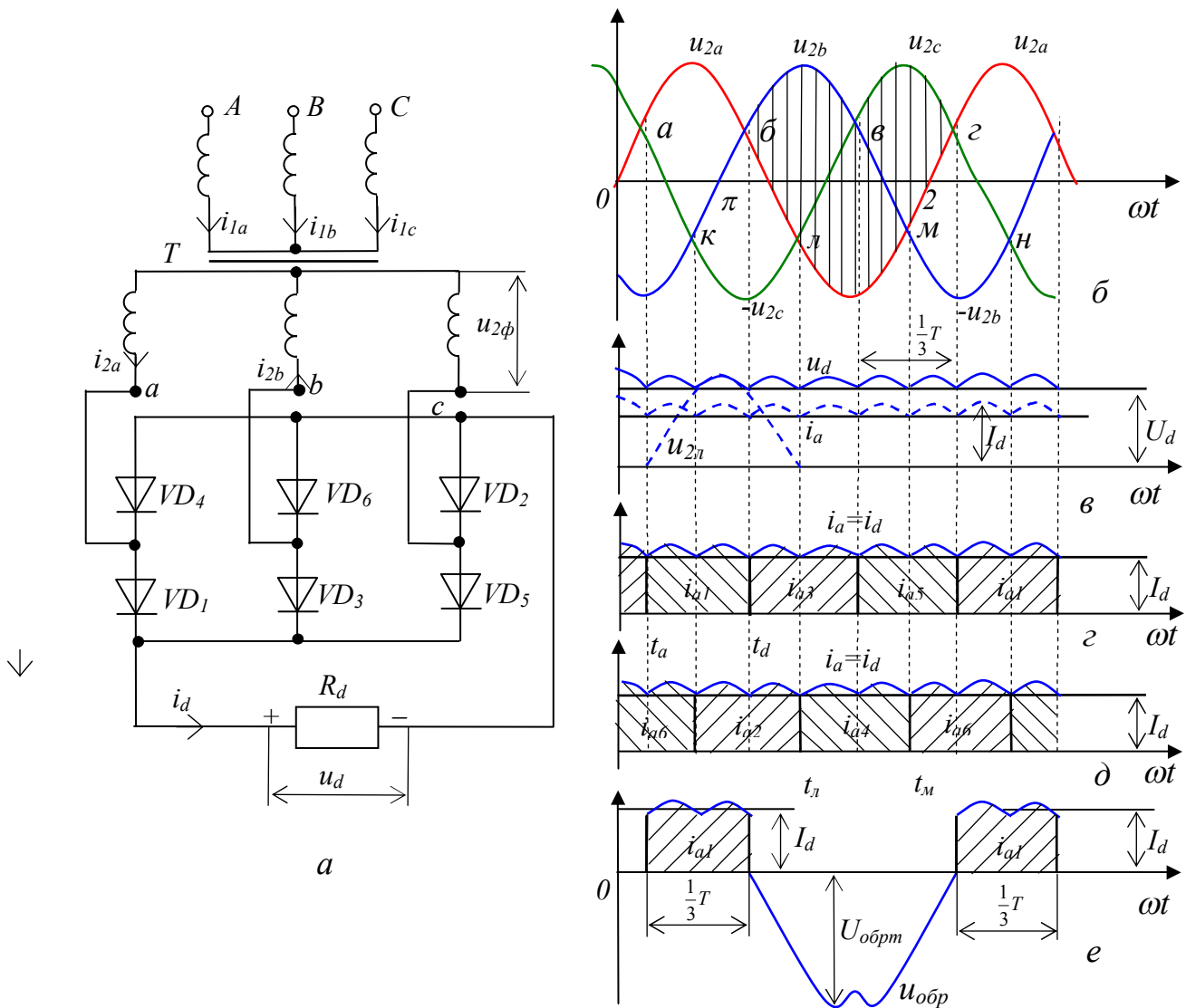


Рис. 13.14 - Трифазна мостова схема випрямляча:
 а - з'єднання елементів; б – е - діаграми напруг і струмів

стиною кривих міжфазних (лінійних) напруг $u_{2л}$ (пунктирна крива на рис. 13.14,в). Частота пульсацій кривої u_d дорівнює $6f_1$, коефіцієнт пульсацій напруги на виході випрямляча дорівнює:

$$q = \frac{U_{\max}}{U_{d0}} = \frac{2}{m^2 - 1} = \frac{2}{6^2 - 1} = 0,057. \quad (13.28)$$

Зворотна напруга на закритому діоді визначається різницею потенціалів його катода й анода. Ординати кривої $u_{звор}$ для діода VD_1 показані на рис. 13.14,б штрихуванням, а на рис. 13.14,е крива $u_{звор}$ зображена повністю.

Максимальне значення зворотної напруги на діоді в трифазній мостовій схемі дорівнює амплітуді лінійної напруги вторинної обмотки трансформатора.

Випрямлений струм i_d при роботі на чисто активне навантаження повністю повторює криву u_d (пунктирна крива на рис. 13.14,в).

Співвідношення між напругами і струмами в трифазній мостовій схемі наведені в табл. 13.2.

Таблиця 13.2 - Співвідношення між струмами і напругами у випрямлячах

Схема випрямляча	Залежність U_d від кута регулювання в безперервному режимі	$U_{d0}/U_{2ф}$	$U_{звор. max}/U_{d0}$	I_d/I_d	$I_{a, діюч}/I_d$	I_2/I_d	$S_{тр}/P_d$	Коефіцієнт пульсації, %
Однофазна двонапівперіодна (нульова)	$U_d = U_{d0} \cdot \cos\alpha$	0,9	3,14	0,5	0,785	0,785	1,48	67
					0,71	0,71	1,34	
Однофазна мостова	$U_d = U_{d0} \cdot \cos\alpha$	0,9	1,57	0,5	0,785	1,11	1,23	67
					0,71	1,0	1,11	
Трифазна мостова	$U_d = U_{d0} \cdot \cos\alpha$	2,34	1,05	0,33	0,577	0,817	1,05	6

Примітки: 1. Для некерованих випрямлячів $\alpha = 0$, $\cos\alpha = 1$ і $U_d = U_{d0}$.

2. Для всіх схем прийняте U_2 - фазна напруга й $X_2 = 0$.

3. Співвідношення для $I_{a, діюч}$, I_2 , $S_{тр}$ зазначені при $L_d = 0$ (чисельник) і $L_d = \infty$ (знаменник).

13.2.3. Керовані випрямлячі. У багатьох практичних випадках випрямлячі повинні забезпечувати можливість плавного регулювання середнього значення випрямленої напруги U_d , наприклад для регулювання частоти обертання двигунів постійного струму, при зарядці акумуляторних батарей та ін.

При використанні у випрямлячах некерованих діодів середнє значення випрямленої напруги U_d , як це видно з виразів (13.19), (13.31) і табл. 13.2, пропорційне напрузі $U_{2ф}$. Тому регулювання U_d у цьому випадку можливе тільки за рахунок зміни напруги вторинної обмотки трансформатора. Більші можливості для регулювання випрямленої напруги дає застосування у схемах випрямлення керованих діодів - тиристорів.

Принцип дії керованого випрямляча. На рис. 13.15,а зображено однофазну нульову схему керованого випрямляча, що відрізняється від схеми на рис. 13.12,а тим, що некеровані діоди VD_1 і VD_2 замінені тиристорами VS_1 і VS_2 . Аноди тиристорів приєднані до виводів вторинної обмотки, а керуючі електроди пов'язані з системою керування СК, що формує синхронно з напругою мережі керуючі імпульси напруги і дозволяє змінювати їхню фазу відносно фазних напруг u_{2a} і $u_{2б}$ джерела живлення.

При використанні в схемі некерованих діодів діод VD_1 відкрився б у момент часу t_0 (рис. 13.15,б), що є моментом природного відкриття діода. Тиристор відмикається при наявності позитивної напруги на аноді і відмикаючого імпульсу на керуючому електроді. Припустимо, що на керуючий електрод тиристора VS_1 відмикаючий імпульс U_{y1} буде поданий у момент t_1 , отже, він відкриється з деякою затримкою відносно початку позитивної напруги u_{2a} , в результаті чого в інтервалі $t_0 - t_1$ напруга на навантаженні R_d буде дорівнювати нулю, тому що обидва тиристиори VS_1 і VS_2 закриті.

*Кут затримки від моменту переходу напруги на аноді тиристора через нуль в позитивну область до моменту подачі керуючої напруги, виражений в електричних градусах, називається **кутом керування** і позначається грецькою буквою α .* У момент відкриття тиристора VS_1 напруга u_d на навантаженні R_d стриб-

ком зростає і далі змінюється за кривою фазної напруги u_{2a} . У момент t_2 напруга u_{2a} змінює знак, тиристор VS_1 запирається, в інтервалі $t_2 - t_3$ обидва тиристори будуть закритими і струм i_d у навантаженні не проходить. В момент t_3 до роботи вступає тиристор VS_2 і залишається відкритим до моменту t_4 . Далі через інтервал, що дорівнює куту α , знову вступить у роботу тиристор VS_1 і т.д.

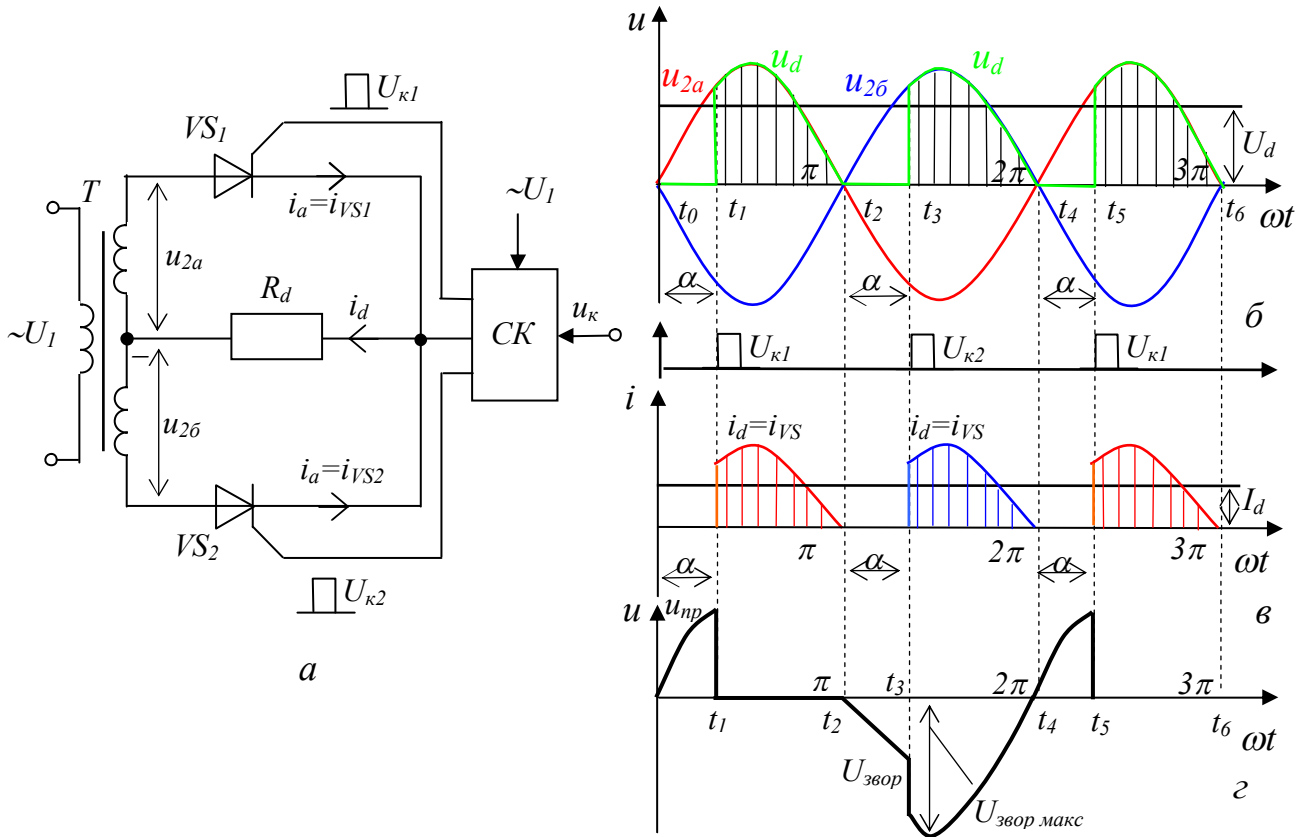


Рис.13.15 - Однофазний керований двонапівперіодний випрямляч:
а - схема; б-г - діаграми напруг і струмів в елементах

При роботі випрямляча на активне навантаження крива випрямленого струму i_d повністю повторює форму кривої напруги u_d (рис. 13.15,б і в). На рис. 13.15,г побудовано криву зворотної напруги $u_{звор}$ на тиристорі VS_1 для випадку роботи схеми з кутом регулювання $\alpha = 60^\circ$. В інтервалі $t_0 - t_2$ до тиристора VS_1 прикладена пряма напруга $u_{пр} = u_{2a}$, в інтервалі $t_1 - t_2$ тиристор VS_1 є відкритим і падіння напруги на ньому практично дорівнює нулю. У момент t_2 , коли струм i_d дорівнює нулю, тиристор VS_1 закривається і до нього прикладається зворотна напруга, яка дорівнює фазній $-u_{2a}$, оскільки тиристор VS_2 також закритий. У момент $t_3 = \pi + \alpha$ відкривається тиристор VS_2 і до тиристора VS_1 прикладається міжфазна напруга вторинної обмотки трансформатора, яка буде впливати на нього до моменту $t_4 = 2\pi$, коли тиристор VS_2 закриється. Надалі процеси в схемі будуть повторюватися через кожний період.

Очевидно, що коли змінювати кут α (зрушувати за фазою керуючі імпульси U_k відносно напруги на анодах тиристорів), то будуть змінюватися час роботи тиристорів і відповідно величина випрямленої напруги, середнє значення якої буде визначатися виразом

$$U_d = U_{d0} \cdot \frac{1 + \cos \alpha}{2}, \quad (13.29)$$

де U_{d0} - найбільше значення випрямленої напруги при повністю відкритих ($\alpha = 0$) тиристорах VS_1 і VS_2 може бути підраховане за формулою (13.18).

При роботі випрямляча на активне навантаження і регулюванні випрямленої напруги від 0 до U_{d0} , як видно з формули (13.29), кут регулювання α необхідно змінювати від $\alpha_{\max} = 180^\circ$ до $\alpha_{\min} = 0$. Дійсно, якщо $\alpha = 180^\circ$, то $\cos 180^\circ = -1$ і $U_d = 0$; при $\alpha = 0$ $\cos 0 = 1$ і $U_d = U_{d0} = 0,9 \cdot U_{2\phi}$.

Отже робочий режим некерованого випрямляча є граничним, до якого наближається керований випрямляч при куті керування $\alpha = 0$.

На відміну від некерованого випрямляча, діоди якого витримують тільки зворотну напругу, діоди керованого перетворювача повинні витримувати як пряму, так і зворотну напругу. При активному навантаженні максимальне значення зворотної напруги на закритому в даний напівперіод тиристорі при кутах $\alpha < 90^\circ$ дорівнює амплітуді напруги всієї вторинної обмотки трансформатора і (як у некерованій схемі) визначається виразом (13.19).

Значення прямої напруги U_{np} на закритому тиристорі при $\alpha < 90^\circ$ залежить від кута регулювання в такий спосіб:

$$U_{np} = \sqrt{2} \sin \alpha. \quad (13.30)$$

При $\alpha = 90^\circ$ значення U_{np} досягає максимуму. Середнє значення випрямленого струму визначається як $I_d = U_d / R_d$. При куті регулювання $\alpha = 0$ у навантаженні буде найбільший струм $I_d = U_{d0} / R_d$.

Середнє значення струму через тиристор $I_{a,cr} = 0,5 I_d$, діюче значення струму тиристора $I_{a,діюч}$ і вторинної обмотки трансформатора I_2 , а також струму його первинної обмотки I_1 при $\alpha = 0$ визначаються відповідно за формулами (13.21) і (13.23). Кількісні співвідношення між іншими величинами для однофазної нульової схеми на керованих вентилях наведені в табл. 13.2.

Робота однофазної мостової схеми на тиристорах відрізняється від роботи однофазної мостової схеми випрямлення на діодах тим, що керуючі імпульси повинні подаватися одночасно на два тиристори, що розташовані у протилежних плечах випрямного мосту.

Криві випрямленої напруги u_d і випрямленого струму I_d однофазної мостової схеми на тиристорах аналогічні відповідним кривим для однофазної нульової схеми на діодах. Кількісні співвідношення для струмів і напруг схеми наведені в табл. 13.2.

У трифазній нульовій схемі з тиристорами (рис. 13.16,а) керуючі імпульси подаються на них з деяким зсувом у часі стосовно моменту природного відкриття діодів у некерованій схемі, що відповідає точкам перетинання синусоїд фазних напруг (точки *a*, *b*, *v* і *z* на рис. 13.16,б).

Нехай, наприклад, керуючі імпульси подаються на тиристори VS_1 , VS_2 , VS_3 в моменти, які відповідають середині позитивних напівхвиль фазних напруг (це відповідає куту $\alpha = 60^\circ$). У цьому випадку на навантаженні виникають імпульси випрямленої напруги u_d у формі чверті синусоїди (рис. 13.16,в).

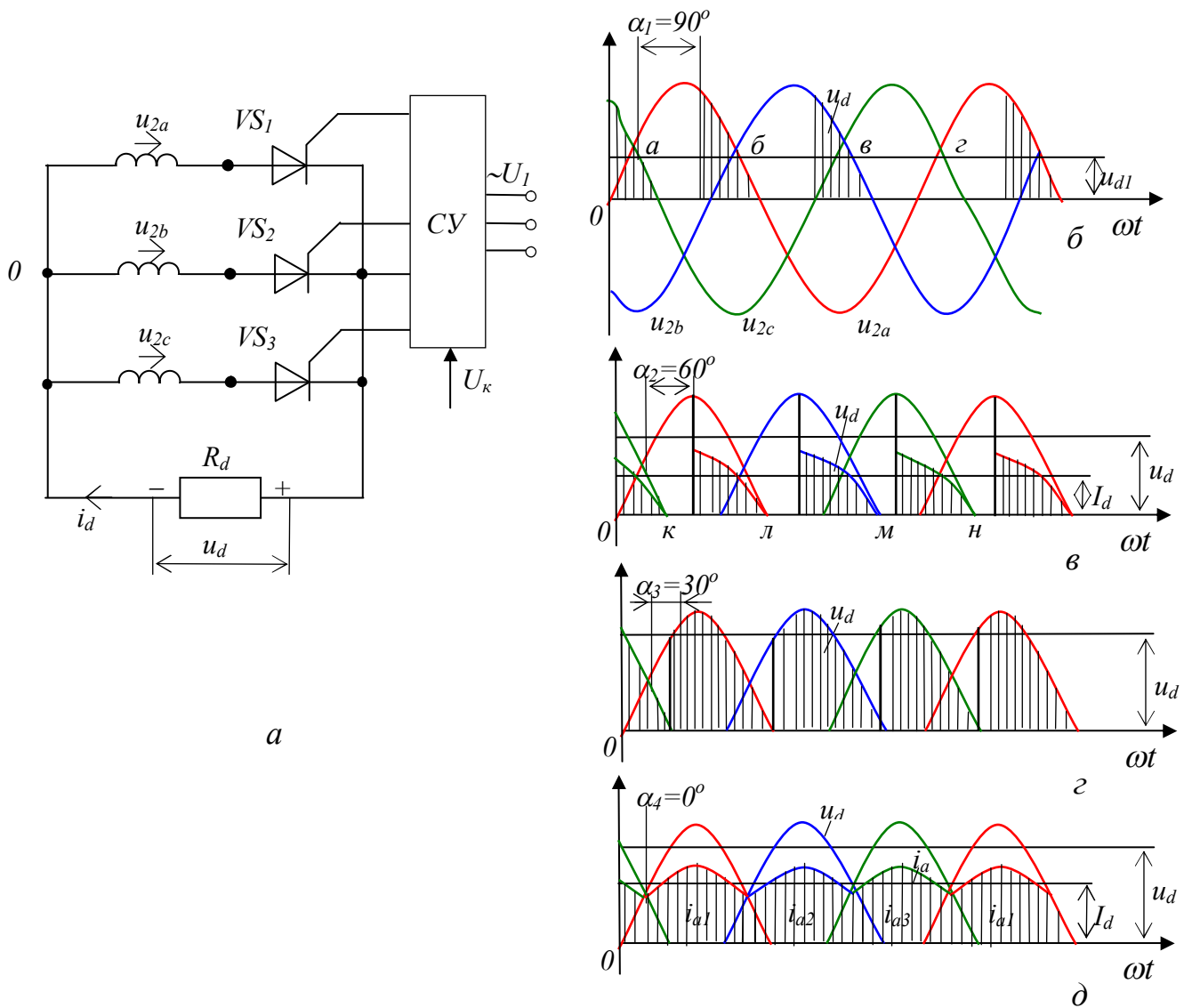


Рис.13.16 - Трифазний керований тиристорний випрямляч з нульовою точкою:
 а - схема; б -д - діаграми напруг і струмів в елементах

Зміна фази (зсув) керуючих імпульсів у бік збільшення або зменшення кута керування α викликає відповідне зменшення (рис. 13.14,б) або збільшення (рис. 13.16,г) імпульсів напруги u_d . При куті $\alpha = 0$ крива випрямленої напруги (рис. 13.16,д) матиме таку ж форму, як у некерованому випрямлячі. Очевидно, що крива струму i_d за своєю формою буде повторювати криву випрямленої напруги u_d при роботі випрямляча на активне навантаження. З цих кривих видно, що є дві характерні області роботи керованого випрямляча. Перша відповідає зміні кута регулювання в межах $0 < \alpha < 30^\circ$, при цьому випрямлений струм буде безперервним, і середнє значення випрямленої напруги визначається виразом

$$U_d = U_{d0} \cos \alpha. \quad (13.31)$$

Кожний тиристор схеми в цьому разі працює одну третину періоду. Друга область відповідає кутам $\alpha > 30^\circ$ і характеризується тим, що при проходженні фазних напруг через нуль (точки к, л, м, н на рис. 13.16,в) працюючий тиристор закривається, але оскільки на черговий тиристор, що вступає до роботи, відмикаючий імпульс ще не поданий, то в кривій випрямленої напруги виникають

паузи (нульові ділянки), протягом яких струм $i_d = 0$. Тривалість проходження струму через тиристор в цьому випадку буде менше $1/3 \cdot T$, і середнє значення випрямленої напруги визначається за формулою

$$U_d = \frac{\sqrt{3}}{3} U_{d0} [1 + \cos(30^\circ + \alpha)]. \quad (13.32)$$

Для трифазної нульової схеми при роботі на активне навантаження граничним кутом регулювання, при якому $U_d = 0$, є кут $\alpha_{\max} = 150^\circ$. Напруга на тиристорі визначається різницею потенціалів анода і загальної точки катодів, потенціал якої змінюється за кривою напруги u_d . Максимальне значення зворотної напруги на тиристорі, так само як у схемі з некерованими вентилями, дорівнює амплітуді напруги $u_{2л}$.

У трифазній мостовій схемі з тиристорами (рис. 13.17,а), так само як і з некерованими діодами, одночасно працюють два тиристиори: один з катодної (непарної) групи, інший - з анодної (парної) групи, і навантаження в будь-який момент часу приєднується до двох фаз вторинної обмотки трансформатора. Відмикаючі імпульси на тиристиори непарної групи подаються з випередженням на 180° відносно тиристорів парної групи, приєднаних до тих же виводів вторинної обмотки, оскільки перші працюють при позитивних значеннях фазних напруг на анодах, другі - при негативних на катодах.

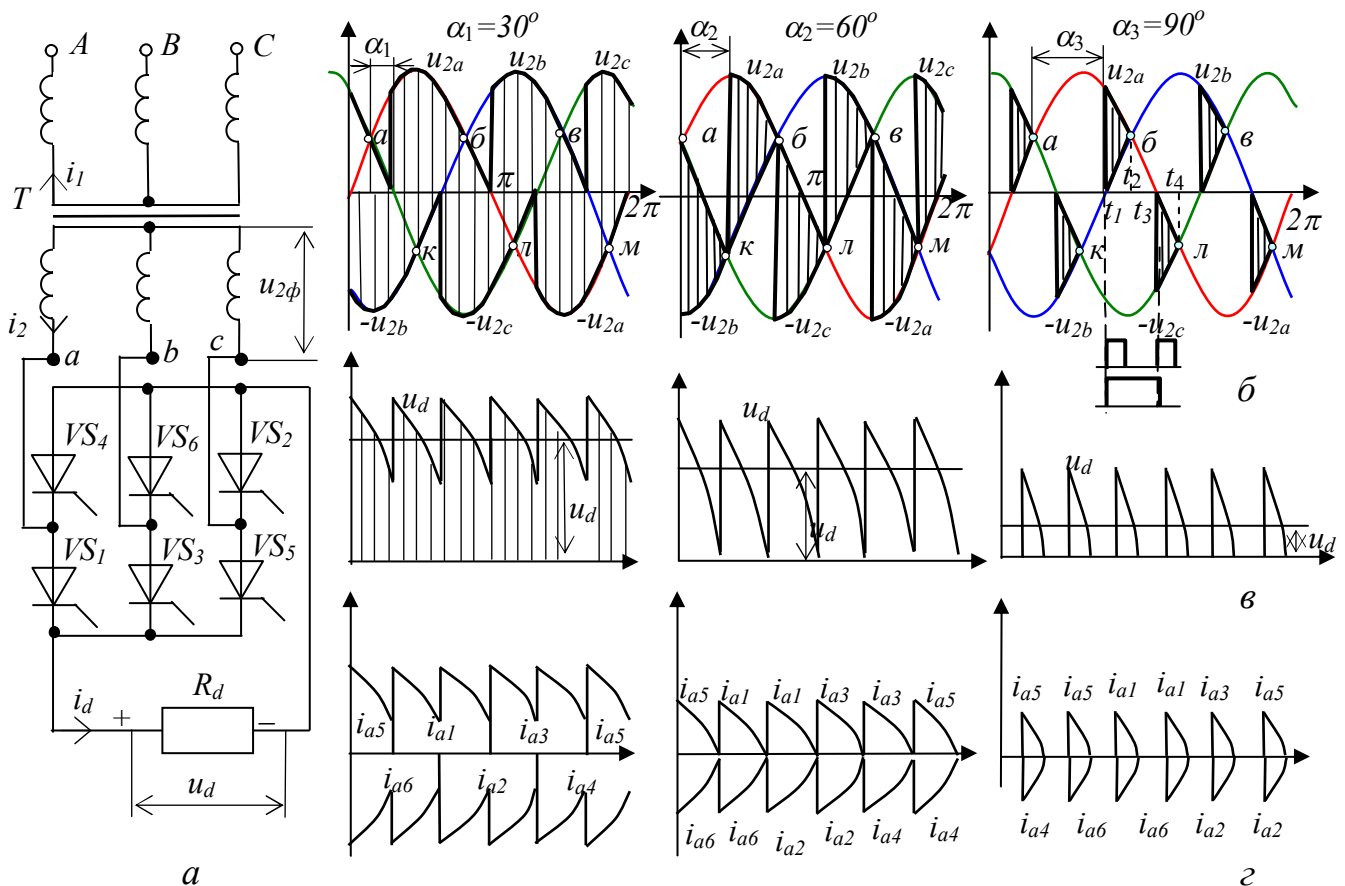


Рис.13.17 - Трифазна мостова схема:
а - схема; б - г - діаграми напруг і струмів в елементах

Робота розглянутої схеми випрямлення ілюструється діаграмами миттєвих значень фазних напруг на тиристорах (рис. 13.17,б); кривими випрямленої напруги u_d (рис. 13.17,в), що отримують шляхом підсумовування миттєвих значень напруг працюючих у цей момент тиристорів; кривими анодних струмів (рис. 13.17,г) катодної групи - над віссю часу, анодної групи - під віссю. Кожна з діаграм побудована для трьох значень кутів регулювання: $\alpha_1 = 30^\circ$, $\alpha_2 = 60^\circ$ і $\alpha_3 = 90^\circ$.

При куті регулювання $\alpha = 0$ відмикаючі імпульси на тиристорі необхідно подавати в моменти, які відповідають точкам перетинання кривих фазних напруг (точки *a*, *b*, *v* і *к*, *л*, *м* на рис. 13.17,б). У цьому випадку кожний з тиристорів проводить струм протягом 1/3 періоду, як у некерованій схемі, а чергування пар працюючих тиристорів відбувається через 60° .

Доки кут регулювання $\alpha \ll 60^\circ$, криві випрямленої напруги, а отже, і криві випрямленого струму (рис. 13.17,в і г) при активному навантаженні безперервні. Для цього режиму ($0 \ll \alpha \ll 60^\circ$) середнє значення випрямленої напруги визначається виразом (13.35). Як видно з рис. 13.17,г, через тиристор, що вступає до роботи, струм може проходити тільки за умови, якщо одночасно відкривається або вже відкритий відповідний (суміжний за порядковим номером) тиристор іншого плеча мосту. У протилежному разі коло струму не буде замкнутим і черговий тиристор, що вступає до роботи, не відкриється.

При пуску випрямляча з нуля ($U_d = 0$) або при переході його в режим переривчастих струмів ($\alpha > 60^\circ$) можливе порушення вказаної вище умови. Тому на керуючі електроди тиристорів у трифазній мостовій схемі випрямлення необхідно подавати імпульси шириною більшою за 60° , або два вузьких імпульси з інтервалом між ними у 60° (рис. 13.17,б, при $\alpha_3 = 90^\circ$).

Схема керування випрямлячем повинна бути побудована так, щоб при подачі відмикаючого імпульсу на вступаючий до роботи тиристор одного плеча мосту, одночасно здійснювалася б подача імпульсу на керуючий електрод тиристора відстаючої фази протилежного плеча мосту. Наприклад, при роботі випрямляча з $\alpha = 90^\circ$ (рис. 13.17,б) для того щоб відкрити тиристор VS_1 у момент t_1 необхідно одночасно подати відмикаючий імпульс і на тиристор VS_2 , після чого обидва вентилі будуть проводити струм до моменту t_2 , коли різниця миттєвих значень напруг u_{2a} і u_{2b} буде дорівнювати нулю і тиристори VS_1 і VS_2 закриються. Потім у момент t_3 повинен вступити до роботи тиристор VS_3 , що відкриється тільки за умови наявності повторного відмикаючого імпульсу на тиристорі VS_3 або за умови, що на керуючий електрод цього тиристора в момент t_1 буде поданий імпульс тривалістю більше 60° . Тиристори VS_2 і VS_1 будуть проводити струм до моменту t_4 , далі вступить до роботи наступна пара тиристорів VS_3 і VS_2 і т.д.

Середні значення випрямленої напруги, коли струм i_d є переривчастим ($\alpha > 60^\circ$), визначають виразом

$$U_d = U_{d0} [1 + \cos(60^\circ + \alpha)]. \quad (13.33)$$

З формули (13.33) випливає, що при роботі даної схеми на активне навантаження граничним кутом регулювання, при якому $u_d = 0$, є кут $\alpha_{\max} = 120^\circ$.

13.3. Інвертори

Інвертори застосовують для перетворення енергії постійного струму в енергію змінного струму в лініях електропередач постійного струму, при рекуперативному гальмуванні двигунів постійного струму що живляться від випрямлячів, для перетворення частоти і т.і.

Під інвертуванням розуміють процес перетворення постійного струму на змінний, тобто це процес зворотний випрямленню струму. При інвертуванні потік електричної енергії спрямований від джерела постійного струму до мережі змінного струму.

Вихідним елементом інвертора, що працює на мережу змінного струму, є трансформатор, число витків і фаз якого визначають величину і число фаз отримуваної змінної напруги (струму). Щоб отримати змінний струм в обмотках трансформатора, підключеного до джерела постійного струму, необхідно забезпечити періодичний перехід струму від однієї фазної обмотки до іншої. Цього досягають шляхом переривання постійного струму і розподілу його по фазам трансформатора за допомогою тиристорів.

Зміна напрямку потоку енергії потребує зміни знака потужності випрямляча $P_d = U_d \cdot I_d$, що можна отримати шляхом зміни напрямку струму I_d або напруги U_d . Але струм випрямляча не може змінити свій напрямок відносно затискачів в силу односторонньої провідності тиристорів. Ось чому зміну знаку потужності можна отримати тільки за рахунок зміни знаку середнього значення випрямленої напруги, що досягається у керованому випрямлячі установкою кута керування $\alpha > 90^\circ$.

Перехід від режиму випрямляча до режиму інвертора розглянемо на прикладі керованого перетворювача (рис.13.18), складеного за двонапівперіодною схемою, і навантаженням якого є акумуляторна батарея з ЕРС E_a , опір R_d та катодний дросель $L_d = \infty$.

Нехай $\alpha_1 < 90^\circ$, перемикач S знаходиться у лівому положенні і середнє значення напруги $U_{d\text{вип}} = U_{d0} \cos \alpha_1 > E_a$. Перетворювач працює випрямлячем на батарею, ЕРС E_a якої виступає як протидіюча напруга (на рис.13.18,б вона показана нижче осі абсцис).

Випрямлення струму відбувається, коли $u_2 > 0$, тиристири відкриті (при куті $\alpha_1 = 60^\circ$) і напруга $U_{d\text{вип}}$ перебільшує E_a . В наступний інтервал часу, коли $u_2 < 0$, струм $i_d = I_d$ продовжує проходити по колу, оскільки його підтримує ЕРС самоіндукції e_L , яка виникає в індуктивності L_d (момент $\pi - t_2$ для VS_1 і т.д.).

Акумуляторна батарея буде підзарядатись випрямленим струмом, середнє значення якого

$$I_{d\text{вип}} = (U_{d\text{вип}} - E_a) / R_d. \quad (13.34)$$

Якщо поступово збільшувати кут $\alpha > \alpha_1$, то будуть зменшуватись напруга $U_{d\text{вип}}$ і струм I_d . При $\alpha_2 = 90^\circ$ середнє значення випрямленої напруги $U_{d\text{в}} = 0$ (рис.13.18,в) і перетворювач споживає від мережі тільки реактивну потужність, оскільки постійна складова випрямленого струму буде дорівнювати нулю.

Для переходу до інверторного режиму потрібно змінити полярність на-

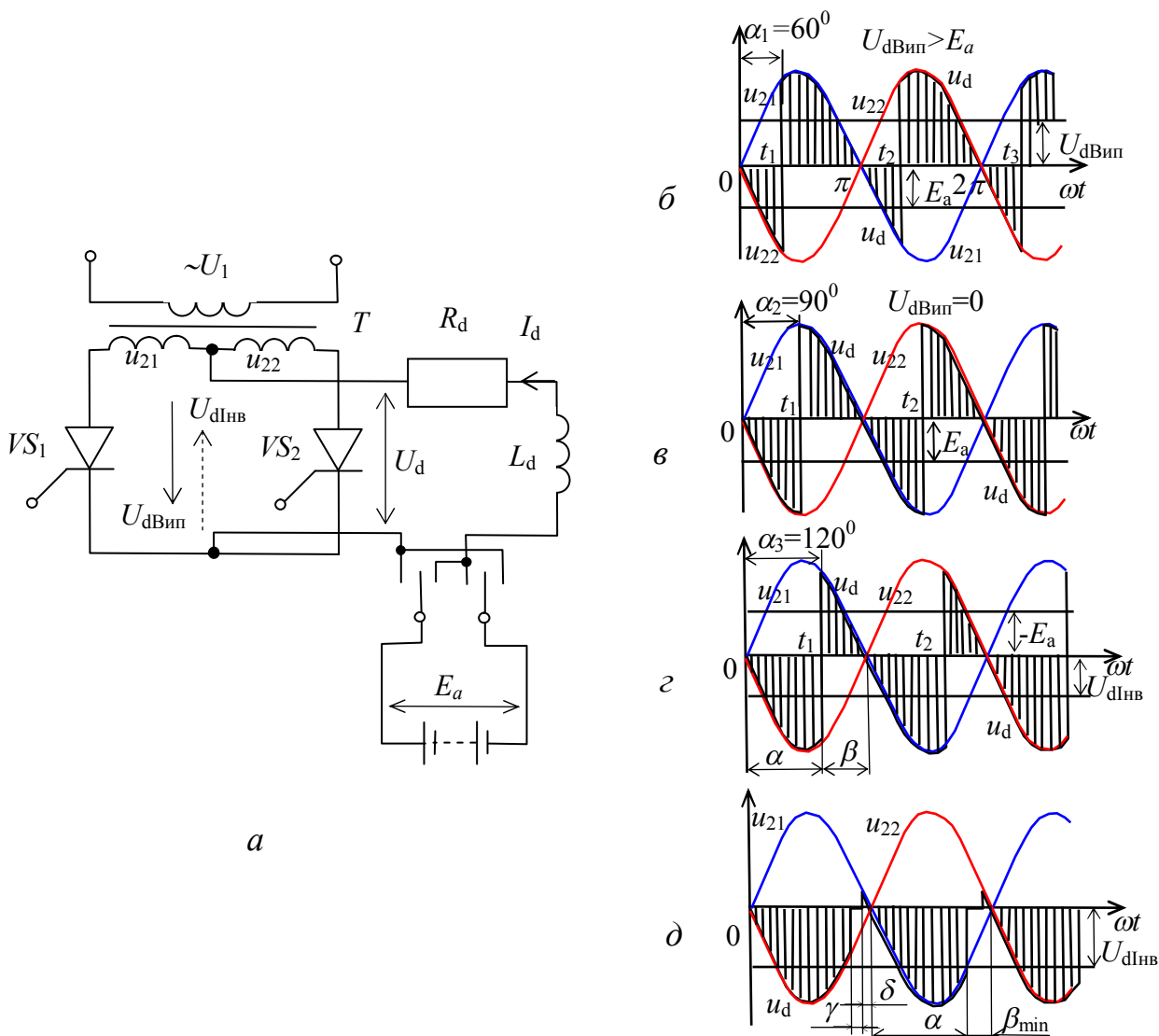


Рис.13.18 – Схема і часові діаграми перетворювача випрямляч - інвертор

пруги E_a акумуляторної батареї: перемикач S на рис.13.18,а переключити у праве положення і одночасно збільшити кут керування α до значень більших 90° . У цьому випадку тиристри VS_1 і VS_2 відкриваються і проводять струм при негативних значеннях напруг u_{21} і u_{22} (рис.13.19,г) під впливом позитивної напруги E_a , яка подається від батареї через навантаження R_d і вторинні обмотки трансформатора на аноди тиристорів.

При $\alpha_3 > 90^\circ$ середня напруга перетворювача стає негативною $U_{dIHB} = U_{d0} \cdot \cos \alpha_3 < 0$. Якщо вона буде меншою від ЕРС E_a , то через навантаження буде проходити струм попереднього напрямку, середнє значення якого виражається виразом

$$I_{dIHB} = (E_a - U_{dIHB}) / R_d. \quad (13.35)$$

Акумуляторна батарея працює генератором на мережу змінного струму, а напруга перетворювача відіграє роль зустрічної ЕРС.

Середнє значення негативної напруги U_{dIHB} буде тим більшим, чим більше величина кута α наближується до 180° . У інверторному режимі кут керування тиристорним перетворювачем називають **кутом випередження керування**. Цей

кут відлічують від моменту природного закриття тиристора ($\omega t = \pi$) і позначають буквою β (рис.13.19,г). Сума кутів α і β дорівнює π , тоді $\beta = \pi - \alpha$ і середня напруга інвертора при куті випередження β :

$$U_{d\text{ІНВ}}(U_{d\beta}) = U_{d0}\cos(\pi - \beta) = -U_{d0}\cos\beta. \quad (13.36)$$

де U_{d0} - напруга інвертора при $\beta = 0$, рівна напрузі випрямляча при $\alpha = 0$.

Слід зауважити, що, якщо для тиристорного перетворювача в режимі випрямляча можлива робота з кутами $\alpha_{\text{min}} = 0$, то у інверторному режимі кут β_{min} завжди повинен бути більшим за 0. Це пов'язано з тим, що тиристор після відключення необхідно дати деякий час для поновлення запираючих властивостей. Протягом цього відрізка часу δ , який складає не більше 0,01 тривалості періоду $\delta \approx (2 \div 4^\circ)$, анодна напруга тиристора повинна бути негативною.

13.4. Згладжуючі фільтри

Наявність пульсацій випрямленої напруги погіршує роботу споживачів, що живляться від випрямлячів. Наприклад, при живленні двигунів постійного струму пульсуючою напругою погіршуються умови комутації струму і збільшуються втрати у двигуні. Тому пульсації напруги на навантаженні необхідно знизити до значень, при яких не позначався б їхній негативний вплив.

Для зменшення пульсації напруги на виході випрямляча встановлюють спеціальний пристрій, називаний **згладжуючим фільтром**. Схема включення фільтра Φ наведена на рис. 13.20,а.

Значення пульсації напруги на виході випрямляча оцінюється коефіцієнтом пульсацій q , який дорівнює відношенню амплітуди основної (першої) гармоніки пульсацій $U_{\sim 1}$ до постійної складової випрямленої напруги U_d , тобто $q = U_{\sim 1} / U_d$.

Пульсація напруги на навантаженні характеризується коефіцієнтом q_1 , який дорівнює відношенню амплітуди основної гармоніки пульсацій $U_{d\sim}$ на навантаженні (після фільтра) до випрямленої напруги $U_{dн}$ на навантаженні, тобто $q_1 = U_{d\sim} / U_{dн}$.

Пульсація напруги на навантаженні задається умовами роботи споживача, а пульсація напруги на вході випрямляча відома після вибору схеми випрямлення й визначення її параметрів. Відношення значень q і q_1 визначає ступінь згладжування випрямленої напруги і називається **коефіцієнтом згладжування фільтра s** :

$$s = \frac{q}{q_1} = \frac{U_{\sim 1}}{U_d} \cdot \frac{U_{d\sim}}{U_{dн}}. \quad (13.37)$$

Поряд з ослабленням змінної складової випрямленої напруги згладжуючий фільтр зменшує і постійну складову ($U_{dн} = U_d - \Delta U_\Phi$). Очевидно, чим меншим є зменшення постійної складової ($U_d / U_{dн}$) при незмінному ослабленні змінної ($U_{d\sim} / U_{\sim 1}$), тим якісніше буде фільтр. Для фільтрів випрямлячів малої потужності відношення постійних складових напруг звичайно $U_d / U_{dн} = 1,05 \div 1,1$, а для випрямлячів великої потужності $U_d / U_{dн} = 1,005 \div 1,01$.

У практичних розрахунках можна вважати $U_d \approx U_{dн}$ і коефіцієнт згладжування, що показує в цьому випадку ступінь ослаблення змінної складової випрямленої напруги фільтром, приймати рівним $s = q / q_1 \approx U_{\sim 1} / U_{d\sim}$.

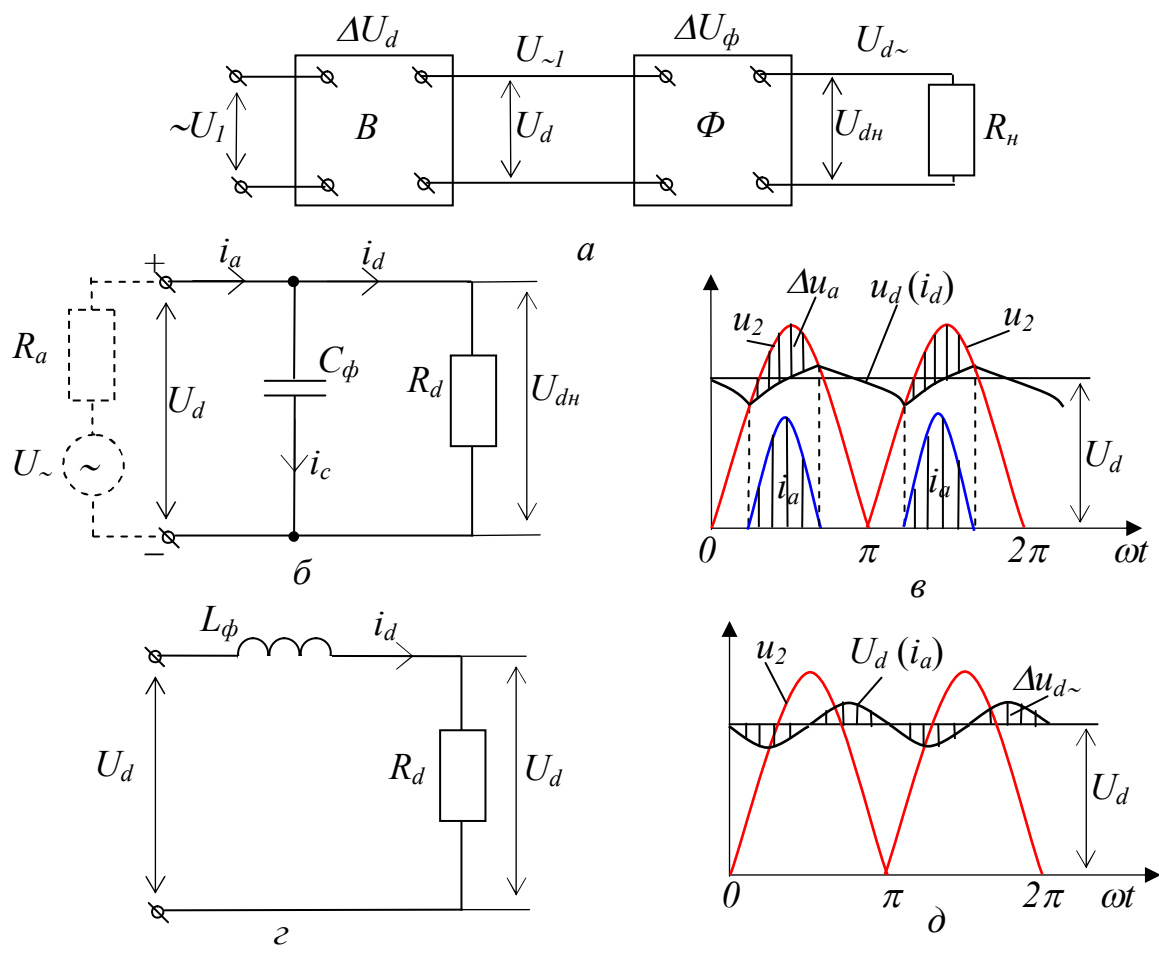


Рис. 13.20 - Схеми включення фільтрів: *а* - блок-схема випрямляча з фільтром; *б* - ємнісний фільтр; *в* - індуктивний фільтр; *г* і *д* - криві напруг і струмів

Розглянемо основні види згладжуючих фільтрів.

Ємнісний фільтр (рис. 13.20,б) являє собою конденсатор C_ϕ , що включається паралельно навантажувальному опору R_d . Шунтуючи навантаження малим ємнісним опором $X_c = 1/\omega C_\phi \ll R_d$ для змінної складової струму $i_d = i_c$, він створює у випрямлячі додаткове падіння напруги ΔU_a на R_a (рис. 13.20,в), що приводить до згладжування напруги U_d . В цьому випадку можна вважати, що через R_d проходить тільки постійна складова струму I_d , а змінна складова струму $i_{d\sim}$ проходить повністю через конденсатор.

Ємнісний фільтр більш ефективний у випрямлячах на малі струми I_d (з великими R_d), оскільки в такому фільтрі легше одержати нерівність $\omega C_\phi \gg 1/R_d$ при невеликих значеннях ємності C_ϕ .

При розрахунку ємнісного фільтра вихідним звичайно є значення коефіцієнта пульсацій q_1 , а також кутової частоти $\omega_m = 2\pi f_m$ джерела живлення й опору навантаження R_d . Значення C_ϕ (у мкф) можна визначити з виразу:

$$C_\phi = \frac{1}{m \cdot \omega_m \cdot q_1} \frac{10^6}{R_d} \quad (13.38)$$

Індуктивний фільтр (рис. 13.20,г) являє собою дросель L_ϕ , що включається послідовно з навантаженням і має великий реактивний опір $X_L = \omega_m \cdot L_\phi$ для

змінної складової випрямленого струму, яка значно зменшується, і падіння напруги $\Delta U_{d\sim}$ від цієї складової на R_d стає незначним (рис. 13.20,д).

Для гарного згладжування напруги на навантаженні необхідно, щоб

$$X_L = \omega_m \cdot L_\phi \gg R_d. \quad (13.39)$$

При заданому коефіцієнті згладжування s необхідне значення індуктивності фільтра L_ϕ (у генрі) з урахуванням виконання умови (13.49) визначають за виразом

$$L_\phi = \frac{s \cdot R_d}{2\pi \cdot f_m \cdot m}, \quad (13.40)$$

де f_m - частота напруги мережі, Гц; m - число фаз випрямлення.

Аналіз формули (13.40) показує, що одне і теж значення коефіцієнта s може бути отримане при менших значеннях індуктивності L_ϕ і меншому опорі навантаження R_d . Таким чином, **індуктивний фільтр вигідно застосовувати у випрямлячах середньої і великої потужності, в яких опір навантаження малий.**

Якщо потрібно мати дуже мале значення коефіцієнта пульсацій q_1 , то ємність C_ϕ або індуктивність L_ϕ , застосовувані в описаних фільтрах, можуть вийти дуже значними. У таких випадках застосовують більш складні Г-подібні або П-подібні фільтри.

13.5. Підсилювачі

Підсилювачами називаються **пристрої, призначені для збільшення значень параметрів електричних сигналів за рахунок енергії джерела живлення.** Підсилювачі застосовують для переважного посилення напруги, струму або потужності.

Можливі лінійний і нелінійний режими роботи підсилювача. У підсилювачах з практично лінійним режимом роботи має місце мінімальне викривлення форми посилюваного сигналу. Викривлення сигналу мінімальне, якщо без викривлення підсилюються всі його гармонійні складові. Властивість підсилювача збільшувати амплітуду гармонійних складових сигналу характеризує його амплітудно-частотна характеристика (АЧХ). За типом АЧХ розрізняють підсилювачі напруг і струмів, що змінюються повільно, або підсилювачі постійного струму (рис. 13.21,а – діапазон зміни посилюваних сигналів від 0 до 10^3 Гц), підсилювачі низьких частот (рис. 13.21,б – діапазон зміни посилюваних сигналів від 20-50 Гц до $20 \cdot 10^3$ Гц), підсилювачі високих частот (рис. 13.21,в - діапазон зміни посилюваних сигналів від $10^4 - 10^5$ Гц до $10^7 - 10^8$ Гц), широкосмужні підсилювачі (рис. 13,21,г - діапазон зміни посилюваних сигналів від 20-50 Гц до $10^7 - 10^8$ Гц) і вузькосмужні підсилювачі (рис. 13.21,д).

У підсилювачах з нелінійним режимом роботи при підвищенні значення напруги на вході вище деякого граничного рівня зміна напруги на виході підсилювача практично відсутня. Такі підсилювачі застосовують головним чином у пристроях імпульсної техніки.

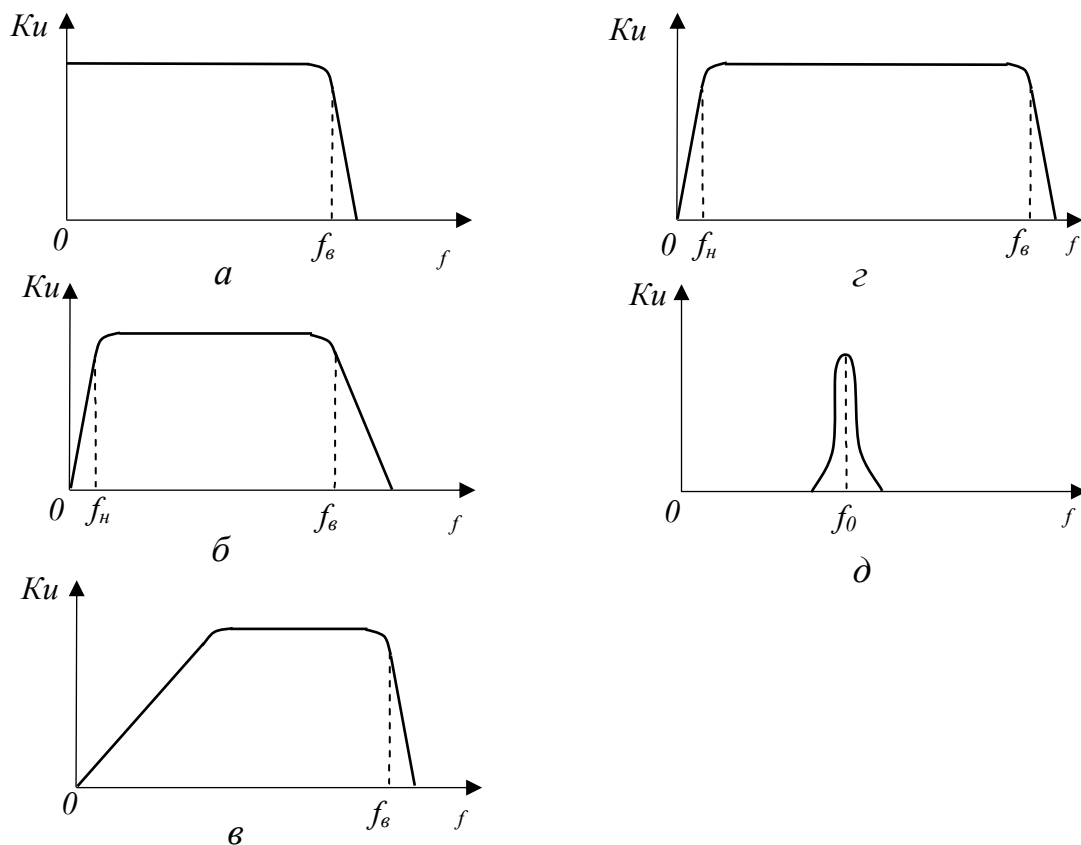


Рис.13.21 - Амплітудно-частотні характеристики підсилювачів

Підсилювальна техніка заснована на широкому використанні підсилювачів на інтегральних мікросхемах, які дозволяють застосовувати їх для реалізації різних функціональних вузлів систем автоматики, керування і вимірів.

Як було зазначено в розділі 13.1.4, на практиці використовують три схеми включення транзисторів: з загальним емітером, спільною базою і спільним колектором. Відповідно застосовують три схеми транзисторних підсилювачів.

Розглянемо принцип роботи типового підсилювального каскаду на біполярному транзисторі, що включений за схемою з спільним емітером (рис. 13.22). Джерело посилюваного сигналу (обведене штриховою лінією) має внутрішній опір $R_{вн}$ і ЕРС $e_c = u_c$. Резистори R_1 , R_2 , R_k у схемі забезпечують необхідні значення постійних напруг на колекторному й емітерному переходах при живленні всіх кіл транзистора від одного загального джерела живлення E_k . Резистор R_e забезпечує температурну стабілізацію робочої точки, що дуже важливо для транзисторних підсилювальних схем. Із зростанням температури постійна складова струму емітера I_{e0} зростає, внаслідок чого збільшується падіння напруги $R_e I_{e0}$ на резисторі R_e , при цьому потенціал емітера відносно бази знижується, це зменшує постійну складову струму бази й обмежує ступінь наростання струму спокою в колі колектора. Для усунення цього впливу при проходженні по колах транзистора змінних складових резистор R_e шунтується конденсатором C_e . Конденсатори C_1 і C_2 призначені для запобігання проходження постійної складової струму від джерела живлення і сигналу на вихід і вхід підсилювального каскаду.

Одним з найважливіших показників, що характеризують властивості підсилювачів, є комплексний коефіцієнт підсилення, який у загальному випадку можна

представити як відношення комплексної напруги на виході підсилювача до комплексної напруги на його вході:

$$\dot{K} = \frac{\dot{U}_{вих} e^{j\psi_{вих}}}{\dot{U}_{вх} e^{j\psi_{вх}}} = K \cdot e^{j(\psi_{вих} - \psi_{вх})} = K \cdot e^{j\varphi}, \quad (13.41)$$

де $K = \frac{U_{вих}}{U_{вх}}$ - модуль коефіцієнта підсилення підсилювача; $\varphi = \psi_{вих} - \psi_{вх}$ - різниця фазових кутів сигналу на виході і вході підсилювача.

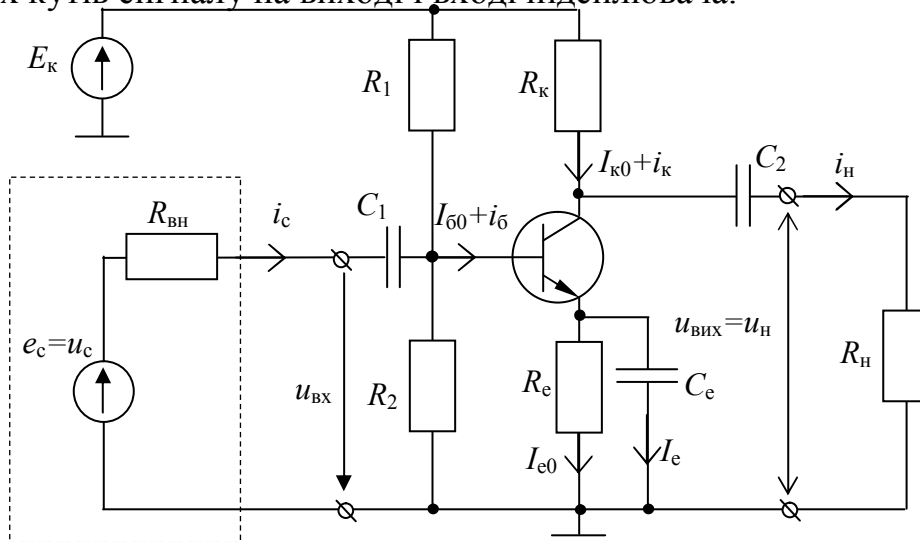


Рис. 13.22 - Схема підсилювального каскаду зі спільним емітером

Підсилювачі неминуче містять комбінації активних і реактивних елементів, тому модуль коефіцієнта підсилення і різниця фазових кутів на виході і вході підсилювача є частотно-залежними. У процесі вивчення підсилювача залежність модуля коефіцієнта підсилення від частоти $K(f)$, амплітудно-частотні характеристики підсилювача і залежність зміни фазового кута від частоти звичайно розглядають окремо. Області частот (рис. 13.23) від 0 до f_n і від f_v до $f = \infty$ характеризуються значною зміною коефіцієнта підсилення. Область зміни частоти вхідного сигналу від f_n до f_v називається **смужкою пропускання підсилювача** і характеризується незначною залежністю коефіцієнта підсилення від частоти.

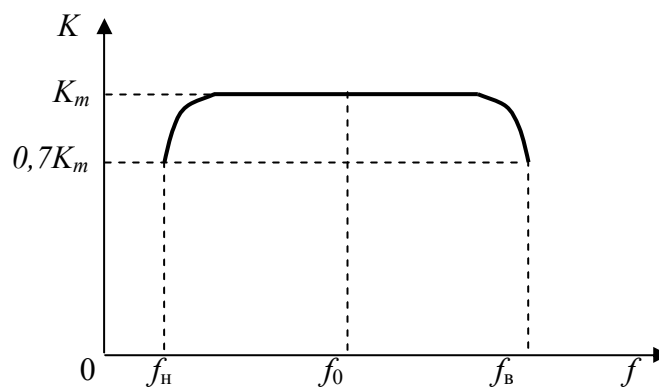


Рис. 13.23 - АЧХ підсилювача зі ЗЕ

Для одержання великих значень коефіцієнтів підсилення на практиці застосовують багатокаскадні схеми, приклад якої для схеми з загальним емітером показаний на рис. 13.24.

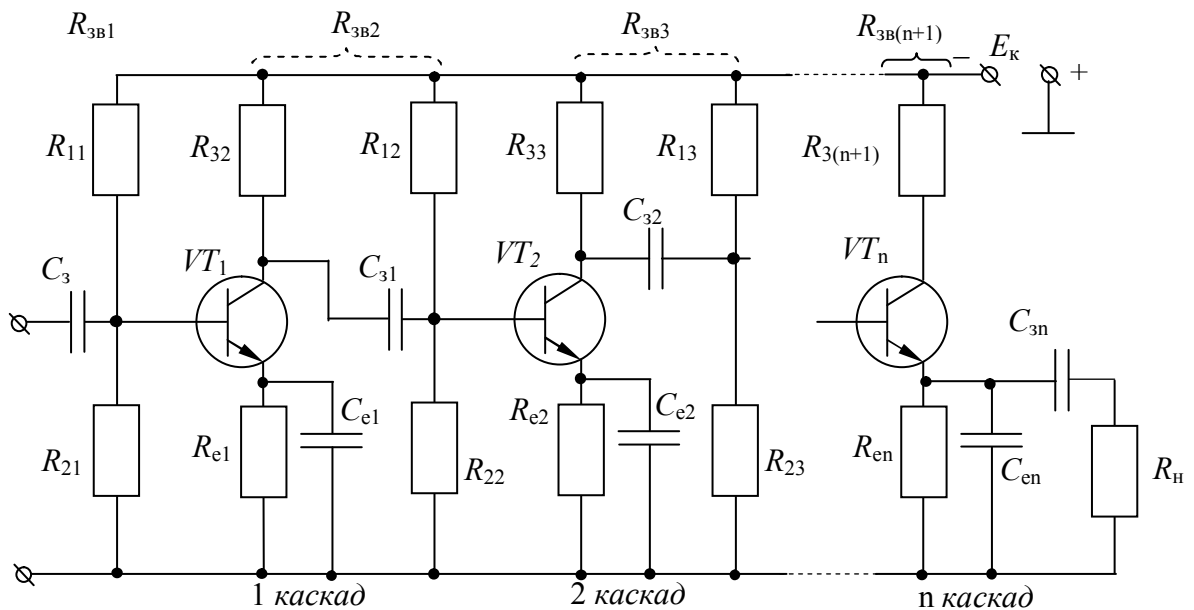


Рис. 13.24 - Багатокаскадний підсилювач за схемою зі спільним емітером

Контрольні запитання з теми 13

1. Поясніть явище одnobічної провідності напівпровідників.
2. Поясніть вольт-амперну характеристику $p-n$ переходу.
3. Поясніть будову кремнієвого діода і тиристора.
4. Охарактеризуйте відмінні риси германієвих і селенових діодів.
5. Поясніть вольт-амперну характеристику тиристора.
6. Як можна здійснити відкриття тиристора?
7. Поясніть будову біполярного транзистора.
8. Які схеми включення транзисторів застосовують на практиці?
9. У чому особливості роботи схем з загальним емітером, загальною базою, загальним колектором?
10. Поясніть принцип роботи однонапівперіодного однофазного випрямляча.
11. Поясніть принцип роботи двонапівперіодного однофазного випрямляча.
12. Поясніть принцип роботи однофазної мостової схеми випрямляча.
13. Поясніть принцип роботи трифазної мостової схеми.
14. Поясніть принцип роботи мостової схеми трифазного керованого випрямляча.
15. Поясніть принцип роботи ємнісного та індуктивного фільтрів.
16. Поясніть принцип роботи підсилювача на біполярному транзисторі.

РОЗДІЛ 7

ЕЛЕКТРОПРИВОД

ТЕМА 14

ЗАГАЛЬНІ ВІДОМОСТІ ПРО ЕЛЕКТРОПРИВОД

Ключові поняття: електропривод (ЕП), зворотний зв'язок, автоматизований ЕП, ЕП нерегульований (стежачий регульований, програмно-керований, адаптивний), ЕП груповий (одиначний, багатодвигуновий), статичний момент, результуючий момент інерції, реактивний (активний) момент опору, усталений (перехідний) режим ЕП, механічна характеристика двигуна (виробничого механізму), жорсткість механічної характеристики, статична стійкість, методи еквівалентних величин, тривалий (короткочасний, повторно-короткочасний) режим роботи двигуна.

14.1. Основні поняття

Електричним приводом (ЕП) називається електромеханічний пристрій, призначений для автоматизації робочих процесів.

ЕП складається (рис. 14.1) з електродвигуна *ЕД*, передатного пристрою *ПП*, перетворювача *П* і керуючого пристрою *КП*. В ЕП, залежно від поставлених до нього вимог, використовують двигуни постійного струму незалежного, паралельного, послідовного або змішаного збудження, АД, крокові електродвигуни та ін. Основним завданням електродвигуна в приводі є перетворення електроенергії джерела живлення *ДЖ* (зокрема, електромережі) на механічну енергію обертового вала (обертовий двигун) або на енергію мас, що переміщуються лінійно (лінійний двигун). Іншими словами, двигун повинен розвивати рухові зусилля: рушійний момент або рушійну механічну силу, які передаються робочому органу *РО*.

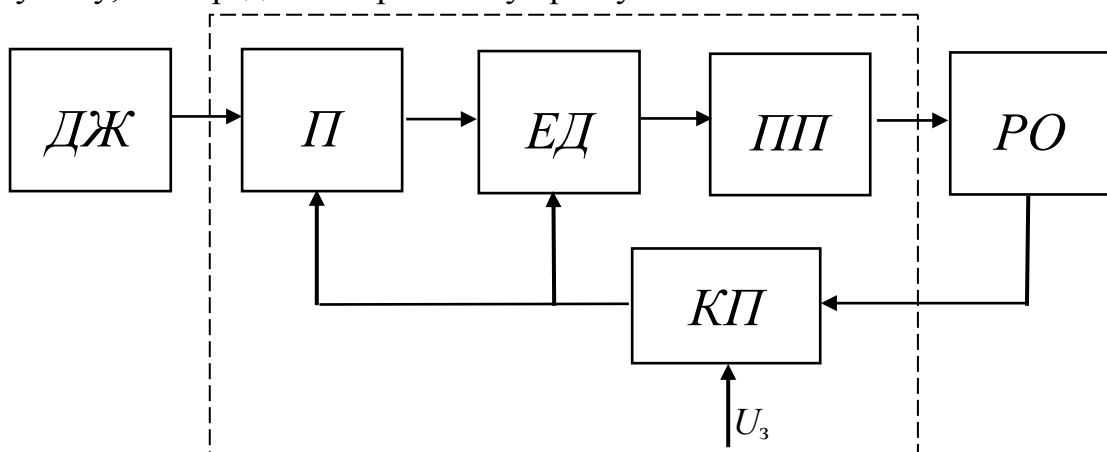


Рис.14.1 - Структурна схема електропривода

Електродвигун також здійснює зворотне перетворення механічної енергії обертання або лінійного переміщення, що надходить від робочого механізму, на електричну. В цьому режимі він створює гальмовий момент.

У сучасному ЕП двигун надає руху PO через передатний пристрій, що знижує або підвищує частоту обертання (редуктори, клиноремінні передачі та ін.), або змінює вигляд руху (зубчасто-рейкові, кривошипно-шатунні та ін.). Іноді електродвигун безпосередньо з'єднують з робочим механізмом.

Важливим елементом ЕП є перетворювач, необхідність якого викликана необхідністю зміни частоти обертання. Як правило, цього домагаються регулюванням напруги і частоти струму, споживаного двигуном. Для роботи двигуна постійного струму треба забезпечити його живленням від джерела постійної напруги.

Керуючий пристрій ЕП служить для керування перетворенням електричної енергії на механічну і забезпечення необхідної якості технологічного процесу. Він являє собою сукупність функціонально зв'язаних між собою електромагнітних, електромеханічних, напівпровідникових і інших елементів. До таких елементів належать кнопки керування та командоапарати, реле і контактори, блоки безконтактної автоматики та ін. Сучасні високоточні ЕП містять у своїй системі керування обчислювальні комплекси й ЕОМ спеціального призначення.

Керування ЕП здійснюється впливом на перетворювач і електричний двигун керуючих сигналів, які виробляє керуючий пристрій (рис. 14.1). Керуючий сигнал може формуватися з урахуванням тільки задаючого сигналу U_3 або U_3 і сигналів, що надходять від інших елементів привода. Так, на рис. 14.1 показаний окремий випадок, коли на $KП$ надходять сигнали тільки від PO .

У випадку, коли керування здійснюється тільки з урахуванням задаючого сигналу U_3 , ЕП є розімкнутим. Якщо є зв'язки з контрольованими параметрами робочого механізму, ЕП є замкнутим і називається **автоматизованим електроприводом**. Зв'язки, що забезпечують надходження сигналів на $KП$ від інших елементів, називаються **зворотними зв'язками**.

ЕП залежно від їхніх ознак ділять на класи. Розглянемо, на які *класи* підрозділяють приводи *за видами регулювання*.

Нерегульованими називають ЕП, швидкість робочих механізмів у яких незмінна. Вони забезпечують виконання найпростіших операцій (пуск, останов, іноді реверсування двигуна). При цьому в сталому режимі частота обертання визначається природною механічною характеристикою і моментом статичного навантаження. **Регульованими** називають ЕП, в яких частота обертання двигуна здатна змінюватися під впливом сигналу керування. **Стежачими** називають ЕП, здатні забезпечувати автоматичне перетворення будь-якого не заданого заздалегідь вхідного сигналу на рух виробничого механізму. **Програмно-керованими** називають ЕП, у яких лінійне або обертове переміщення здійснюється за заданою програмою. Програма являє собою послідовність траєкторій (або законів) руху виробничого механізму, відтворюваних приводом. **Адаптивним** називають ЕП, здатний здійснювати автоматичний вибір найкращого режиму роботи двигуна шляхом зміни структури і параметрів системи керування.

Залежно від способу передачі механічної енергії від двигунів до робочих органів виробничих машин ЕП діляться на три класи: груповий, одиночний і багатодвигунний привод. **Груповим називається ЕП**, в якому один двигун надає руху за допомогою трансмісії або передач групі робочих машин або групі робочих органів однієї машини. **Одиночним називається ЕП**, в якому електродвигун надає руху тільки од-

ному робочому органу машини. У ряді випадків електродвигун конструктивно вбудований у механізм так, що утворює з робочим органом єдине ціле. Прикладами електрифікованих робочих органів можуть служити електричні ручні машини (див. тему 18), електроталь, електрошпindel та ін. **Багатодвигуновим називається ЕП**, в якому робочі органи однієї машини приводяться до руху декількома електродвигунами.

14.2. Механіка електроприводу

Механічна частина ЕП передає механічну енергію від електричного двигуна до виробничої машини, де ця енергія реалізується в корисну роботу. Конструктивне виконання механічної частини ЕП може бути досить різним, проте, вона містить певні ланки з загальними для різних приводів функціями. Електродвигун як ланка механічної частини привода являє собою джерело або споживач механічної енергії. До механічної частини привода входить лише його обертовий елемент (ротор або якір), який має певний момент інерції, може обертатися з деякою швидкістю і розвивати рушійний або гальмуючий момент.

Передатний пристрій здійснює перетворення руху в механічній частині електропривода. За допомогою передатного пристрою може збільшуватися або зменшуватися швидкість, змінюватися вид руху, наприклад, здійснюватися перетворення обертвого руху на поступальний та ін. До передавальних механізмів належать редуктори, гвинтові, зубчасто-рейкові або пасові передачі, барабан із тросом, кривошипно-шатунний механізм та ін. Передавальний механізм характеризується коефіцієнтом передачі, що представляє собою відношення швидкості на виході до швидкості на вході, механічною інерційністю і пружністю його елементів, зазорами і тертям у зачетленнях пристрою.

Робочий орган виробничої машини реалізує підведену до нього механічну енергію в корисну роботу. Найчастіше він є споживачем енергії. Ця функція робочого органа характерна для механізмів, які здійснюють обробку матеріалів, підйом або переміщення вантажів та ін. При цьому потік механічної потужності спрямований від двигуна до робочого органа. Іноді робочий орган може бути джерелом механічної енергії. У цьому випадку він віддає механічну енергію, яка була накопичена, наприклад при підйомі вантажу, або надійшла до механізму ззовні, наприклад, при вітровому навантаженні на поверхню крана. Потік механічної потужності при цьому спрямований від робочого органа до двигуна.

Робочий орган характеризується певною інерційністю, робочим моментом при його обертвому русі або робочим зусиллям при поступальному русі. В кожному конкретному механізмі він має своє конструктивне виконання. Зокрема, на підйомному крані робочим органом є гак, рейфер механізмів підйому, візок, міст механізмів пересування, поворотна платформа механізмів повороту. На підйомнику - це кабіна, кліть, скіп. На екскаваторі - ківш механізмів напору, тяги і підйому одноковшевих екскаваторів, робоче колесо роторних екскаваторів, поворотна платформа механізмів повороту.

Передача механічної енергії від вала двигуна до робочого органа або назад пов'язана з втратами в механічних ланках. Причина втрат - тертя в підшипниках, напрямних, зачепленнях та ін. У механічних ланках, які мають пружність, виникають додаткові втрати, обумовлені в'язким тертям у елементах, що деформуються. У ре-

зультаті цього потік потужності, проходячи від джерела до споживача, поступово зменшується. Очевидно, що втрати механічної енергії покриваються джерелом енергії - двигуном при прямому потоці енергії і робочим органом при зворотному.

Робота, яка виконується двигуном або робочим органом, визначається за формулами:

при обертовому русі

$$W = \int_0^t M\omega dt, \quad (14.1)$$

при поступальному русі

$$W = \int_0^t Fv dt, \quad (14.2)$$

де F - сила, Н; M – момент, Нм; ω - кутова швидкість, рад/с; v - лінійна швидкість, м/с.

Механічна потужність визначається як похідна роботи за часом, тобто

$$P = \frac{dW}{dt} = M\omega, \quad (14.3)$$

для обертового руху, і

$$P = Fv, \quad (14.4)$$

для поступального руху.

Завдання ЕП полягає у виконанні заданих за технологічними вимогами законів руху робочого органа. При цьому найчастіше виходять з того, що закон руху ротора двигуна пропорційний зазначеному закону для робочого органа.

Коли вважати, що механічна частина ЕП складається з абсолютно жорстких елементів, що не деформуються і не містять повітряних зазорів, то рух одного елемента подає повну інформацію про рух всіх інших елементів, тобто функціональні залежності, що відповідають законам руху всіх ланок кінематичного кола привода, пропорційні один одному і від руху одного елемента можна перейти по заздалегідь відомому взаємозв'язку між координатами до руху будь-якого іншого елемента. Це дозволяє розглядати рух ЕП на будь-якому одному механічному елементі. Звичайно за такий елемент приймають вал двигуна, і до нього приводять всі зовнішні моменти або сили, а також всі інерційні маси механічних ланок.

Для приведення до вала двигуна моменту або зусилля навантаження робочого органа виробничої машини скористаємося балансом потужності в механічній частині привода

$$P_c = P_{po} + \Delta P, \quad (14.5)$$

де P_c - потужність на валу двигуна; P_{po} - потужність на робочому органі; ΔP - потужність втрат у механічних ланках.

Якщо для механічної частини привода відомий ККД η , то рівність (14.5) може бути представленою у вигляді

$$P_c = P_{po}/\eta. \quad (14.6)$$

При обертовому русі робочого органа потужність на робочому органі і на валу електродвигуна визначають в такий спосіб:

$$P_{po} = M_{po} \cdot \omega_{po}; \quad P_c = M_{оп} \cdot \omega,$$

де ω_{po} - кутова швидкість робочого органа; M_{po} - момент навантаження на робочому органі; ω - кутова швидкість вала двигуна; $M_{оп}$ - момент опору на валу двигуна, називаний також статичним моментом.

Тоді

$$M_{оп} \cdot \omega = M_{po} \cdot \omega_{po} / \eta ,$$

або

$$M_{on} = \frac{M_{po}}{i_p \cdot \omega} , \quad (14.7)$$

де $i_p = \omega / \omega_{po}$ — передатне відношення (коефіцієнт) редуктора.

Аналогічні співвідношення можуть бути отримані для випадку поступального руху робочого органа. Потужність на робочому органі

$$P_{po} = F_{po} v_{po} , \quad (14.8)$$

де F_{po} - зусилля навантаження на робочому органі; v_{po} - лінійна швидкість руху робочого органа.

Тоді

$$M_{оп} \cdot \omega = F_{po} \cdot v_{po} / \eta ,$$

або

$$M_{on} = F_{po} \cdot \rho / \eta , \quad (14.9)$$

де $\rho = v / \omega$ - радіус приведення зусилля навантаження до вала двигуна.

Величина $M_{оп}$, обумовлена співвідношенням (14.9), **називається моментом опору** (або **статичним моментом**), приведеним до вала двигуна. Значення i_p і ρ визначають за конструктивними параметрами передавальних механізмів.

Зміст приведення інерційних мас і моментів інерції механічних ланок до вала двигуна полягає в тому, що ці маси і моменти інерції замінюються одним еквівалентним моментом інерції J на валу двигуна. Умовою приведення є рівність кінетичної енергії, обумовленої еквівалентним моментом інерції, сумі кінетичних енергій всіх елементів механічної частини привода, що рухаються.

Еквівалентний момент інерції J , приведений до вала двигуна, називають результирующим або сумарним моментом інерції електропривода. Прикладами обертових елементів у механічній частині привода можуть служити, крім роторів двигунів, сполучні муфти, гальмові шківни, барабани, поворотні платформи екскаваторів і кранів. До елементів, що рухаються поступально, належать мости, візки і вантажі кранів, конвеєрів та ін.

14.3. Рівняння руху електропривода

При вивченні руху ЕП виникає необхідність визначення різних механічних величин - шляху і кута повороту, швидкості і прискорення, а також моментів і сил, що викликають рух і визначають його характер.

Рух ЕП визначається дією двох моментів: моменту, що розвивається двигуном, і моменту опору. Залежно від причини, що обумовлює виникнення моменту опору, розрізняють реактивний і активний моменти опору.

Реактивний момент опору з'являється тільки внаслідок руху - це протидіюча реакція механічної ланки на рух, наприклад, моменти тертя, що виникають в обертових елементах та ін. Реактивний момент спрямований завжди проти руху, тобто має знак, протилежний знаку швидкості. Елемент, що створює реактивний момент, може бути тільки споживачем енергії.

Активний момент опору з'являється незалежно від руху електропривода і створюється сторонніми джерелами механічної енергії. Це, наприклад, момент, обумовлений вагою переміщуваного по вертикалі вантажу, момент, створений силою вітру. Напрямок активного моменту не залежить від напрямку обертання, тобто знак активного моменту не зв'язаний із знаком кутової швидкості. При зміні напрямку обертання знак цього моменту зберігається. Джерело, що створює активний момент, може як споживати, так і віддавати енергію.

У системах ЕП основним режимом роботи електричної машини є режим двигуна. При цьому момент опору має гальмуючий характер відносно руху ротора і діє назустріч моменту двигуна. Тому позитивний напрямок моменту опору приймають протилежним позитивному напрямку моменту двигуна і основне рівняння руху ЕП має вигляд

$$M - M_{on} = J \frac{d\omega}{dt}. \quad (14.10)$$

У рівнянні (14.10) моменти є алгебраїчними, а не векторними величинами, оскільки обидва моменти M і M_{on} діють відносно тієї ж самої осі обертання.

Праву частину рівняння (14.10) називають динамічним моментом $M_{дин}$, тобто

$$M_{дин} = J \frac{d\omega}{dt}, \quad (14.11)$$

де момент інерції J визначається як

$$J = \int_m r^2 m, \quad (14.12)$$

де r – відстань від осі симетрії, m - маса тіла.

З рівняння (14.11) випливає, що при $M = M_{on}$ швидкість обертання електропривода буде незмінною ($\omega = \text{const}$), а динамічний момент відсутній, тому що $\frac{d\omega}{dt} = 0$. Такий **режим називається сталим**.

При $M > M_{on}$ маємо $\frac{d\omega}{dt} > 0$, що відповідає прискоренню двигуна. Динамічний момент в цьому випадку спрямований протилежно моменту двигуна, обмежуючи прискорення. Якщо $M < M_{on}$, то $\frac{d\omega}{dt} < 0$, і двигун уповільнюється. Динамічний момент при цьому діє згідно з моментом двигуна.

Режим роботи ЕП при швидкості обертання, що змінюється $\left(\frac{d\omega}{dt} \neq 0\right)$, називається **перехідним**. Перехідний режим має місце при пуску, гальмуванні, зміні навантаження, регулюванні швидкості та ін.

Тривалість перехідного режиму залежить від моменту інерції мас, що рухаються. На підставі рівняння руху (14.11) може бути вирішене важливе практичне завдання про залежність швидкості від часу в перехідному режимі або про час перехідного режиму ЕП:

$$d\omega = \frac{M - M_{on}}{J} dt, \quad dt = \frac{J}{M - M_{on}} d\omega. \quad (14.13)$$

Однак для його розв'язання необхідно знати залежності моменту двигуна M і моменту опору $M_{оп}$ від кутової швидкості вала двигуна ω , які визначаються механічною характеристикою двигуна (див. підрозділи 10.5 і 11.8) і механічною характеристикою робочого механізму, характер якої визначається винятково властивостями виробничого механізму (див. підрозділ 14.4).

Для випадку поступального переміщення робочого органа (лінійний електропривод) основне рівняння руху ЕП має вигляд

$$\pm F \mp F_{ст} = F_{дин} = m \cdot a, \quad (14.14)$$

де F – сила, створювана електродвигуном; $F_{ст}$ – сила статичного опору; $F_{дин}$ – динамічна сила; m – маса тіл, що рухаються поступально; a – прискорення.

У виразі (14.14) динамічна сила $F_{дин}$ залежить від маси m частин, що рухаються, і ступеня зміни швидкості їхнього переміщення, що виражається *прискоренням* a .

14.4. Механічні характеристики виробничих механізмів і електродвигунів

При розгляданні роботи електродвигуна, що приводить до дії виробничий механізм, необхідно насамперед виявити відповідність механічних характеристик двигуна характеристиці виробничого механізму.

Механічною характеристикою виробничого механізму називають *залежність між швидкістю і приведеним до вала двигуна моментом опору механізму* $\omega = f(M_{оп})$.

Механічні характеристики виробничих механізмів ділять на наступні групи.

Механічна характеристика, в якій момент опору $M_{оп}$ не залежить від швидкості (пряма 1 на рис. 14.2). Таку характеристику мають, наприклад, підйомні крани, лебідки та ін. Сюди ж можуть бути віднесені з певним наближенням всі механізми, де основним моментом опору є момент тертя.

Лінійно зростаюча механічна характеристика (пряма 2 на рис. 14.2). В цьому випадку момент опору лінійно залежить від швидкості ω , збільшуючись з її зростанням.

Нелінійно зростаюча (параболічна) механічна характеристика (крива 3 на рис. 14.2). Момент опору $M_{оп}$ тут залежить від квадрата швидкості. Механізми, які мають таку характеристику, називають іноді механізмами з вентиляторним моментом, оскільки у вентиляторів момент опору залежить від квадрата швидкості. До механізмів, які мають таку механічну характеристику, належать також відцентрові насоси, гребні гвинти, екскаватори та ін.

Як вже відзначалось в розділі 10.5, під механічною характеристикою електродвигуна розуміють залежність його кутової швидкості від обертового моменту, тобто $\omega = f(M)$. Для електродвигунів є характерним зниження швидкості обертання при зростанні моменту навантаження. Однак ступінь зміни швидкості із зміною моменту у різних двигунів різна і характеризується показником, що називають жорсткістю. Під *жорсткістю механічної характеристики електропривода* розуміють *відношення різниці електромагнітних моментів, що розвиваються електродвигуном пристроєм, до відповідної різниці кутових швидкостей електропривода*. Тобто жорсткість β визначається співвідношенням

$$\beta = \frac{M_2 - M_1}{\omega_2 - \omega_1} = \frac{\Delta M}{\Delta \omega}. \quad (14.15)$$

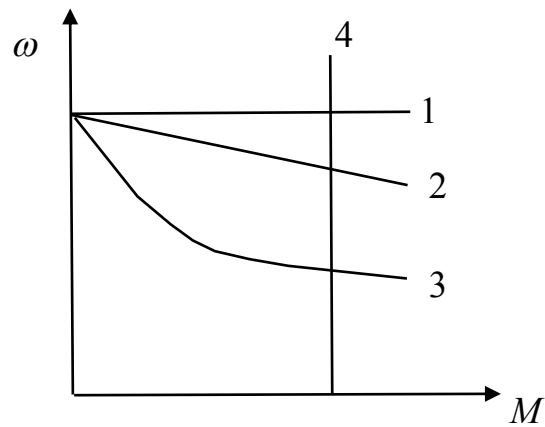
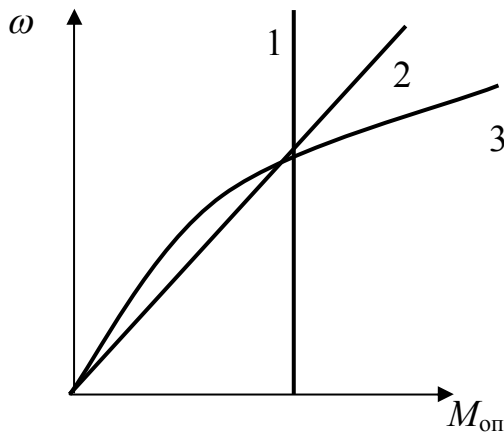


Рис. 14.2 - Механічні характеристики виробничих механізмів

Рис. 14.3 - Механічні характеристики двигунів

Звичайно на робочих ділянках механічні характеристики двигунів мають від'ємну жорсткість $\beta < 0$. Лінійні механічні характеристики мають постійну жорсткість. У випадку нелінійних характеристик їхня жорсткість не постійна і визначається в кожній точці як похідна моменту за кутовою швидкістю

$$\beta = \frac{\partial M}{\partial \omega}. \quad (14.16)$$

Поняття жорсткості може бути застосоване і до механічних характеристик виробничих механізмів. Ці характеристики можна оцінювати жорсткістю

$$\beta_c = \frac{\partial M_{op}}{\partial \omega}. \quad (14.17)$$

Механічні характеристики електродвигунів можна розділити на чотири категорії:

1. *Абсолютно жорстка механічна характеристика* ($\beta = \infty$) - це характеристика, в якій швидкість із зміною моменту залишається незмінною. Таку характеристику мають синхронні двигуни (пряма 1 на рис. 14.3).

2. *Жорстка механічна характеристика* - це характеристика, в якій швидкість із зміною моменту зменшується в малому ступені. Жорстку механічну характеристику мають двигуни постійного струму незалежного збудження, а також асинхронні двигуни в межах робочої частини механічної характеристики (крива 2 на рис. 14.3).

3. *М'яка механічна характеристика* - це характеристика, в якій із зміною моменту швидкість значно змінюється. Таку характеристику мають двигуни постійного струму послідовного збудження, особливо в зоні малих моментів (крива 3 на рис. 14.3). Для цих двигунів жорсткість не залишається постійною.

4. *Абсолютно м'яка механічна характеристика* ($\beta = 0$) - це характеристика, в якій момент двигуна із зміною кутової швидкості залишається незмінним. Таку характеристику мають, наприклад, двигуни постійного струму незалежного збудження при живленні їх від джерела струму або при роботі в замкнутих системах електропривода в режимі стабілізації струму якоря (пряма 4 на рис. 14.3).

Якщо є механічні характеристики двигуна і виробничого механізму, неважко знайти точки (M, ω) , що характеризують сталий режим. Для цього досить скласти графічно за моментом дві характеристики. Отриману в результаті криву називають **спільною характеристикою електродвигуна і виробничого механізму**. Там, де спільна характеристика перетинає вісь частоти обертання ω , буде точка сталого режиму, в якій сума моментів двигуна і механізму дорівнює нулю. Отже відповідно до виразу (14.10) частота обертання в часі змінюватися не буде.

На рис. 14.4 як приклад наведені механічні характеристики двигуна 1, механізму подачі токарного верстата 2 і крива спільної характеристики 3. Спільна характеристика перетинає вісь ω у точці з частотою обертання ω' , де момент дорівнює нулю. Отже при цій частоті обертання виконується умова (14.10) і здійснюється сталий режим. Використовуючи характеристики 1 і 2, неважко визначити момент $M'_{дв}$, що розвивається електродвигуном, і $M'_{вм}$ виробничого механізму в цьому режимі.

Умова (14.10) виконується, якщо абсолютне значення M дорівнює $M_{вм}$. Отже, якщо в механічній характеристиці виробничого механізму перед моментом опустити знак мінус, точка сталого режиму виявиться там, де перетнуться знову отримана характеристика і механічна характеристика двигуна. Графічно перехід від від'ємних моментів статичного опору до додатного полягає в дзеркальному відбитті кривої 2 відносно осі ω у першому квадранті. На рис. 14.4 цією характеристикою є крива 4 і, отже усталений режим відображається точкою A з координатами $M'_{дв}, \omega'$.

Роботі електричного двигуна і виробничого механізму в сталому режимі відповідає рівновага моменту опору механізму і обертового моменту двигуна при певній швидкості, тобто $M_{оп} = M$. Зміна моменту опору на валу двигуна приводить до того, що швидкість двигуна і момент, який він розвиває, можуть автоматично змінюватися, і привод буде продовжувати стійко працювати при іншій швидкості з новим значенням моменту. В електричних двигунах роль автоматичного регулятора може виконувати ЕРС двигуна. Нехай $M = M_1$ і двигун працює із швидкістю ω_1 . Із збільшенням навантаження двигун гальмується, швидкість його знижується, завдяки чому зменшується ЕРС. При зменшенні ЕРС зростають струм у якірному колі двигуна і момент, що розвивається двигуном. Зростання моменту двигуна триває доти, поки не наступить рівновага моментів $M = M_2$, що відповідає новій швидкості ω_2 . Розглянуті умови роботи електропривода в сталому режимі характеризують **статичну стійкість привода**, коли зміна в часі швидкості і моменту відбувається відносно повільно на відміну від динамічної стійкості, що має місце при перехідних режимах.

Під статичною стійкістю розуміють такий стан сталого режиму роботи привода, коли при появі випадкового відхилення швидкості від сталого значення привод повернеться до точки сталого режиму. При нестійкому русі будь-яке, навіть найменше, відхилення швидкості від сталого значення приводить до зміни стану привода - він не повертається до точки сталого режиму.

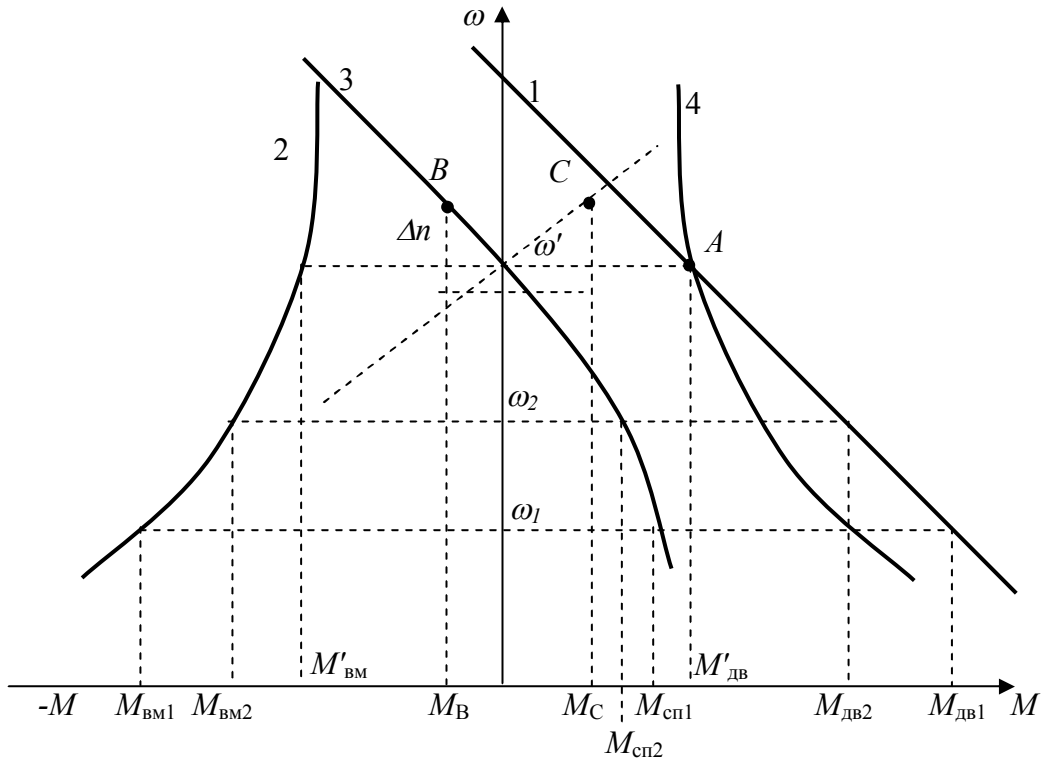


Рис.14.4 - Спільна характеристика електродвигуна і виробничого механізму

Привод є статично стійким, якщо в точці сталого режиму виконується умова

$$\frac{dM}{d\omega} - \frac{dM_{on}}{d\omega} < 0. \quad (14.18)$$

або

$$\beta - \beta_c < 0. \quad (14.19)$$

Умова (14.18) означає, що привод статично стійкий, якщо при позитивному збільшенні кутової швидкості момент двигуна виявиться меншим за статичний момент (момент опору) і привод внаслідок цього загальмується до колишнього значення швидкості. При негативному збільшенні кутової швидкості момент двигуна виявиться більшим за момент опору, і привод внаслідок цього розженеться до колишнього значення швидкості.

При постійному моменті навантаження (пряма 1 на рис. 14.2) статична стійкість буде визначатися тільки жорсткістю механічної характеристики двигуна, тому що $\frac{dM_{on}}{d\omega} = 0$. Якщо вона від'ємна, то робота в сталому режимі стійка

$$\frac{dM}{d\omega} - \frac{dM_{on}}{d\omega} = \frac{dM}{d\omega} < 0.$$

Звичайно при проектуванні електропривода механічна характеристика виробничого механізму відома. Тому для одержання усталеної роботи в сталому режимі для певних швидкостей і моментів опору виробничих механізмів необхідно підбирати механічну характеристику електродвигуна відповідної форми. Це може бути досягнуте шляхом підбору електродвигуна відповідного типу і зміною електричних параметрів його кіл.

14.5. Вибір електродвигуна

Вибір двигуна при проектуванні ЕП є важливим етапом. Ніякі елементи системи керування або зворотних зв'язків не здатні забезпечити необхідні обертові моменти, потрібні швидкості і прискорення механізму, якщо двигун, основний силовий вузол привода не створює для цього умов.

Правильний вибір двигуна визначається як економічними, так і технічними вимогами до його параметрів і показників. Насамперед, при виборі віддають перевагу найбільш простим, дешевим і надійним двигунам - асинхронним і синхронним. Якщо ці машини не можуть задовольнити технічним вимогам, вибирають двигуни постійного струму.

До вимог, що ставляться до параметрів двигуна, належать: номінальна напруга, що відповідає напрузі мережі; потужність, що забезпечує подолання моментів опору при необхідних швидкостях і прискореннях; перевантажувальна здатність, що забезпечує роботу привода при короткочасних навантаженнях; діапазон зміни швидкості при регулюванні, що відповідає вимогам технологічного процесу та ін.

Найбільш істотним параметром, за яким вибирають двигун, є потужність. Машина вважається обраною правильно за потужністю, якщо вона виконує необхідні функції і не перегрівається. Розглянемо фізичний зміст вибору двигуна за потужністю.

Істотною частиною конструкції будь-якої електричної машини є ізоляційні матеріали, які мають фізико-хімічні властивості, що дозволяють ізолювати окремі провідники обмоток один від одного. Якщо ізоляційні матеріали втрачають свої властивості, відбувається закорочення окремих ділянок обмоток, і машина виходить з ладу. Ізоляційні матеріали втрачають свої діелектричні властивості, якщо їхня температура виявляється вище за гранично припустимою температуру. *Здатність матеріалів зберігати свої властивості при гранично припустимій температурі називається **нагрівостійкістю**.*

Якщо в процесі роботи двигуна з ізоляцією відповідного класу нагрівостійкості температура його нагрівання виявиться меншою (або рівною) гранично припустимій температурі цього класу, двигун буде працювати в нормальних умовах. Якщо ж температура двигуна виявиться вище гранично припустимої, ізоляція починає втрачати свої діелектричні властивості і виходити з ладу.

Після підключення електричної машини до джерела живлення по її обмотках проходить струм, перемагнічується сталь і відбуваються інші фізичні процеси, в результаті яких частина електричної і механічної енергії, що називається втратами ΔP , перетворюється на теплову. Деяка кількість теплової енергії віддається до навколишнього середовища, а інша витрачається на нагрівання двигуна.

У перший момент часу після підключення до джерела живлення двигун інтенсивно нагрівається, потім цей процес уповільнюється. Нарешті настає період, коли зміна температури двигуна τ практично не відбувається (рис.14.5).

Слід зазначити, що коли мова йде про нагрівання або охолодження електричних машин, то звичайно замість дійсної температури користуються відносною величиною, ***перевищенням температури τ*** , що *представляє різницю температур машини і навколишнього середовища.*

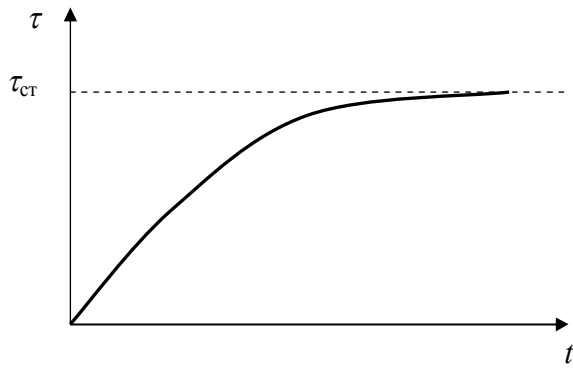


Рис. 14.5 - Характеристика нагрівання двигуна

Дотепер розглядався випадок, коли момент навантаження, а отже, і потужність, що розвивається двигуном, не змінюються в часі. Якщо ці величини збільшити, зросте стале перевищення температури двигуна, оскільки збільшаться струми, що проходять по обмотках, отже зростуть втрати.

У випадках, коли момент навантаження перевищує припустимі для двигуна значення, збільшується потужність, споживана двигуном, і, в результаті збільшення втрат у двигуні, $\tau_{ст}$ може перевищити $\tau_{прип}$ і двигун почне перегріватися. Межею збільшення навантаження є номінальна потужність двигуна, тобто якщо в процесі роботи двигун розвиває потужність, яка не перевищує номінальної, то завод-виготовлювач гарантує його нормальну роботу без перегріву.

При навантаженні двигуна можна орієнтуватися також на *номінальний струм* і *номінальний момент* двигуна. Струм і момент двигуна не повинні перевищувати його номінальних значень. Це справедливо, якщо температура навколишнього середовища відповідає 40°C . Саме на таку температуру навколишнього середовища орієнтуються при теплових розрахунках двигуна в процесі його конструювання.

При постійному навантаженні для вибору електродвигуна досить визначити потужність на валу виробничого механізму і вибрати за каталогом двигун тієї ж номінальної потужності або найближчої більшої.

При змінному навантаженні вибір двигуна ускладнюється. В цьому випадку використовують *навантажувальну діаграму*, яка визначає *графічну залежність потужності опору робочого механізму від часу*, а також навантажувальні діаграми потужності, втрати потужності і струму двигуна. Вибір двигуна полягає в наступному. Відому з навантажувальної діаграми змінну потужність $P(t)$ механізму (рис. 14.6) замінюють *постійною середньою потужністю*, обчисленою за цикл $t_{ц}$ за формулою

$$P_{сер} = \frac{P_1 \cdot t_1 + P_2 \cdot t_2 + \dots + P_6 \cdot t_6}{t_1 + t_2 + \dots + t_6} \quad (14.20)$$

Потім $P_{сер}$ множать на *коефіцієнт запасу* $k_3 = 1,14 \div 1,3$; $P'_{сер} = P_{сер} k_3$. Далі за $P'_{сер}$ вибирають двигун, будують для нього одну з навантажувальних діаграм і виконують перевірочний розрахунок.

З деяким допущенням характеристика нагрівання електричної машини має вигляд експоненти (рис. 14.5). Як видно з рисунка, перевищення температури τ прагне до максимального значення $\tau = \tau_{ст}$.

Електрична машина не перегрівается протягом тривалого часу, якщо її стале значення перевищення температури $\tau_{ст}$ менше (або дорівнює) припустимого $\tau_{прип}$ класу ізоляції машини: $\tau_{ст} \leq \tau_{прип}$.

Для більш точного вибору двигуна використовують *метод середніх втрат*. Для цього методу беруть діаграму потужності двигуна, що відрізняється від навантажувальної діаграми потужності виробничого механізму появою динамічного моменту при зміні швидкості привода. Дійсно, у перехідних режимах потужність двигуна витрачається не тільки на подолання статичного моменту опору, але і на подолання динамічного моменту.

Звичайно цією відмінністю знехтують, а для методу середніх втрат використовують діаграму виробничого механізму. Спочатку для кожної ділянки навантажувальної діаграми з постійною потужністю за допомогою характеристики ККД $\eta(P)$ визначають втрати двигуна ΔP , а потім середні втрати для всієї навантажувальної діаграми за виразом

$$\Delta P_{cp} = \frac{\Delta P_1 \cdot t_1 + \Delta P_2 \cdot t_2 + \dots + \Delta P_6 \cdot t_6}{t_1 + t_2 + \dots + t_6}, \quad (14.21)$$

де $\Delta P_1 \div \Delta P_6$ - втрати на ділянках 1 \div 6 діаграми; $t_1 \div t_6$ - час ділянок 1 \div 6 діаграми (рис.14.6).

Далі визначають номінальні втрати $\Delta P_{ном}$ за номінальною потужністю двигуна і $\eta_{ном}$ у номінальному режимі і порівнюють значення $\Delta P_{ном}$ і $\Delta P_{сер}$. Якщо $\Delta P_{ном} \geq \Delta P_{сер}$, вважають, що $\tau_{ст} \leq \tau_{прп}$, і двигун обраний правильно. Якщо $\Delta P_{ном} < \Delta P_{сер}$, необхідно вибрати з каталогу наступний двигун найближчої більшої потужності і повторити розрахунок.

Також використовують менш точні, але більш прості *методи еквівалентних величин*: струму, моменту і потужності.

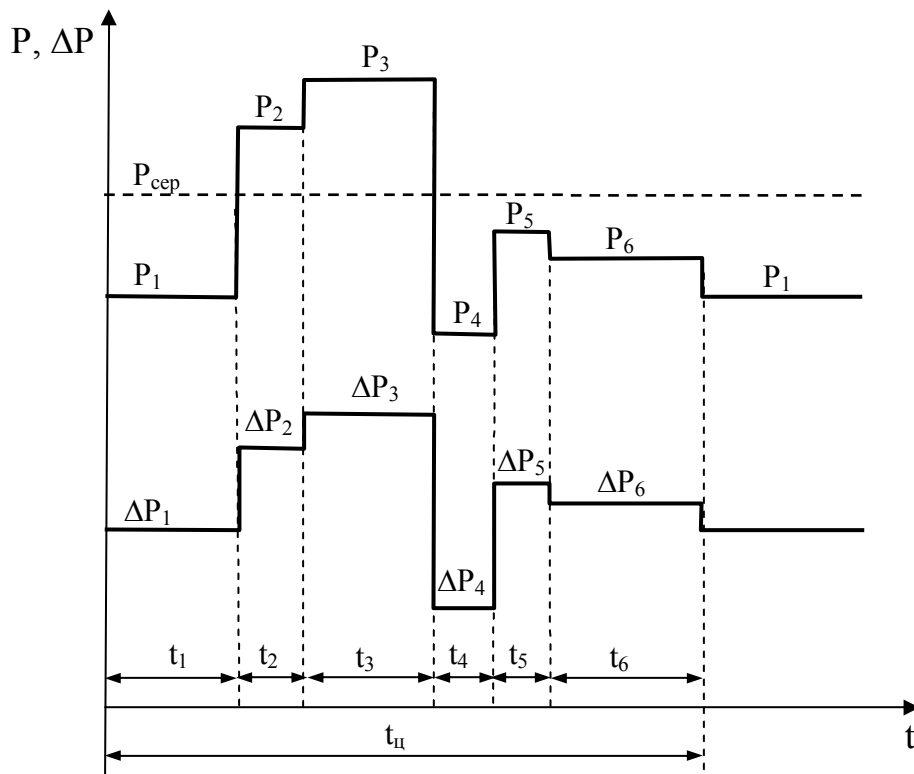


Рис. 14.6 - Східчаста навантажувальна діаграма двигуна

В кожному з цих методів з побудованої для попередньо обраного двигуна діаграми визначають значення еквівалентної величини (струму, моменту або потужності) за наступними виразами:

$$I_{екв} = \sqrt{\frac{I_1^2 \cdot t_1 + I_2^2 \cdot t_2 + \dots + I_n^2 \cdot t_n}{t_1 + t_2 + \dots + t_n}}, \quad (14.22)$$

$$M_{екв} = \sqrt{\frac{M_1^2 \cdot t_1 + M_2^2 \cdot t_2 + \dots + M_n^2 \cdot t_n}{t_1 + t_2 + \dots + t_n}}, \quad (14.23)$$

$$P_{екв} = \sqrt{\frac{P_1^2 \cdot t_1 + P_2^2 \cdot t_2 + \dots + P_n^2 \cdot t_n}{t_1 + t_2 + \dots + t_n}}. \quad (14.24)$$

Отримані значення еквівалентних величин порівнюють з відповідними номінальними значеннями. Якщо вони виявляється не менше еквівалентних, двигун за потужністю обраний правильно.

Необхідно пам'ятати, що правильно обраний двигун за потужністю може бути непридатним для використання у приводі, якщо його перевантажувальна здатність незадовільна.

Перевірку двигуна за припустимим перевантаженням у методі еквівалентного струму виконують за виразом

$$I_{\max}/I_{\text{ном}} \leq \lambda_i, \quad (14.25)$$

де I_{\max} - максимальне значення струму при змінному навантаженні; λ_i - припустимий коефіцієнт перевантаження двигуна за струмом (для двигунів постійного струму загального призначення $\lambda_i = 2 \div 2,5$; для спеціальних двигунів він може бути більшим).

Якщо умова (14.25) не виконується, необхідно вибрати за каталогом наступний двигун більшої потужності і перевірити його тільки за перевантажувальною здатністю.

При виборі асинхронного двигуна необхідно перевірити, щоб його максимальний момент був більшим за найбільший момент навантажувальної діаграми.

Для двигунів постійного струму незалежного або паралельного збудження, а також асинхронних і синхронних може бути застосований кожний з розглянутих методів.

Для двигунів постійного струму послідовного і змішаного збудження придатний тільки метод середніх втрат і метод еквівалентного струму.

Ми розглянули вибір двигуна при **тривалому режимі роботи**, коли температура двигуна встигає досягти сталого значення. Але двигун може також працювати у **короткочасному режимі**, коли за робочий період він не встигає нагрітися до сталого значення, а за час відключення встигає охолонути до температури навколишнього середовища.

У короткочасному режимі двигун необхідно навантажувати потужністю вище за номінальну, щоб він був повністю використаний за нагрівом. Максимальне дозування навантаження здійснюють з умови $\tau_{\max} \leq \tau_{\text{прип}}$. Двигуни загального призначення використовувати в короткочасному режимі недоцільно, тому що вони мають невисоку перевантажувальну здатність і вимагають завищеної потужності. Для короткочасних режимів промисловість випускає спеціальні двигуни з **підвищеною перевантажувальною здатністю** і вказівкою номінальної нормованої тривалості роботи (10, 30, 60 і 90 хв). Вибір двигуна здійснюють так само, як і в тривалому режимі, використовуючи номінальні дані, що відповідають дійсному часу робо-

ти. Якщо час роботи відрізняється від нормованого, реальні параметри двигуна (потужність, струм, момент) приводять до найближчого обраного нормованого часу.

Існує ще один режим роботи двигуна – **повторно-короткочасний**, при якому *робочі періоди* (t_p) чергуються з *паузами* (t_n); причому в робочий період двигун не встигає нагрітися до сталої температури, а в період паузи - охолонути до температури навколишнього середовища.

Повторно-короткочасний режим характеризується **відносною тривалістю включення**, що визначається як

$$ПВ = \frac{t_p}{t_p + t_n} \cdot 100\%. \quad (14.26)$$

Для повторно-короткочасного режиму так само, як і для короткочасного, випускають спеціальні двигуни з підвищеними пусковими моментами. Нормована відносна тривалість включення таких двигунів 15, 25, 40, 60%. При цьому враховується, що час циклу не перевищує 10 хв, у противному випадку режим вважають тривалим. У каталогах для двигунів повторно-короткочасного режиму вказують їхні номінальні дані для кожного нормованого (стандартного) значення $ПВ_{ст}$. Вибір двигуна виконують так само, як і для тривалого режиму, використовуючи номінальні дані для відповідного значення $ПВ_{ст}$. Якщо дійсна тривалість включення ($ПВ$) відрізняється від стандартної ($ПВ_{ст}$), двигун вибирають за номінальними даними, відповідними найближчому $ПВ_{ст}$. При цьому реальні параметри двигуна (потужність, струм, момент) приводять до обраного значення $ПВ_{ст}$.

Контрольні запитання з теми 14

1. Дайте визначення електричного привода. Назвіть його основні елементи.
2. Як класифікують системи електроприводів?
3. Як визначають передатне відношення передатного механізму?
4. Що таке статичний момент? Від чого він залежить?
5. Охарактеризуйте поняття «приведений момент інерції» і «динамічний момент».
6. Для чого виконують приведення моментів до однієї осі двигуна?
7. Як записується рівняння руху ЕП?
8. Від чого залежать режими роботи ЕП?
9. Від чого залежить час перехідного режиму ЕП?
10. Охарактеризуйте поняття жорсткості механічної характеристики. Як класифікують механічні характеристики за жорсткістю?
11. Дайте визначення статичної стійкості електропривода.
12. Від чого залежить нагрівання електричного двигуна?
13. Перелічте можливі режими роботи електродвигунів і за яких умов вибирають їхню потужність?
14. Як вибирають потужність двигуна для режиму тривалого постійного навантаження?
15. Як вибирають двигун за методом середніх втрат?
16. У чому сутність методу еквівалентного струму і область його застосування?

17. У чому сутність і область застосування методу еквівалентного моменту?
18. Як вибирають двигун за методом еквівалентної потужності?
19. У якому випадку режим роботи двигуна вважають тривалим?
20. Який режим називають повторно-короткочасним, як при цьому визначають відносну тривалість включення?
21. Як вибирають потужність двигуна для повторно-короткочасного режиму?
22. Який режим називають короткочасним?

Задачі до теми 14 і приклади їхнього розв'язання

Задача 14.1. Електродвигун навантажений постійним моментом опору $M_{оп}$, який не залежить від швидкості. Сумарний приведенний момент інерції J . Визначити час розгону двигуна до номінальної швидкості n_n із стану спокою, якщо середній обертовий момент двигуна під час розгону M . Вихідні дані наведені в таблиці 14.1.

Таблиця 14.1

Параметр	Варіант завдання										
	К	0	1	2	3	4	5	6	7	8	9
$M_{оп}$, кГм	7	8	9	10	9	8	7	6	5	7	8
J , кГм·сек ²	0,3	0,4	0,5	0,25	0,34	0,44	0,52	0,48	0,4	0,3	0,4
n_n , об/хв	960	1200	1400	1600	1400	1300	1200	1100	1000	980	920
M , кГм	15	16	17	18	17	16	14	13	15	17	16

Розв'язання задачі для варіанта К.

Для визначення часу розгону скористаємося рівнянням руху електропривода (14.13), з якого випливає

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

звідки виразимо час розгону

$$t = \int_{\omega=0}^{\omega_n} \frac{J}{M - M_{он}} d\omega = \frac{J}{M - M_{он}} \omega_n = \frac{J}{M_{дин}} \omega_n. \quad (14.27)$$

Середнє значення динамічного моменту на валу двигуна під час розгону визначимо з формули

$$M_{дин} = M - M_{он} = 15 - 7 = 8 \text{ кГм.}$$

Номінальне значення кутової швидкості визначимо в такий спосіб:

$$\omega_n = \frac{2\pi \cdot n_n}{60} = \frac{2 \cdot 3,14 \cdot 960}{60} = 100,5 \text{ рад/с.}$$

Підставляючи значення ω_n в (14.27), одержимо час розгону

$$t = \frac{0,3}{8} \cdot 100,5 = 3,8 \text{ с.}$$

Задача 14.2. Визначити приведені до вала двигуна M момент статичного опору і момент інерції механізму піднімальної лебідки з вантажем (рис. 14.7). Відомі: вага вантажу G , швидкість підйому вантажу V , швидкість обертання двигуна n , момент інерції двигуна J_d , момент інерції муфти і механізму лебідки $J_{\text{мех}}$, ККД лебідки $\eta_{\text{леб}}$. Вихідні дані наведені в табл.14.2.

Таблиця 14.2

Параметр	Варіант завдання											
	К	0	1	2	3	4	5	6	7	8	9	
$G, \text{кГ}$	1000	1100	1200	960	980	920	900	960	1000	1200	1000	
$V, \text{м/хв}$	25	26	27	24	23	22	21	23	26	25	27	
$n, \text{об/хв}$	730	760	800	840	800	760	730	700	750	770	800	
$J_d, \text{кГм}\cdot\text{сек}^2$	0,08	0,07	0,06	0,07	0,08	0,09	0,1	0,09	0,08	0,07	0,06	
$J_{\text{мех}}, \text{кГм}\cdot\text{сек}^2$	0,02	0,03	0,04	0,05	0,05	0,04	0,03	0,02	0,03	0,04	0,05	
$\eta_{\text{леб}}$	0,8	0,7	0,6	0,6	0,7	0,8	0,9	0,9	0,8	0,7	0,6	

Розв'язання задачі для варіанта К.

Приведений момент інерції елементів, що переміщуються поступально, визначається з рівності

$$\frac{mv^2}{2} = J \frac{\omega^2}{2},$$

звідки

$$J = m \left(\frac{v}{\omega} \right)^2.$$

Визначимо кутову швидкість двигуна й масу вантажу

$$\omega = \frac{2\pi n}{60} = \frac{2 \cdot 3,14 \cdot 730}{60} = 76,4 \text{ рад/с}; \quad m = \frac{G}{g} = \frac{1000}{9,81} = 101,94 \text{ кг}.$$

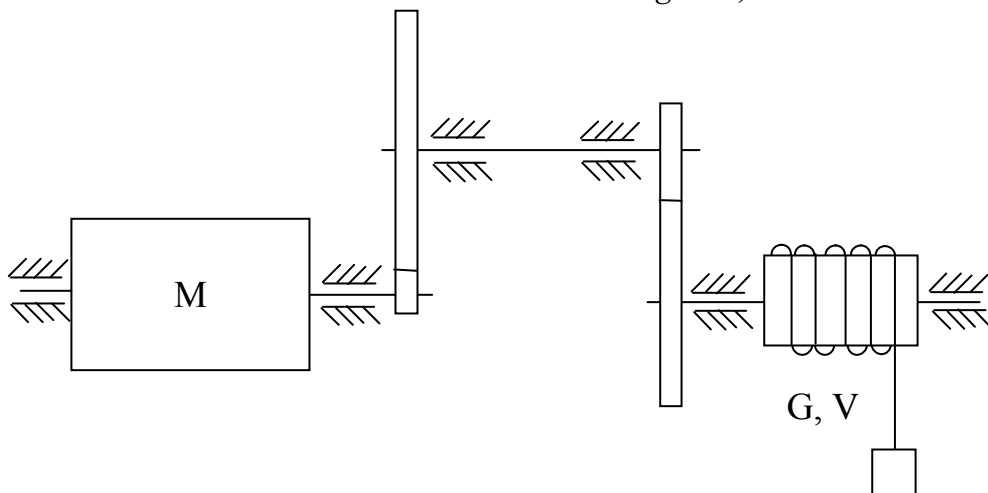


Рис.14.7 - Схема піднімального механізму

Тоді момент інерції вантажу, що переміщається поступально

$$J_n = 101,94 \cdot \left(\frac{25}{60 \cdot 76,4} \right)^2 = 0,0032 \text{ кГм}\cdot\text{сек}^2.$$

Сумарний приведений момент інерції

$$J_{\Sigma} = J_d + J_m + J_n = 0,08 + 0,02 + 0,0032 = 0,1032 \text{ кГм} \cdot \text{сек}^2.$$

Приведений статичний момент опору на валу двигуна відповідно до (14.9) дорівнює

$$M_{ст} = G \cdot \rho / \eta.$$

Визначимо ρ за формулою

$$\rho = \frac{v}{\omega} = \frac{25}{76,4 \cdot 60} = 0,0055 \text{ м},$$

тоді
$$M_{ст} = \frac{1000 \cdot 0,0055}{0,8} = 6,9 \text{ кГм}.$$

Задача 14.3. Механізм працює в тривалому режимі за графіком навантаження. Вибрати для даного привода асинхронний короткозамкнений двигун серії АТ. Швидкість обертання n , тривалість ступенів навантаження t , та відповідні величини моменту навантаження M , наведені в табл. 14.3.

Таблиця 14.3

Параметр		Варіант завдання										
		К	0	1	2	3	4	5	6	7	8	9
n , об/хв		970	800	800	900	900	1000	1000	950	950	1000	800
1 сту- пінь	t , с	20	10	15	20	30	35	20	40	35	80	90
	M , кГм	13	8	12	60	45	15	80	120	95	70	25
2 сту- пінь	t , с	120	90	80	60	120	70	150	180	20	30	50
	M , кГм	8	20	6	45	88	12	50	100	35	40	20
3 сту- пінь	t , с	60	30	45	120	80	60	30	20	120	180	30
	M , кГм	10	12	9	75	34	20	65	80	50	60	30

Розв'язання задачі для варіанта К.

На рис. 14.8 показаний графік моменту навантаження. Визначимо еквівалентний момент навантаження

$$M_{екв} = \sqrt{\frac{M_1^2 \cdot t_1 + M_2^2 \cdot t_2 + \dots + M_n^2 \cdot t_n}{t_1 + t_2 + \dots + t_n}} = \sqrt{\frac{13^2 \cdot 20 + 8^2 \cdot 120 + 10^2 \cdot 60}{20 + 120 + 60}} = 9,4 \text{ кГм}.$$

Еквівалентна потужність двигуна визначається за формулою

$$P_{екв} = M_{екв} \cdot \omega = M_{екв} \frac{\pi \cdot n}{30} = 9,4 \cdot 9,81 \cdot \frac{3,14 \cdot 970}{30} = 9300 \text{ Вт} = 9,3 \text{ кВт}.$$

Змінами швидкості двигуна при змінах навантаження зневажаємо.

За каталогом приймаємо двигун АТ63-6, $P_n = 10 \text{ кВт}$; $n = 980 \text{ об/хв}$, $\eta = 87\%$, $M_k/M_n = 2,2$, $M_p/M_n = 1,4$.

Зробимо перевірку за перевантажувальною здатністю і пусковим моментом:

$$M_n = 975 \frac{P_n}{n} = 975 \frac{10}{980} \approx 10 \text{ кГм};$$

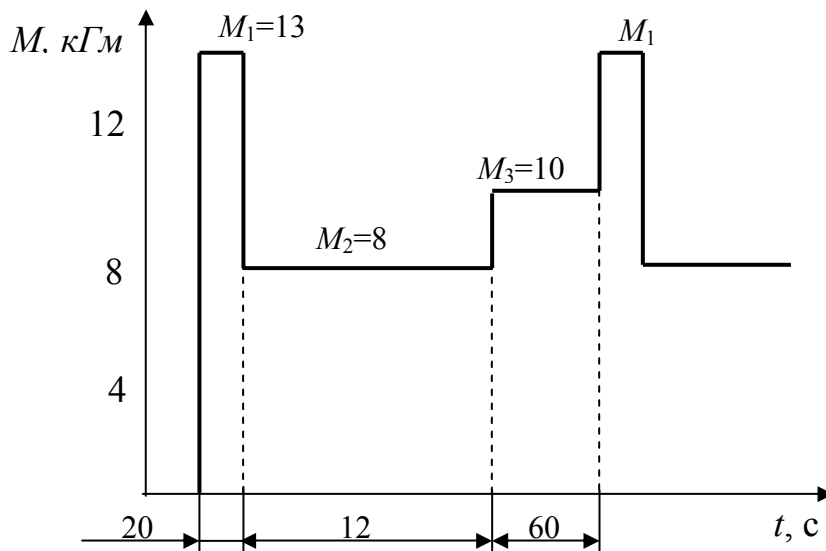


Рис.14.8 - Графік моменту навантаження

$$M_k = 10 \cdot 2,2 = 22 \text{ кГм};$$

$$M_n = 10 \cdot 1,4 = 14 \text{ кГм}.$$

За перевантажувальними і пусковими властивостями двигун підходить.

Задача 14.4. Користуючись каталогом, вибрати асинхронний короткозамкнений двигун для піднімального механізму, що працює в повторно-короткочасному режимі за графіком навантаження. Швидкість обертання n , тривалість ступенів навантаження t , та відповідні величини потужності навантаження P наведені в табл. 14.4.

Таблиця 14.4

Параметр		Варіант завдання										
		К	0	1	2	3	4	5	6	7	8	9
n , об/хв		900	800	800	900	900	1000	1000	950	950	1000	800
1 ступінь	t , с	40	10	15	20	30	35	20	40	35	80	90
	M , кГм	5	8	12	60	45	15	80	120	95	70	25
2 ступінь	t , с	90	90	80	60	120	70	150	180	20	30	50
	M , кГм	2,1	4	6	45	88	12	50	100	35	40	20
3 ступінь	t , с	430	30	45	120	80	60	30	20	120	180	30
	M , кГм	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0

Розв'язання задачі для варіанта К.

Графік навантаження показаний на рис. 14.9. Визначимо еквівалентну потужність за робочий період

$$P_{\text{екв}} = \sqrt{\frac{P_1^2 \cdot t_1 + P_2^2}{t_1 + t_2}} = \sqrt{\frac{5^2 \cdot 40 + 2,7^2 \cdot 90}{40 + 90}} = 3,6 \text{ кВт}.$$

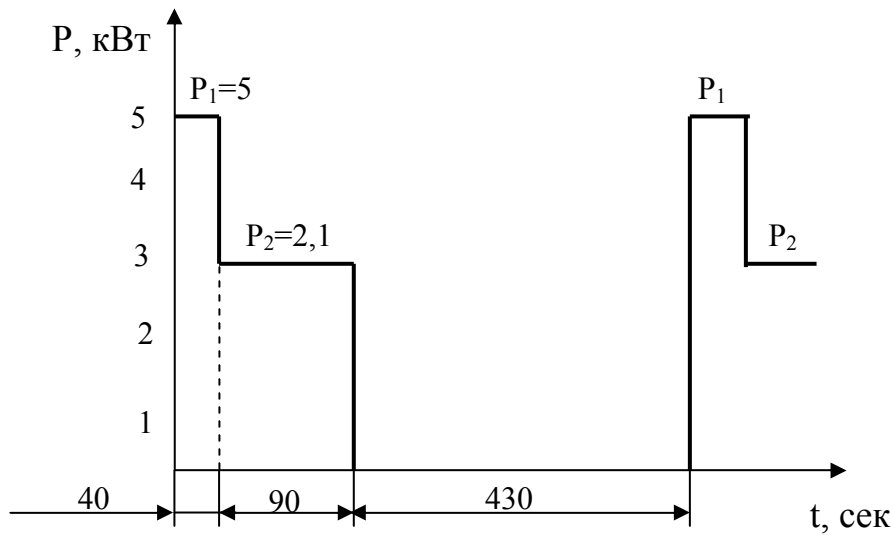


Рис.14.9 - Графік навантаження

Фактична тривалість включення

$$ПВ_1 = \frac{t_p}{t_p + t_0} \cdot 100 = \frac{t_1 + t_2}{t_1 + t_2 + t_0} \cdot 100 = \frac{40 + 90}{40 + 90 + 430} \cdot 100 = 23\%$$

Перерахуємо еквівалентну потужність на стандартне значення $ПВ_2=25\%$

$$P_{екв}' = P_{екв} \sqrt{\frac{ПВ_1}{ПВ_2}} = 3,6 \sqrt{\frac{23}{25}} = 3,46 \text{ кВт}$$

За величиною $P_{екв}'=3,46$ кВт з каталогу вибираємо асинхронний короткозамкнений двигун кранової серії типу МТК12-6, для якого при $ПВ = 25\%$ $P_n = 3,5$ кВт, $n = 883$ об/хв:

$$\frac{M_{\kappa}}{M_n} = 2,6; \quad \frac{M_n}{M_n} = 2,6$$

Обраний двигун підходить також за перевантажувальними і пусковими властивостями.

ТЕМА 15

РЕГУЛЮВАННЯ ШВИДКОСТІ ЕЛЕКТРОПРИВОДІВ

Ключові поняття: регулювання швидкості, діапазон регулювання кутової швидкості, плавність регулювання, економічність регулювання, стабільність кутової швидкості, напрямок регулювання, припустиме навантаження двигуна, скважність керуючих імпульсів.

15.1. Основні показники регулювання кутової швидкості електроприводів

У промисловості використовують велику кількість виробничих механізмів, що працюють з швидкістю яка змінюється. Зокрема, у ліфтах, підйомних і транспортних механізмах швидкість необхідно знижувати в міру підходу до пункту зупинки, щоб забезпечити плавну і точну зупинку в потрібному місці. Швидкість, при якій повинен працювати димосос котельні, визначається якістю палива, його вологістю, зольністю, умовами процесу горіння і необхідною продуктивністю казана. У всіх цих механізмах, як і в багатьох інших, для досягнення високої продуктивності і необхідної якості роботи потрібно здійснювати регулювання швидкості.

Регулюванням швидкості називається *примусова зміна швидкості електропривода залежно від вимог технологічного процесу*. Регулювання швидкості здійснюється керуючим впливом на приводний двигун. Основними показниками, що характеризують різні способи регулювання швидкості електроприводів, є: діапазон регулювання; плавність; економічність; стабільність швидкості; напрямок регулювання швидкості (зменшення або збільшення швидкості відносно основної); припустиме навантаження при різних швидкостях.

Діапазон регулювання кутової швидкості - це відношення можливих сталих швидкостей: максимальної ω_{\max} до мінімальної ω_{\min} при заданій точності регулювання (із заданим статичним падінням швидкості електропривода) для встановлених меж зміни моменту навантаження й інших збурювань.

$$D = \omega_{\max} : \omega_{\min} \quad (15.1)$$

Звичайно діапазон регулювання виражається числами у вигляді відношення, наприклад: 2:1, 4:1, 10:1, 20:1 і т.д.

Плавність регулювання характеризує стрибок швидкості при переході від даної швидкості до найближчої можливої. Плавність тим вища, чим менший цей стрибок. Число швидкостей, одержуваних у даному діапазоні, визначається плавністю регулювання. Її можна оцінити **коефіцієнтом плавності регулювання**, що визначається як відношення двох сусідніх значень кутових швидкостей при регулюванні швидкості

$$\varphi_{\text{пл}} = \omega_i / \omega_{i-1} \quad (15.2)$$

де ω_i і ω_{i-1} - кутові швидкості відповідно на i -й і $(i-1)$ -й ступенях регулювання.

При плавному регулюванні $\varphi_{\text{пл}} \rightarrow 1$, а число швидкостей $z \rightarrow \infty$. Число швидкостей z , діапазон регулювання D і коефіцієнт плавності регулювання зв'язані між собою рівністю

$$D = \varphi_{\text{пл}}^{z-1} \quad (15.3)$$

Економічність регулювання характеризується витратами на виготовлення і експлуатацію електропривода. Необхідно відзначити, що економічно вигідним виявляється такий регульований електропривод, який при високій якості технологічного процесу забезпечує більшу продуктивність механізму, що приводиться ним у дію, і порівняно швидко окупається. При оцінці економічності регульованого електропривода також беруть до уваги його надійність в експлуатації та втрати енергії в процесі регулювання.

Стабільність кутової швидкості характеризується зміною кутової швидкості при заданому відхиленні моменту навантаження і залежить від жорсткості механічної характеристики. Чим більша жорсткість характеристики, тим вища стабільність кутової швидкості.

Напрямок регулювання швидкості - це зменшення або збільшення величини швидкості відносно її основної величини. Розрізняють однозонне регулювання униз від основної швидкості, однозонне регулювання вище основної швидкості і двозонне регулювання, коли є можливість одержувати характеристики вище і нижче природної.

Допустиме навантаження двигуна – це найбільше значення моменту, яке двигун здатний розвивати довгостроково при роботі на регульованих характеристиках. Воно визначається нагріванням двигуна і для різних способів регулювання різне. Зміна навантажувального моменту залежно від швидкості в різних виробничих механізмах також є різною. Наприклад, багато механізмів вимагають регулювання при постійному моменті. До них належать: підйомні крани, лебідки, деякі прокатні стани та ін. З іншого боку, існують механізми, в яких регулювання швидкості здійснюється з постійною потужністю.

Принципово шляхом вибору відповідної потужності двигуна можна задовольнити будь-якій зміні навантажувального моменту або потужності при регулюванні швидкості. Однак регулювання кутової швидкості двигуна може виявитися неекономічним, тому що на різних кутових швидкостях він буде використовуватися неоднаково і на деяких з них виявиться недовантаженим. Недовантаження двигуна веде до погіршення експлуатаційних показників привода, оскільки при цьому зменшується ККД двигуна, а при змінному струмі, крім того, зменшується й коефіцієнт потужності. Тому бажано застосовувати такий спосіб регулювання, при якому двигун був би повністю завантажений при всіх кутових швидкостях.

У наступному розділі ми розглянемо основні способи регулювання кутової швидкості на прикладі двигуна постійного струму з незалежним збудженням, який має застосування в будівельній індустрії.

15.2. Регулювання кутової швидкості двигуна постійного струму з незалежним збудженням

Кутова швидкість ДПС з незалежним збудженням визначається виразом

$$\omega = \frac{U - I \cdot R}{k \cdot \Phi} \quad (15.4)$$

звідки випливає, що швидкість двигуна постійного струму з незалежним збудженням можна регулювати наступними трьома способами:

- 1) зміною струму збудження I (магнітного потоку Φ) двигуна;

2) зміною опору кола якоря R за допомогою резисторів (реостатне регулювання швидкості);

3) зміною напруги U , що підводять до якоря двигуна.

15.2.1. Регулювання швидкості зміною струму збудження (або магнітного потоку Φ , що визначається струмом збудження) є одним з найбільш простих і економічних способів, тому що потужність, споживана обмоткою збудження двигуна, становить близько $2 \div 2,5$ % потужності двигуна.

Струм збудження регулюють за допомогою резистора (рис. 15.1) у випадку двигунів малої потужності, або за допомогою регулятора напруги РН (рис. 15.2). Регулювання швидкості в цьому випадку здійснюється уверх від основної, причому припустимий момент двигуна змінюється за законом гіперболи, а припустима потужність залишається незмінною. Оскільки припустиме навантаження визначається струмом, який дорівнює номінальному, то потужність, що розвивається двигуном, є постійною ($P = P_{\text{ном}} = \text{const}$). Електромеханічними характеристикам $\omega = f(I)$ при зміні струму збудження відповідають різні значення кутової швидкості ідеального холостого ходу, обумовлені формулою

$$\omega = \frac{U}{k \cdot \Phi}. \quad (15.5)$$

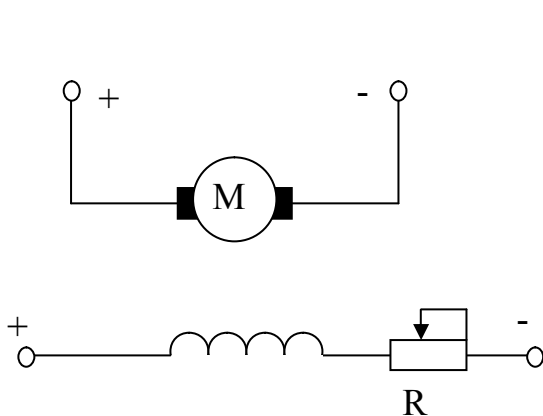


Рис.15.1 - Резисторне регулювання потоку збудження

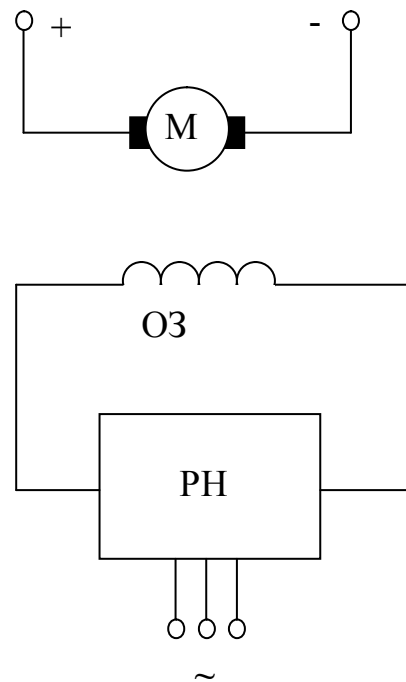


Рис. 15.2 - Регулювання потоку збудження регулятором напруги

На рис. 15.3 показані електромеханічні характеристики двигуна при регулюванні швидкості потоком збудження. Кутова швидкість ідеального холостого ходу ω_0 відповідає природній характеристиці, коли потік $\Phi = \Phi_{\text{ном}}$. Значення кутових швидкостей ідеального холостого ходу при ослабленому потоці ω_0' і ω_0'' лежать вище ω_0 . Всі характеристики перетинають вісь абсцис в одній точці.

Це є наслідком того, що при $\omega = 0$ рівняння для будь-якої електромеханічної характеристики має вигляд:

$$0 = \frac{U - I \cdot R_{я}}{k \cdot \Phi}, \quad (15.6)$$

звідки струм у якорі двигуна визначиться в такий спосіб:

$$I = \frac{U}{R_{я}} = I_{кз}. \quad (15.7)$$

Таким чином, при різних струмах збудження і при кутовій швидкості двигуна, яка дорівнює нулю, струм у якорному колі дорівнює струму короткого замикання двигуна. Цим значенням струму і визначається загальна точка перетинання електромеханічних характеристик.

Механічні характеристики, показані на рис. 15.4, мають ті ж значення кутових швидкостей ідеального холостого ходу, що й електромеханічні характеристики. Однак ці характеристики не перетинаються в одній точці на осі абсцис, тому що в міру зменшення потоку зменшується і момент короткого замикання, що визначається за формулою

$$M_{кз} = k \cdot I_{кз} \cdot \Phi. \quad (15.8)$$

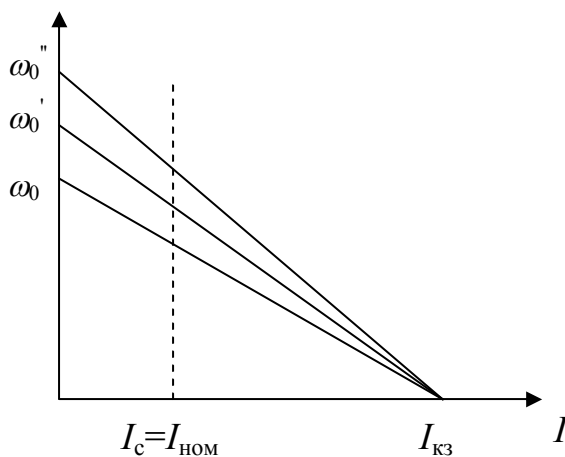


Рис. 15.3 - Електромеханічні характеристики двигуна незалежного збудження

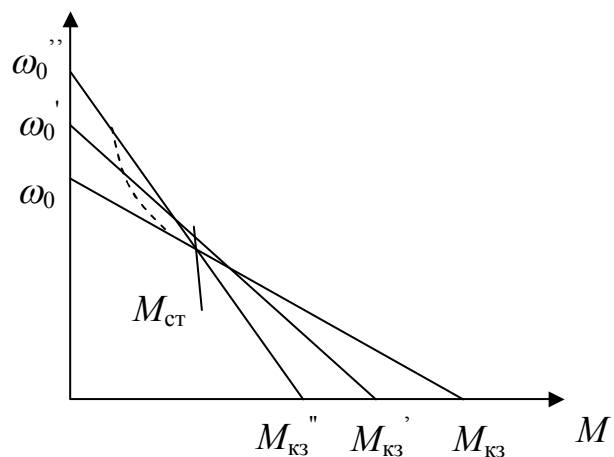


Рис. 15.4 - Механічні характеристики двигуна незалежного збудження

Даний спосіб регулювання є економічним при постійній потужності. Повному використанню двигуна відповідають точки, що належать лінії номінального струму $I_c = I_{ном}$. Цьому відповідають точки, що лежать на гіперболічній кривій моменту опору $M_{ст}$, як це показано пунктиром на рис 15.4. При цьому втрати потужності в колі якоря при роботі на регульовальних характеристиках будуть такими ж, як і на природній характеристиці, а втрати на збудження – меншими. При роботі на кутових швидкостях, що відповідають точкам, які лежать лівіше зазначеної кривої моменту $M_{ст}$, двигун буде недовантажений. Робота на швидкостях, що правіше цієї кривої, приведе до перевантаження двигуна.

Звичайно регульовані двигуни мають діапазон регулювання від 2:1 до 5:1, а в ряді випадків до (8-10):1. Діапазон регулювання обмежується різними фак-

торами. Головним з них є погіршення умов комутації із зростанням кутової швидкості, оскільки реактивна ЕРС, що викликає іскріння на колекторі, пропорційна струму і кутовій швидкості, тобто $E_p = c \cdot I \cdot \omega$. Крім того, при великих кутових швидкостях потрібно підвищувати механічну міцність якоря. Нижня межа кутової швидкості обмежується ступенем насичення машини і нагріванням обмотки збудження, тобто номінальною кутовою швидкістю.

Плавність регулювання в межах заданого діапазону може бути отримана досить значною і визначається кількістю ступенів регулювального реостата або ж числом ступенів спеціальних пристроїв, що регулюють напругу, яку підводять до обмотки збудження.

На практиці часто використовують імпульсне параметричне регулювання струму збудження, при якому можна одержати плавне регулювання кутової швидкості в діапазоні (2-3):1 і більше (див. розділ 15.3).

15.2.2. Реостатне регулювання кутової швидкості двигуна постійного струму з незалежним збудженням здійснюється шляхом зміни опору кола якоря і не вимагає особливих пояснень. У темі 10 розглядалися реостатні механічні характеристики двигуна постійного струму незалежного збудження. Подібний вигляд мають характеристики і при регулюванні кутової швидкості за допомогою реостатів у колі якоря. На відміну від пускового реостата регулювальний реостат повинен бути розрахований відповідно до режиму роботи привода, оскільки він є включеним не тільки короткочасно під час пуску, але й під час роботи двигуна з заданою кутовою швидкістю.

При цьому способі регулювання змінюється жорсткість характеристики, а з нею і стабільність кутової швидкості, кутова швидкість регулюється униз від основної, причому повне використання двигуна за струмом досягається при регулюванні з постійним номінальним моментом, якщо двигун має незалежну вентиляцію.

Дійсно, якщо вважати, що для будь-якої кутової швидкості припустимим є номінальний струм, тобто $I_{\text{прип}} = I_{\text{я.ном}}$, а потік двигуна залишається номінальним, то припустимий момент двигуна дорівнює номінальному $M_{\text{прип}} = k \cdot \Phi_{\text{ном}} \cdot I_{\text{я.ном}} = M_{\text{ном}}$; у міру зниження кутової швидкості припустима потужність двигуна зменшується, тому що $P_{\text{прип}} = M_{\text{ном}} \cdot \omega$. Якщо допустити перепад кутової швидкості у 25 % при зміні моменту навантаження на ± 25 % номінального, то діапазон регулювання складе приблизно 2:1.

В більшості випадків реостатне регулювання кутової швидкості здійснюється за допомогою контакторів, що замикають окремі ступені резисторів, тобто швидкість привода змінюється дискретно, тому даний спосіб при контакторному керуванні не забезпечує плавного регулювання.

Іншим способом досягнення плавного регулювання при введенні резисторів у коло якоря є використання (при невеликій потужності двигуна) імпульсного параметричного регулювання кутової швидкості.

Схему включення двигуна постійного струму незалежного збудження при імпульсному регулюванні додаткового опору в колі якоря наведено на рис. 15.5. Додатковий резистор $R_{\text{дод}}$, що включається до кола якоря, або повністю вводиться до схеми, або замикається накоротко ключем K . Комутація ключа K

здійснюється періодично. При замкнутому накоротко $R_{\text{дод}}$ струм у колі якоря і кутова швидкість двигуна зростають, а при введенні $R_{\text{дод}}$ до кола, коли ключ K розімкнутий, струм і кутова швидкість знижуються. Коливання струму і кутової швидкості відбуваються біля деякого середнього значення. Середнє значення струму визначається моментом навантаження на валу двигуна, а середнє значення кутової швидкості залежить від співвідношення тривалостей замкнутого t_1 і розімкнутого t_2 станів ключа K і від моменту навантаження. Амплітуди коливань струму і кутової швидкості залежать при даних параметрах привода від частоти комутації ключа K , яка повинна бути досить високою. Співвідношення тривалостей t_1 замкнутого й t_2 розімкнутого станів ключа K прийнято виражати у вигляді відносної величини

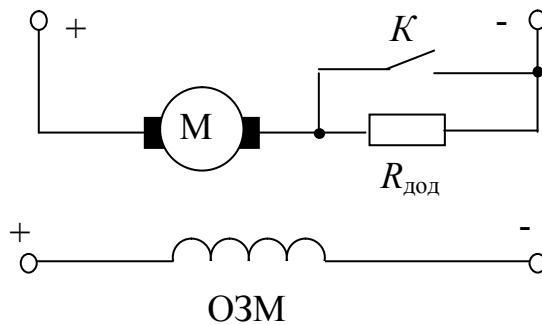


Рис. 15.5 - Схема включення двигуна постійного струму з незалежним збудженням при імпульсному регулюванні швидкості

$$\varepsilon = \frac{t_1}{t_1 + t_2}, \quad (15.9)$$

яка називається *скважністю керуючих імпульсів*. Очевидно, що із збільшенням ε при незмінному навантаженні на валу двигуна кутова швидкість його буде зростати, а при $\varepsilon = 1$ двигун буде працювати на природній характеристиці (ключ K постійно замкнутий). При $\varepsilon = 0$ двигун буде працювати на реостатній характеристиці, що відповідає постійно включеному резистору $R_{\text{дод}}$ (ключ K розімкнутий). При інших значеннях ε еквівалентний (усереднений) додатковий опір у колі якоря визначається співвідношенням

$$R_{\text{дод.е}} = R_{\text{дод}}(1 - \varepsilon). \quad (15.10)$$

Механічні характеристики двигуна, показані на рис. 15.6, визначаються формулою (для середніх значень кутової швидкості і моменту)

$$\omega_{\text{сер}} = \frac{U}{k\Phi} - \frac{M_{\text{сер}}}{k\Phi^2} [R_{\text{я}} + R_{\text{дод}}(1 - \varepsilon)], \quad (15.11)$$

тобто характеристики мають той же вигляд і ті ж властивості, що й при чисто реостатному регулюванні кутової швидкості.

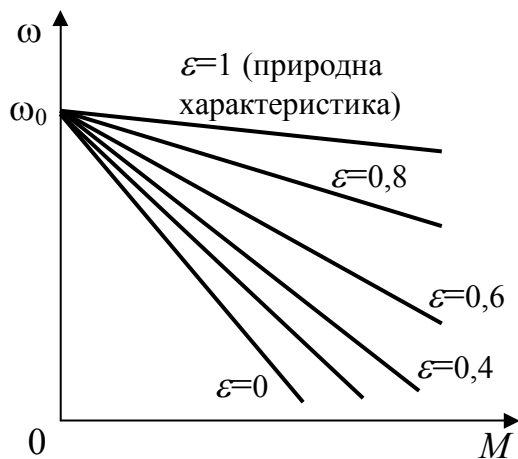


Рис. 15.6 - Характеристики двигуна постійного струму при імпульсному регулюванні швидкості

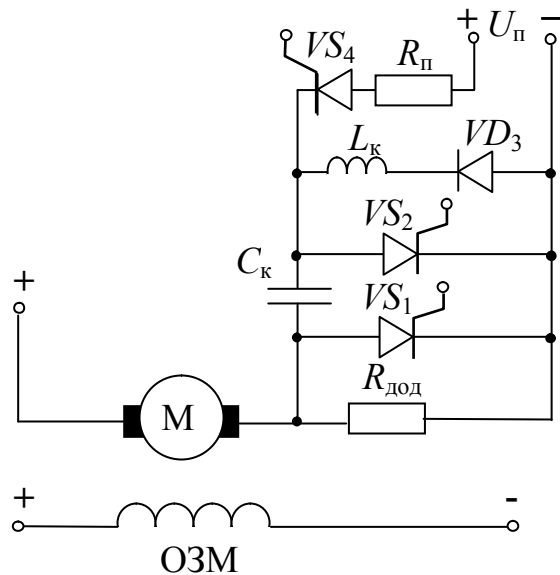


Рис. 15.7 - Схема тиристорного ключа

Для реалізації імпульсного способу регулювання опору застосовуються безконтактні ключі, виконані на базі транзисторів (при струмах до 15 - 20 А) або тиристорів (при струмах до 100 - 150 А). На рис. 15.7 показано схему тиристорного ключа. Роль ключа виконує тиристор VS_1 , шунтуючи резистор $R_{\text{дод}}$ при подачі на нього керуючого імпульсу. Вимикається тиристор VS_1 за допомогою допоміжного тиристора VS_2 , який підключає до тиристора VS_1 комутуючий конденсатор C_k , попередньо заряджений через тиристор VS_4 і резистор $R_{\text{п}}$ від малопотужного джерела $U_{\text{п}}$. Вимикання тиристора VS_2 відбувається по закінченні перезаряду конденсатора C_k від напруги кола якоря (падіння напруги на $R_{\text{дод}}$ при включеному тиристорі VS_1). При черговому включенні тиристора VS_1 зворотний коливальний перезаряд конденсатора C_k здійснюється через VS_1 , діод VD_3 і реактор L_k .

При регулюванні кутової швидкості введенням резисторів у коло якоря двигуна постійного струму втрати потужності в цьому колі пропорційні споживаній потужності і перепаду кутової швидкості, вираженому у відносних одиницях.

15.2.3. Регулювання швидкості зміною напруги на якорі двигуна. Регулювання кутової швидкості здійснюється униз від основної. Із зниженням кутової швидкості припустимий момент залишається постійним, тому що припустимий струм якоря дорівнює номінальному, а потік при незалежному збудженні залишається незмінним (номінальним).

Для різних значень напруги кутова швидкість двигуна дорівнює:

$$\omega_1 = \frac{U_1 - I \cdot R_{\text{я}}}{k \cdot \Phi}; \quad \omega_2 = \frac{U_2 - I \cdot R_{\text{я}}}{k \cdot \Phi}.$$

Їхнє відношення

$$\frac{\omega_1}{\omega_2} = \frac{U_1 - I \cdot R_{\text{я}}}{U_2 - I \cdot R_{\text{я}}}. \quad (15.12)$$

Звідси випливає, що при зміні напруги регульовальні характеристики розташовуються паралельно одна до одної, тобто мають однакову жорсткість (як

показано на рис. 15.8), що визначає відносно високу стабільність кутової швидкості. Діапазон регулювання

$$D = \frac{U_{ном} - I \cdot R_{я}}{U_{мін} - I \cdot R_{я}}, \quad (15.13)$$

де $U_{ном}$ і $U_{мін}$ - номінальна й мінімальна напруги.

З (15.12) випливає, що відносний перепад кутової швидкості зростає із зниженням напруги. Це обмежує діапазон регулювання значенням $D = (8-10) : 1$ у системах привода без зворотних зв'язків (у замкнутих системах діапазон регулювання істотно більший і може досягати значень 1000:1 і більше).

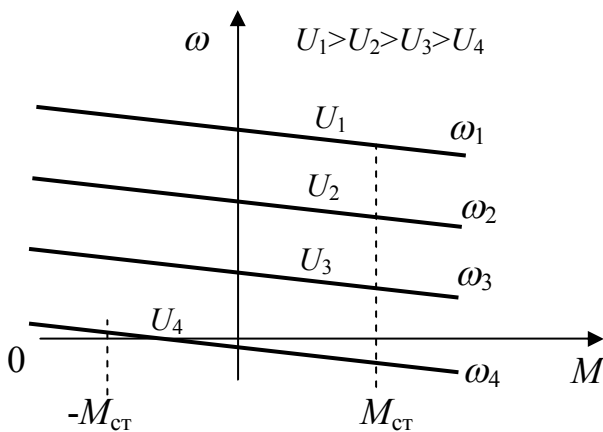


Рис. 15.8 - Характеристики ДПС при регулюванні швидкості зміною напруги якоря

Плавність регулювання визначається плавністю зміни напруги живлення і звичайно характеризується значенням коефіцієнта плавності $\phi_{пл}$.

ККД двигуна в цьому випадку дорівнює відношенню фактичної кутової швидкості двигуна до кутової швидкості ідеального холостого ходу на заданій характеристиці. Втрати потужності в якорному колі при постійному моменті навантаження залишаються незмінними при регулюванні кутової швидкості і дорівнюють втратам при роботі на природній характеристиці.

Але оскільки корисна потужність в міру зниження кутової швидкості зменшується, то і ККД двигуна падає. Внаслідок малих втрат потужності в колі якоря цей спосіб регулювання швидкості є економічним.

Оскільки напруга живильної мережі підтримується постійною, зазначений спосіб регулювання можливий при використанні відповідного перетворювача з регульованою напругою постійного струму на його виході, наприклад, у системі керований випрямляч - двигун. На практиці застосовуються й інші системи зміни напруги на якорі двигуна постійного струму, серед яких відзначимо керовані тиристорні випрямлячі й імпульсні регулятори напруги (широко-імпульсні перетворювачі).

15.3. Регулювання кутової швидкості асинхронних двигунів

Електроприводи з АД широко застосовують в різних технологічних установках. Це пояснюється тим, що вони мають просту конструкцію, надійні в експлуатації, дешевші, значно легші і менші за розмірами ніж двигуни постійного струму тієї ж потужності. Крім того, деякі способи регулювання кутової швидкості не вимагають спеціальних перетворювальних пристроїв.

Найбільш часто трифазні АД регулюють: зміною додаткового опору в колі ротора (реостатне регулювання); зміною напруги статора; спільною зміною частоти і напруги живлення (частотний спосіб); перемиканням числа полюсів обмотки статора двигуна. Для регулювання кутової швидкості, крім згаданих,

можуть бути використані і деякі інші способи: імпульсне регулювання, регулювання за допомогою електромагнітної муфти ковзання та ін.

15.3.1. Реостатне регулювання кутової швидкості АД. Механічні характеристики двигуна при регулюванні включенням опору до кола ротора (реостатному регулюванні) показані на рис. 15.9. З рисунка видно, що чим більший опір ($R_1 < R_2 < R_3 < R_4$) підключають до роторного кола, тим меншу частоту обертання розвиває двигун при тому ж моменті $M_{ст}$.

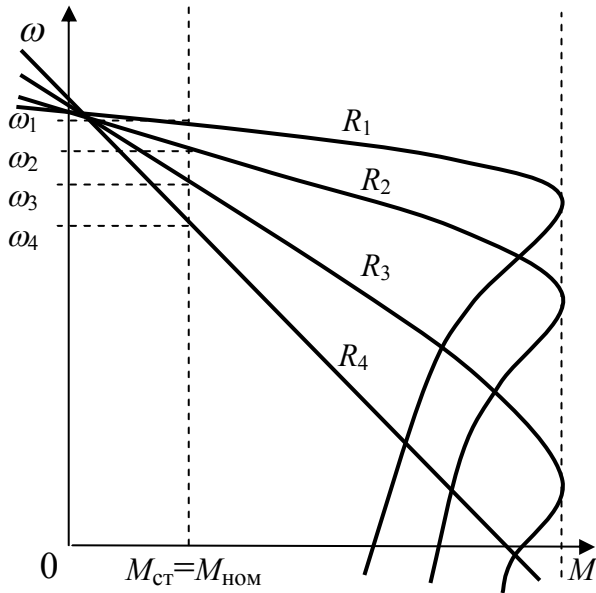


Рис. 15.9 – Механічні реостатні характеристики АД

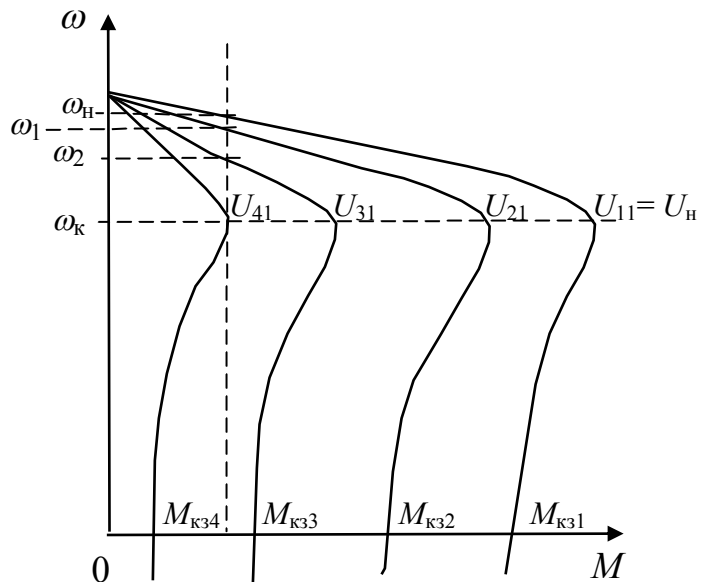


Рис.15.10 - Механічні характеристики АД при зміні напруги на статорі

В роторному колі проходять великі струми, для яких складно створити резистори з безступеневою зміною опору. Тому конструктивно резистори, що забезпечують реостатне регулювання, виконують *східчастими*, отже і частоту обертання регулюють східчасто. Цей спосіб має ті ж недоліки і позитивні якості, що й для двигунів постійного струму.

Діапазон регулювання непостійний і залежить від навантаження. *Жорсткість характеристик значно знижується в міру зменшення частоти обертання*, що обмежує діапазон регулювання до $D = (2 \div 3) : 1$.

Істотними недоліками цього способу є значні втрати енергії, які пропорційні ковзанню: $\Delta P_2 = P_1 \cdot s$. Таке регулювання можливе тільки для АД з фазним ротором.

15.3.2. Регулювання АД зміною напруги на статорі двигуна. Критичний момент M_k змінюється прямо пропорційно квадрату напруги U_1 , що підводять до двигуна, а s_k від нього не залежить. Це визначає вигляд механічних характеристик, що відповідають різним значенням U_1 (рис. 15.10).

Як правило, регулювання здійснюють зменшенням напруги. При цьому, як видно з рис. 15.10 ($U_{11} > U_{21} > U_{31} > U_{41}$), частота обертання (критичне ковзання) залишається постійною, а максимальний момент знижується пропорційно квадрату напруги.

Якщо $M_{ст} > M_{к.з}$, двигун не рушить з місця, тому необхідно запускати двигун при номінальній напрузі живлення або попередньо знімати з його вала навантаження. Діапазон регулювання невеликий (до ω_k).

Для збільшення діапазону регулювання до кола ротора вводять нерегульований резистор, опір якого є достатнім, щоб одержати критичне ковзання $s_k = 3 \div 4$. Таке регулювання (рис. 15.11) на відміну від реостатного дозволяє забезпечити плавну зміну частоти обертання й виключити контактну апаратуру в роторному колі.

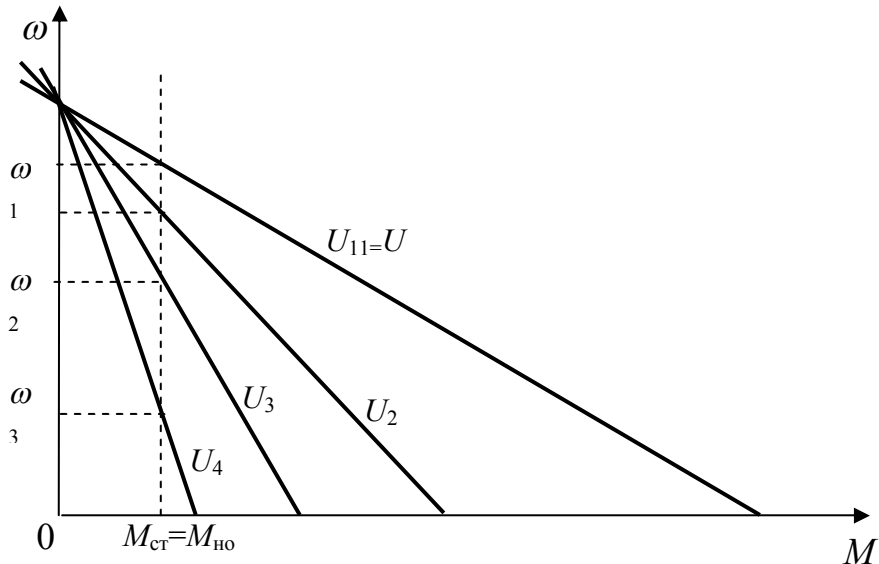


Рис. 15.11 - Механічні характеристики АД при зміні напруги на статорі й включенні активного опору до кола ротора

Для зміни напруги при регулюванні використовують автотрансформатори, напівпровідникові підсилувачі, тиристорні регулятори напруги.

15.3.3. Регулювання асинхронного двигуна спільною зміною частоти і напруги (частотне регулювання). Найбільший практичний інтерес представляє частотний спосіб плавного регулювання частоти обертання. Для найкращого використання АД при частотному регулюванні необхідно, щоб із зміною частоти змінювалася напруга, що подається на статорні обмотки. Закон зміни напруги залежить від зміни частоти живлення і характеру навантаження.

Так, якщо статичний момент опору навантаження $M_{ст}$ не залежить від частоти обертання, тобто $M_{ст}(\omega) = \text{const}$, необхідно при регулюванні зміною частоти f_1 так змінювати напругу U_1 , щоб

$$U_1 / f_1 = \text{const}. \quad (15.14)$$

Якщо ж статичний момент опору зворотно пропорційний частоті обертання, так що потужність навантаження $P_{ст} = M_{ст} \cdot \omega$ залишається постійною, то співвідношення U_1 і f_1 повинне мати такий вигляд:

$$U_1 / \sqrt{f_1} = \text{const} .$$

На рис. 15.12 приведені сімейство механічних характеристик при зміні частоти напруги відповідно до виразу (15.12). Із зменшенням частоти ($f_{11} > f_{21} > f_{31}$) критична частота обертання зменшується, при цьому в області високих і середніх частот критичний момент залишається незмінним, а в області малих частот трохи зменшується.

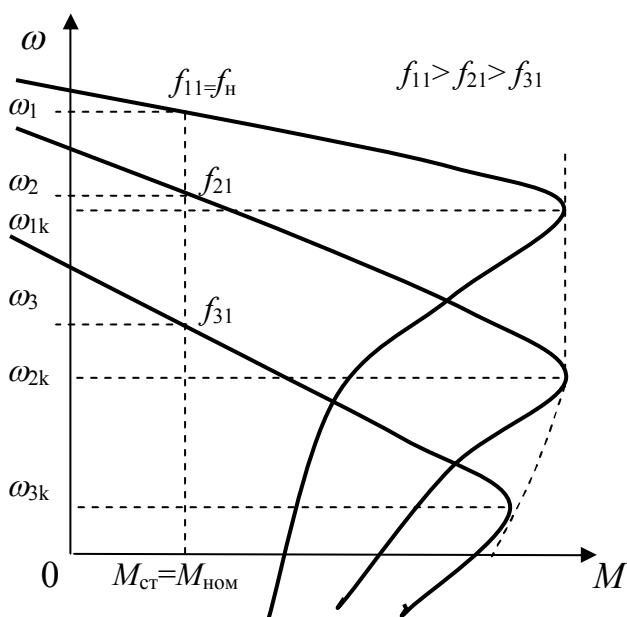


Рис. 15.12 - Механічні характеристики АД при зміні частоти напруги на статорі

Частотний спосіб дозволяє встановлювати частоту обертання вище й нижче номінальної. Допускається збільшення частоти обертання в 1,5 - 2 рази більш за номінальну, а зменшення в 10 - 15 разів менш за номінальну. Нижня межа обмежена тим, що технічно складно одержати джерела живлення з низькою частотою, а також домогтися досить рівномірного обертання вала двигуна. Таким чином, частотне регулювання дозволяє змінювати частоту обертання в діапазоні до $D = (20 \div 30) : 1$. Нижня межа частоти обертання може бути зменшеною

уведенням зворотних зв'язків за частотою обертання, струмом і напругою.

Частотне керування є одним з ефективних за техніко-економічними показниками способів керування АД. Робоча частина механічної характеристики має високу жорсткість при будь-якій частоті живлення f_1 . *Втрати потужності невеликі*, тому що двигун завжди працює при малих ковзаннях; плавність регулювання може бути практично будь-якою. Керування можна здійснювати, використовуючи найбільш простий двигун з короткозамкненим ротором.

15.3.4. Регулювання асинхронного двигуна перемиканням числа пар полюсів. З виразу

$$\omega_0 = 2\pi f_1 / p \quad (15.15)$$

видно, що при зміні числа пар полюсів p виходять механічні характеристики з різною частотою обертання ідеального холостого ходу ω_0 . Оскільки значення p визначається цілими числами, то перехід від однієї характеристики до іншої в процесі регулювання носить східчастий характер. Існує *два способи регулювання швидкості зміною числа пар полюсів*.

Перший спосіб. У пази статора укладаються дві обмотки з різним числом полюсів. Залежно від необхідної частоти обертання до джерела живлення підключається та або інша обмотка.

Другий спосіб. Обмотку кожної фази складають з двох частин, які в процесі регулювання з'єднують послідовно або паралельно. При цьому число пар полюсів змінюється в 2 рази.

Промисловість випускає спеціальні багатошвидкісні двигуни, у конструкції яких передбачено можливість зміни числа пар полюсів.

Основним недоліком регулювання зміною числа пар полюсів є *східчастий характер* зміни частоти обертання. В той же час регулювання є економічним,

має високу стабільність частоти обертання і використовується в основному для асинхронного короткозамкненого двигуна. У гнучких автоматизованих виробництвах воно застосовується для ряду металорізальних верстатів, що дозволяє зменшити кількість механічних передач у коробках швидкостей.

15.3.5. Тиристорне регулювання асинхронних двигунів. Широке впровадження напівпровідникових приборів в системи керування і регулювання частоти обертання електроприводів обумовлено тим, що вони мають малі втрати енергії, високий коефіцієнт посилення по струму и потужності, малі габарити і значний термін експлуатації, високу надійність, практично безінерційні.

Найбільше розповсюдження отримали тиристорні схеми, які дозволяють змінювати напругу на асинхронному двигуні. Величина напруги при цьому регулюється шляхом зміни кута керування тиристорами α .

Для довгочасної роботи на швидкостях, менших номінальної, застосовують тиристорні схеми регулювання напруги, які забезпечують симетричне регулювання у всіх фазах як позитивної так і негативної напівхвиль змінної напруги. На рис.15.13 показано схему тиристорного регулятора напруги, яка дозволяє плавно і в широкому діапазоні змінювати напругу U_ϕ на фазах статора АД і отримувати різні механічні характеристики, тобто регулювати обертовий момент двигуна. Силова частина схеми складається з тиристорів, які включені зустрічно-паралельно до кожної фази напруги статора АД.

Щоб мати широкий діапазон зміни швидкості в схемі застосовано регулювання з негативним зворотним зв'язком за швидкістю. Для цього напруга з тагогенератора $U_{тг}$, пропорційна швидкості обертання вала АД, подається на блок порівняння БП, де вона порівнюється з задаючою напругою U_z , яка установлює потрібну швидкість. Якщо є розходження між заданою і фактичною швидкостями блок порівняння видає сигнал потрібного знаку, який після підсилення підсилювачем П подається на вхід блоку управління тиристорами БУ. Останній змінює кут керування тиристорами α , забезпечуючи величину напруги на статорі АД яка відповідає потрібній швидкості обертання. При зміні моменту опору на валу АД його швидкість змінюється за кривими, що аналогічні кривим 4 і 5 на рис. 15.6,б, нахил яких задається коефіцієнтом підсилення системи авторегулювання швидкості.

Тиристорне регулювання швидкості застосовують для двигунів з короткозамкненим і фазним ротором. Позитивною якістю тиристорного регулювання є відносно невеликі втрати в двигуні і задовільний його нагрів.

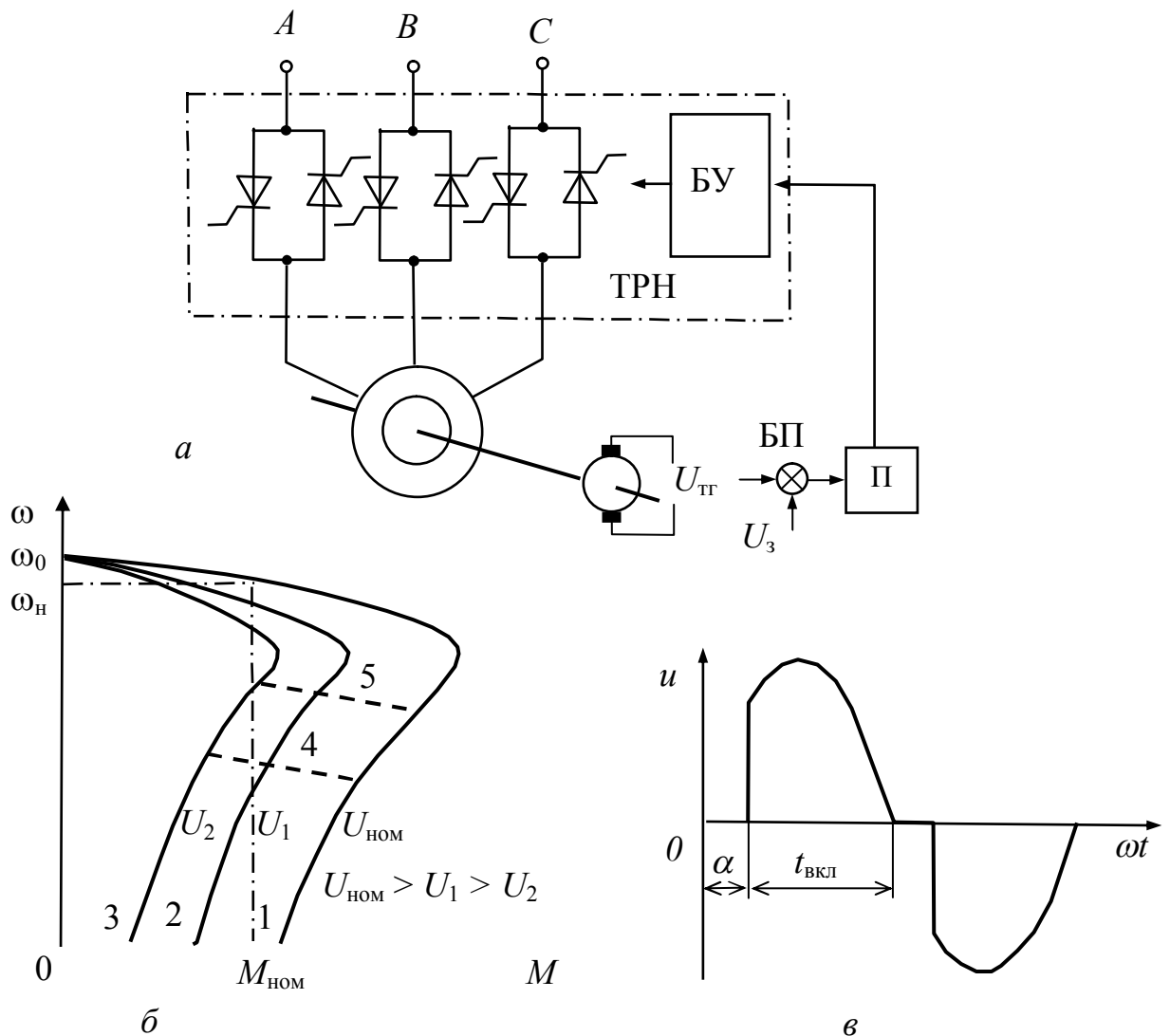


Рис.15.13 – Схема тиристорного регулювання АД (а), фазна напруга на статорі (в) і механічні характеристики (б): 1 – природна характеристика; 2 і 3 – характеристики розімкненої системи; 4 і 5 - характеристики замкнутої системи.

15.4. Регульований привод змінного струму з вентиляним двигуном

Вентильним двигуном (ВД) називається пристрій, що складається з електродвигуна змінного струму, який за конструкцією аналогічний синхронному, і вентиляного комутатора (перетворювача частоти), керованого у функції положення ротора або магнітного потоку двигуна. На його статорі звичайно розташовується трифазна обмотка змінного струму, а ротор є збудником. Збудження може бути виконане або від обмотки збудження, розташованої на роторі, яка отримує живлення через кільця і щітки від джерела постійного струму, або за допомогою постійних магнітів, розташованих у пазах ротора.

Істотною ознакою ВД є наявність вентиляного комутатора, який функціонально заміняє щітки і колектор машини постійного струму. Вентильний комутатор приєднується до виводів статора і виконує функції розподільника по-

стісного струму з перетворенням його на змінний. Вентильні двигуни розрізняються за типом перетворювача частоти, конструктивним виконанням машини і будовою системи керування. Вони мають наступні загальні ознаки: можливість регулювання кутової швидкості зміною підведеної до статора напруги (в сторону зменшення від номінальної), струму збудження (при наявності обмотки збудження) і кута випередження включення вентилів відносно фазних ЕРС двигуна (в сторону збільшення від номінальної). Характеристики ВД аналогічні характеристикам двигуна постійного струму.

На рис. 15.14 показано принципову схему ВД з природною комутацією інвертора струму. Схема містить керований випрямляч КВ, згладжуючий реактор L , інвертор струму І, тиристорний збудник ТЗ двигуна М, систему керування випрямлячем СКВ, систему керування інвертором СКІ.

Інвертор з природною комутацією є перетворювачем постійного струму на змінний, що віддає енергію навантаженню, яке вже має джерело ЕРС тієї ж частоти, що й вихідна напруга перетворювача. При цьому завдяки дії цієї ЕРС здійснюється комутація вентилів. Така комутація і називається природною.

Кутове положення ротора ВД контролюється побічно - керування вентилями інвертора здійснюється у функції фази напруги на виводах обмотки статора двигуна $U(\varphi)$.

При природній комутації відмикаючі імпульси на вентилі інвертора подаються з випередженням на кут β відносно ЕРС двигуна. Мінімальний кут випередження β дорівнює:

$$\beta_{\min} = \gamma + \delta, \quad (15.16)$$

де γ - кут комутації струму, який залежить від параметрів перетворювача і двигуна та від випрямленого струму I_d ; δ - кут вимикання, обумовлений часом відновлення замикаючих властивостей тиристора.

У розглянутій схемі інвертор звичайно працює з деяким постійним кутом β , обраним за умовою надійної комутації найбільшого пускового струму або струму навантаження.

Регулювання кутової швидкості ВД у цьому випадку здійснюється змінною випрямленою напругою за допомогою КВ або струму збудження за допомогою ТЗ.

Природна комутація вентилів, що дозволяє використовувати простий надійний інвертор, може бути здійснена при порівняно великій ЕРС синхронного двигуна, тобто при кутовій швидкості його не нижче за 10% номінальної. Тому для пуску двигуна в схемі з природною комутацією застосовують наступні способи: імпульсний метод, що використовує спеціальну систему керування випрямлячем; переключення інвертора на режим штучної комутації; асинхронний пуск синхронного двигуна, що має пускову обмотку, від мережі (включений S1, рис. 15.14) з наступним перемиканням його на інвертор (S1 відключається, S2 включається).

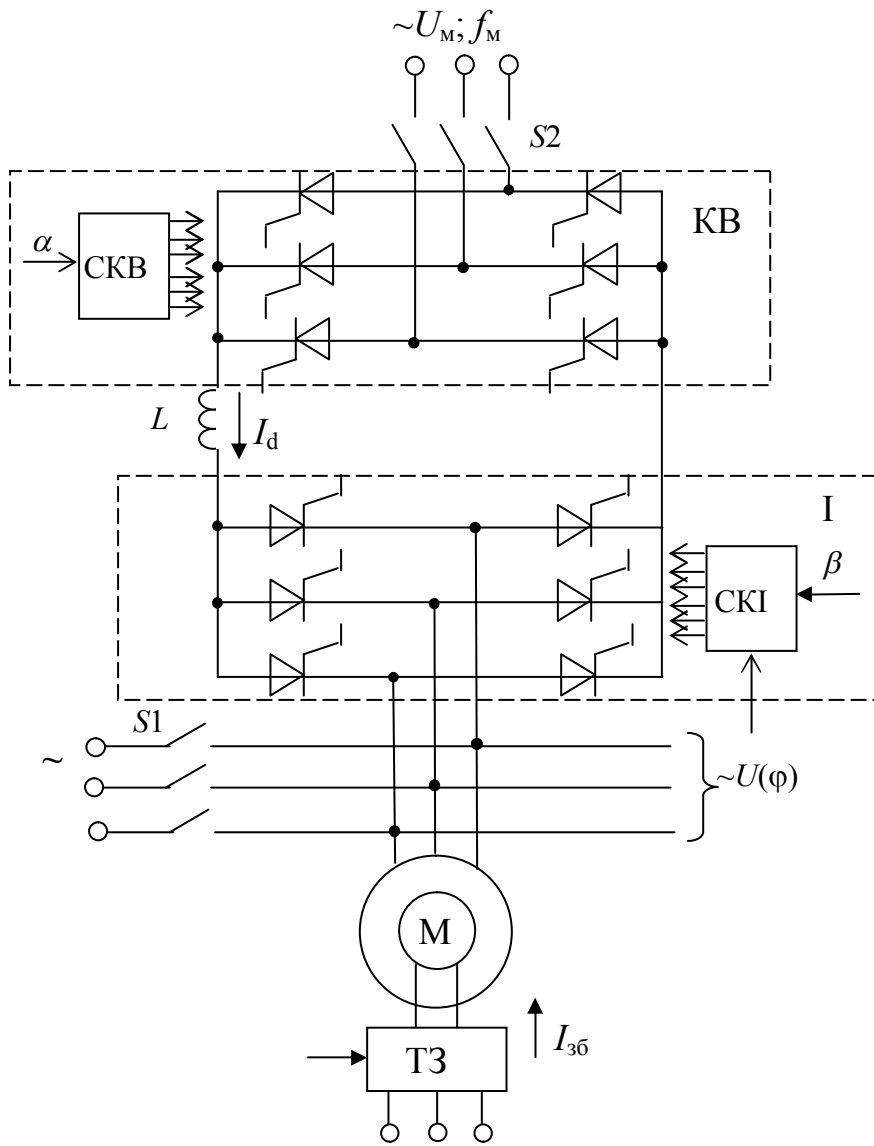


Рис. 15.14 - Принципова схема вентильного двигуна з природною комутацією інвертора струму

У першому випадку запирання вентилів інвертора досягається зниженням до нуля його вхідного струму шляхом короточасного запирання випрямляча або переведення його до інверторного режиму. Переривання випрямленого струму приводить до зменшення пускового моменту приблизно на 15-20% у порівнянні з пусковим моментом при живленні двигуна синусоїдальним струмом. У другому випадку значно ускладнюється система керування ВД. При асинхронному пуску ускладнюється конструкція ВД.

Таким чином, порівняно простий спосіб природної комутації не може бути реалізований при пуску ВД, коли його ЕРС відсутня або дуже мала.

Застосовують також інвертори з штучною комутацією. Інвертор з штучною комутацією - це перетворювач постійної напруги або струму на змінні з примусовою (звичайно конденсаторною) комутацією струму у вентиліях.

Схема ВД з штучною комутацією переважніше, тому що фаза струму відносно ЕРС двигуна може бути встановлена будь-якою і ВД може працювати не

тільки з випереджуючим струмом, але й з відстаючим. Регулювання кутової швидкості двигуна в цій схемі можливо всіма трьома способами: зміною випрямленої напруги, струму збудження і кута β .

Оскільки ВД має характеристики машини постійного струму незалежного збудження, усі способи регулювання його кутової швидкості характеризуються такими ж показниками, що й відповідні способи (зміною напруги на якорі і струму збудження) регулювання кутової швидкості двигуна постійного струму незалежного збудження.

Сучасні ВД із збудженням від високоенергетичних постійних магнітів у наш час залишаються найбільш перспективними з усіх типів електродвигунів, застосовуваних в сучасних регульованих електроприводах малої і середньої потужності. Це пояснюється цілим рядом конструктивних і техніко-експлуатаційних переваг ВД у порівнянні з існуючими типами електричних машин. До них можна віднести безконтактність і відсутність вузлів, що вимагають обслуговування, більшу перевантажувальну здатність за моментом (кратність максимального моменту дорівнює 5 і більше), високу швидкодію, найвищі енергетичні показники (ККД і $\cos\phi$). Відсутність у ВД ковзних електричних контактів істотно підвищує їхній ресурс і надійність порівняно з двигунами постійного струму або асинхронними. Показники ККД ВД перевищують 90% і дуже мало змінюються при зміні навантаження двигуна за потужністю і при коливаннях напруги живильної мережі. ВД мають практично необмежений діапазон регулювання частоти обертання (1:10000 і більше), більш просту схему перетворювача в порівнянні з асинхронним частотно-регульованим електроприводом, мінімальні масогабаритні показники за інших рівних умов, значний термін служби.

Контрольні запитання з теми 15

1. Що розуміють під регулюванням швидкості електропривода?
2. Охарактеризуйте основні показники регулювання кутової швидкості електроприводів.
3. Які методи використовують для регулювання кутової швидкості двигуна постійного струму з незалежним збудженням?
4. В якому напрямку здійснюють регулювання швидкості двигуна постійного струму з незалежним збудженням шляхом зміни струму збудження? Поясніть, чому.
5. В якому діапазоні регулюється швидкість двигуна постійного струму з незалежним збудженням при зміні струму збудження? Чим він обмежується?
6. В якому напрямку здійснюють регулювання швидкості двигуна постійного струму з незалежним збудженням шляхом реостатного регулювання? Поясніть, чому.
7. В яке коло включають додатковий опір при регулюванні швидкості потоком збудження і при реостатному регулюванні?
8. Як визначають скважність керуючих імпульсів ε ? На що вона впливає?

9. Який вигляд мають регулювальні характеристики двигуна постійного струму з незалежним збудженням при зміні напруги на якорі?
10. Чим обмежується діапазон регулювання швидкості двигуна постійного струму з незалежним збудженням при зміні напруги на якорі?
11. Які методи використовують для регулювання кутової швидкості асинхронного двигуна?
12. Чим обмежується діапазон регулювання швидкості асинхронного двигуна при реостатному регулюванні?
13. Чим обмежується плавність регулювання швидкості асинхронного двигуна при реостатному регулюванні?
14. Охарактеризуйте особливості регулювання швидкості асинхронного двигуна зміною напруги на статорі.
15. З якою метою при регулюванні швидкості асинхронного двигуна зміною напруги на статорі до кола ротора вводять постійний резистор?
16. Перелічіть переваги частотного регулювання швидкості асинхронного двигуна.
17. Поясніть роботу схеми тиристорного регулювання АД для випадку розімкненої системи регулювання?
18. Поясніть роботу схеми тиристорного регулювання АД для випадку замкненої системи регулювання?
19. Поясніть особливості будови вентильного двигуна.
20. Перелічіть переваги вентильного двигуна у порівнянні з асинхронними двигунами та двигунами постійного струму з незалежним збудженням.

РОЗДІЛ 8

ЕЛЕКТРООБЛАДНАННЯ БУДІВЕЛЬНИХ МАЙДАНЧИКІВ, ПІДПРИЄМСТВ І БУДІВЕЛЬ

ТЕМА 16

ЕЛЕКТРООБЛАДНАННЯ ЗВАРЮВАЛЬНИХ УСТАНОВОК

Ключові поняття: зварювання, електродугове зварювання, автоматичне зварювання, зварювальний генератор, зварювальний апарат, контактне зварювання.

16.1. Види електричного зварювання

Зварюванням називається процес одержання нероз'ємного з'єднання матеріалів шляхом місцевого нагрівання країв деталей, що зварюються, до пластичного або розплавленого стану.

Електричне зварювання набуло широкого застосування у будівництві, тому що зварені шви мають високу якість і велику міцність. Міцність звареного з'єднання забезпечується атомними або молекулярними зв'язками. Важливе значення має при цьому взаємна дифузія атомів матеріалів, що зварюються.

В електрозварюванні використовується явище електричної дуги, що являє собою електричний розряд, який супроводжується високою температурою і значною щільністю струму, який може досягати декількох тисяч амперів на 1 см^2 , падіння напруги на дузі є незначним (10 - 20 В).

Сучасна зварювальна техніка має у своєму розпорядженні багато способів зварювання. Найбільш поширеними є *два способи електричного зварювання: дуговий і контактний.*

Електродугове зварювання, при якому розплавлювання металу країв деталей, що зварюються, і електрода (або присадочного металу) здійснюється за рахунок тепла, яке виділяється електричною дугою, виконується вручну, напів-автоматично або автоматично.

Ручне дугове зварювання може здійснюватися двома способами: способом Бенардоса і способом Славянова.

Зварювання за способом російського винахідника М.М.Бенардоса (рис.16.1) здійснюють в такий спосіб. Позитивний полюс джерела постійного струму приєднується до деталей, що зварюються, а негативний - до електрода, що не плавиться *E*. Між електродом *E* (вугільним, графітовим або вольфрамовим) і виробом збуджують електричну дугу. Краї виробу і присадочний матеріал, що вводиться до зони дуги *M*, нагрівають до плавлення і одержують ванночку розплавленого металу. Після затвердіння ванночки утворюється зварний шов. Даний спосіб використовують, як правило, при зварюванні кольорових металів або їхніх сплавів, а також при наплавленні твердих сплавів.

Зварювання за способом Н.Г.Славянова (рис.16.2) виконують за допомогою електрода, що плавиться. Електрична дуга збуджується між металевим електродом і кромками виробу, що зварюються. Утворюється загальна ванна розплавленого металу, яка, охолоджуючись, утворює зварний шов.

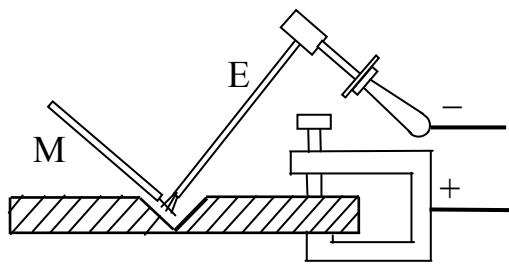


Рис.16.1 - Електрозварювання за способом Бенардоса

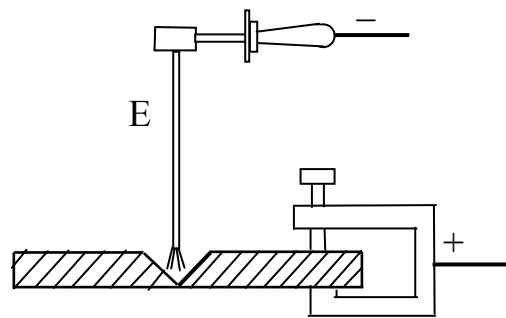


Рис.16.2 - Електрозварювання за способом Славянова

За способом Славянова, що отримав найбільше поширення, можливе застосування і змінного струму за умови покриття стрижньового електрода спеціальною обмазкою. В обмазках електродів і в складі флюсів, якими покривають місце зварювання, утримується значна кількість елементів, що мають низьку температуру іонізації і підвищують стійкість електричної дуги.

Автоматичне і напівавтоматичне зварювання під флюсом здійснюється шляхом механізації основних рухів, виконуваних зварником, - подачі електрода уздовж його осі до зони дуги і переміщення його уздовж шва.

При напівавтоматичному зварюванні подача електрода уздовж його осі до зони дуги є механізованою, а переміщення електрода уздовж шва робить зварник вручну. При автоматичному зварюванні механізовані всі операції процесу зварювання.

Розплавлений метал захищений від впливу кисню й азоту повітря спеціальним гранульованим флюсом. Висока продуктивність і гарна якість швів забезпечили широке застосування автоматичного і напівавтоматичного зварювання під флюсом.

Електричне контактне зварювання здійснюється за допомогою тепла, яке виділяється струмом при проходженні через кромки деталей, що зварюються. При цьому в місці з'єднання країв зварюваних деталей виділяється найбільша кількість тепла, яка розігріває їх до зварювального стану.

16.2. Основні вимоги до джерел живлення зварювальної дуги

Електродугове зварювання починається з короткого замикання зварювального кола - контакту між електродом і деталлю. При цьому відбувається виділення теплоти і швидке розігрівання місця контакту. Ця початкова стадія вимагає підвищеної напруги зварювального струму.

В процесі зварювання при переході крапель електродного металу у зварювальну ванну відбуваються дуже часті короткі замикання зварювального кола. Разом з цим змінюється довжина зварювальної дуги. При кожному короткому замиканні напруга падає до нульового значення. Для наступного відновлення дуги необхідна напруга порядку 25-30 В. Така напруга повинна бути забезпеченою за час, що не перебільшує 0,05 с, щоб підтримати горіння дуги в період між короткими замиканнями.

При коротких замиканнях зварювального кола розвиваються великі струми (струми короткого замикання), які можуть викликати перегрів у проводці й обмотках джерела струму. Ці умови процесу зварювання в основному і визначають вимоги до джерел живлення зварювальної дуги:

1. Напруга холостого ходу повинна бути достатньою для легкого збудження дуги і у той же час не повинна перевищувати норми техніки безпеки. Для однопостових зварювальних генераторів напруга холостого ходу не повинна бути більша за 80 В, а для багатопостових - не більша за 60 В. Для зварювальних трансформаторів встановлена найбільша допустима напруга 70 В при зварювальній силі струму, що перевищує 200 А і 100 В при зварювальній силі струму меншій 100 А.

2. Напруга горіння дуги (робоча напруга) повинна швидко встановлюватися і змінюватися залежно від довжини дуги, забезпечуючи стійке горіння зварювальної дуги. Із збільшенням довжини дуги напруга повинна швидко зростати, а із зменшенням - швидко падати. Час відновлення робочої напруги від 0 до 30 В після кожного короткого замикання (при краплинному переносі металу від електрода до деталі, що зварюється) повинний бути меншим за 0,05 с.

3. Значення сили струму короткого замикання не повинне перевищувати зварювальне значення сили струму більш ніж на 40...50%. При цьому джерело струму повинне витримувати тривалі короткі замикання зварювального кола. Виконання цієї умови необхідне для запобігання перегріву і пошкодження обмоток джерела струму.

4. Потужність джерела струму повинна бути достатньою для виконання зварювальних робіт.

Крім того, необхідні пристрої, що дозволяють регулювати значення зварювальної сили струму в необхідних межах. Зварювальне встаткування повинне відповідати вимогам державних стандартів.

16.3. Зварювальні перетворювачі постійного струму

Зварювальні перетворювачі постійного струму підрозділяють на наступні групи:

За кількістю постів, що живляться - однопостові, призначені для живлення однієї зварювальної дуги; багатопостові, що живлять одночасно кілька зварювальних дуг.

За способом установки - стаціонарні, встановлювані нерухомо на фундаментах; пересувні, що монтуються на візках.

За родом двигунів, що приводять генератор до обертання, - машини з електричним приводом; машини з двигуном внутрішнього згоряння (бензиновим або дизельним).

За способом виконання - однокорпусні, в яких генератор і двигун вмонтовані до єдиного корпусу; роздільні, в яких генератор і двигун встановлені на єдиній рамі, а привод здійснюється через спеціальну сполучну муфту.

Найбільше поширення в будівництві одержали однопостові генератори з розщепленими полюсами, що працюють за принципом використання магнітного потоку якоря для одержання падаючої зовнішньої характеристики.

На рис. 16.3 показано схему зварювального генератора такого типу. Генератор має чотири основних і два додаткових полюси. При цьому однойменні основні полюси розташовані поруч, становлячи як би один роздвоєний полюс. Обмотки збудження мають дві секції: нерегульовану 2 і регульовану 1. Нерегульована обмотка розташована на всіх чотирьох основних полюсах, а регульована розміщена тільки на поперечних полюсах генератора. У коло регульованої обмотки збудження включений реостат 3. На додаткових полюсах розташована серієсна обмотка 4. По нейтральній лінії симетрії між різнойменними полюсами на колекторі генератора розташовані основні щітки a й b , до яких підключається зварювальне коло. Додаткова щітка c служить для живлення обмоток збудження. Грубе регулювання здійснюється зсувом щіткової траверси, на якій розташовані всі три щітки генератора. Якщо зрушувати щітки за напрямком обертання якоря, то розмагнічуюча дія потоку якоря збільшується й величина зварювальної сили струму зменшується. При зворотному зрушенні розмагнічуюча дія зменшується й зварювальна сила струму збільшується. Більш плавне й точне регулювання сили струму здійснюють реостатом, включеним у коло обмотки збудження. Збільшуючи або зменшуючи реостатом силу струму збудження в обмотці поперечних полюсів, змінюють магнітний потік $\Phi_{\text{д}}$, тим самим змінюють напругу струму генератора і величину зварювального струму.

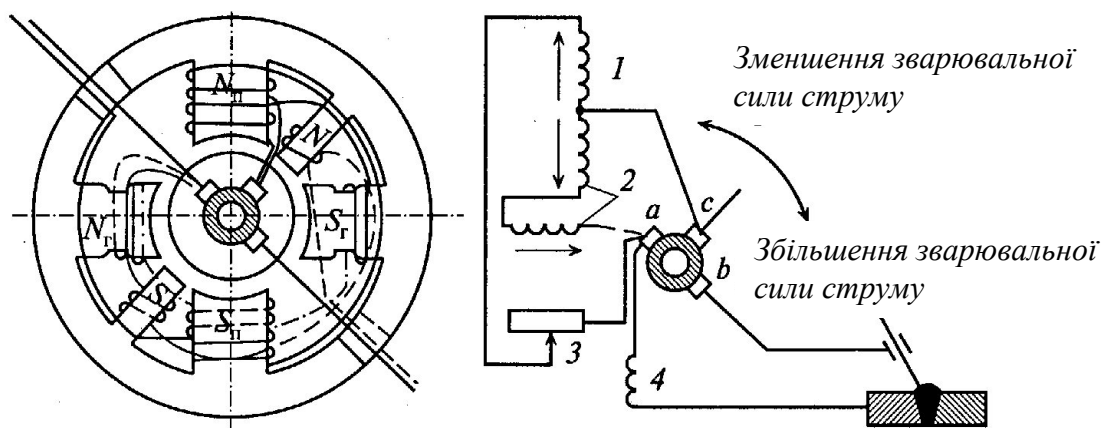


Рис. 16.3 - Схема генератора з розщепленими обмотками:
 1, 2 - відповідно регульована і нерегульована обмотки збудження;
 3 - реостат; 4 - серієсна обмотка; a , b , c — щітки

Окрім генераторів з розмагнічуючою дією реакції якоря застосовують зварювальні генератори, в яких падаюча зовнішня характеристика й обмеження величини сили струму короткого замикання забезпечується розмагнічуючою дією послідовної обмотки збудження, що включена до зварювального кола. Принципова схема такого генератора представлена на рис. 16.4. Генератор має дві обмотки: обмотку збудження 1 і розмагнічуючу обмотку 2. Обмотка збудження живиться або від основної і додаткової щіток, або від спеціального джерела струму з постійною напругою. Тому магнітний потік $\Phi_{\text{зб}}$, створюваний цією обмоткою, постійний і не залежить від навантаження генератора. Розмагнічуюча обмотка включена послідовно з обмоткою якоря так, що при горінні дуги зварювальний струм, проходячи через обмотку, створює магнітний потік $\Phi_{\text{п}}$, спрямований проти потоку $\Phi_{\text{зб}}$.

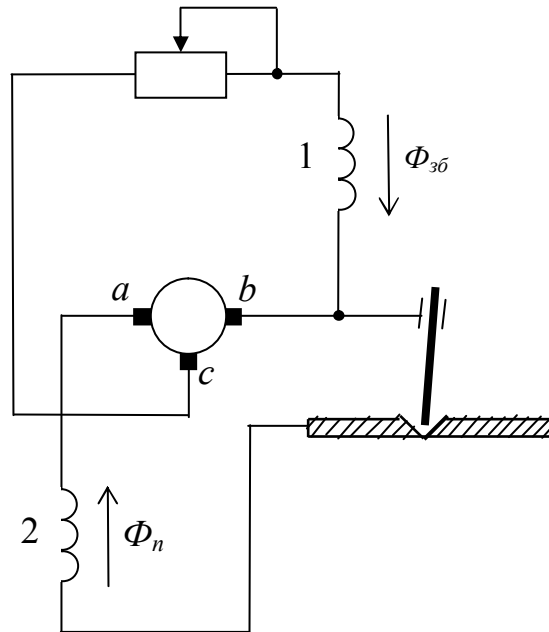


Рис. 16.4 - Зварювальний генератор з розмагнічуючою дією реакції якоря:
 1 – обмотка збудження; 2 – розмагнічуюча обмотка; **a, b, c** — щітки

У зварювальному виробництві також поширені випрямні зварювальні установки. Вони перетворюють змінний струм на постійний за допомогою селенових, германієвих або кремнієвих випрямлячів.

Випрямні установки мають більш високий ККД. Крім того, слід відзначити такі їх важливі переваги, як відсутність обертових частин, малу масу, невеликі габарити і дешевизну. Важливою перевагою є також їхні високі динамічні властивості внаслідок меншої електромагнітної інерції. Сила струму і напруга при зміні режиму роботи зварювального кола змінюються практично миттєво. Використовувана трифазна мостова система випрямлення забезпечує меншу пульсацію випрямленого струму і більш рівномірне навантаження фаз силової мережі змінного струму.

16.4. Зварювальні апарати змінного струму

Зварювальні апарати змінного струму, що застосовують на підприємствах і на будівельно-монтажних майданчиках підрозділяють на чотири основні групи:

- з окремим дроселем;
- з вбудованим дроселем;
- з рухомим магнітним шунтом;
- із збільшеним магнітним розсіюванням і рухомою обмоткою.

Ці групи відрізняються за конструкцією й електричною схемою. Зварювальні апарати складаються з понижувального трансформатора і спеціального пристрою. Трансформатор забезпечує живлення дуги змінним струмом напругою 60-70 В, а спеціальний пристрій служить для створення падаючої зовнішньої характеристики і регулювання величини зварювального струму.

Зварювальні апарати з окремим дроселем (рис. 16.5) складаються з понижувального трансформатора і дроселя. Трансформатор Т має осердя (магнітопровід) 2 із штампованих пластин, виготовлених з тонкої трансформаторної

сталі товщиною 0,5 мм. На осерді розташовані первинна 1 і вторинна 3 обмотки. Первинна обмотка з ізолюваного проводу підключається до мережі змінного струму напругою 220 або 380 В. У вторинній обмотці, виготовленій з мідної шини, індукується струм напругою 60-70 В. Невелике магнітне розсіювання і малий омичний опір обмоток забезпечують незначне внутрішнє падіння напруги і високий ККД трансформатора.

Послідовно вторинній обмотці у зварювальне коло включено обмотку 4 дроселя Др (регулятора струму). Осердя (магнітопровід) дроселя набране з пластин тонкої трансформаторної сталі і складається з двох частин: нерухомої 5, на якій розташована обмотка дроселя, і рухомої 6, яка переміщується за допомогою гвинтового пристосування 7.

Дросель призначений для регулювання сили зварювального струму і створення падаючої зовнішньої характеристики трансформатора на дузі. При збудженні дуги (при короткому замиканні) великий струм, проходячи через обмотку дроселя, створює потужний магнітний потік, що наводить ЕРС дроселя, спрямовану проти напруги трансформатора. Вторинна напруга, що розвивається трансформатором, повністю поглинається падінням напруги в дроселі. Напруга у зварювальному колі досягає майже нульового значення.

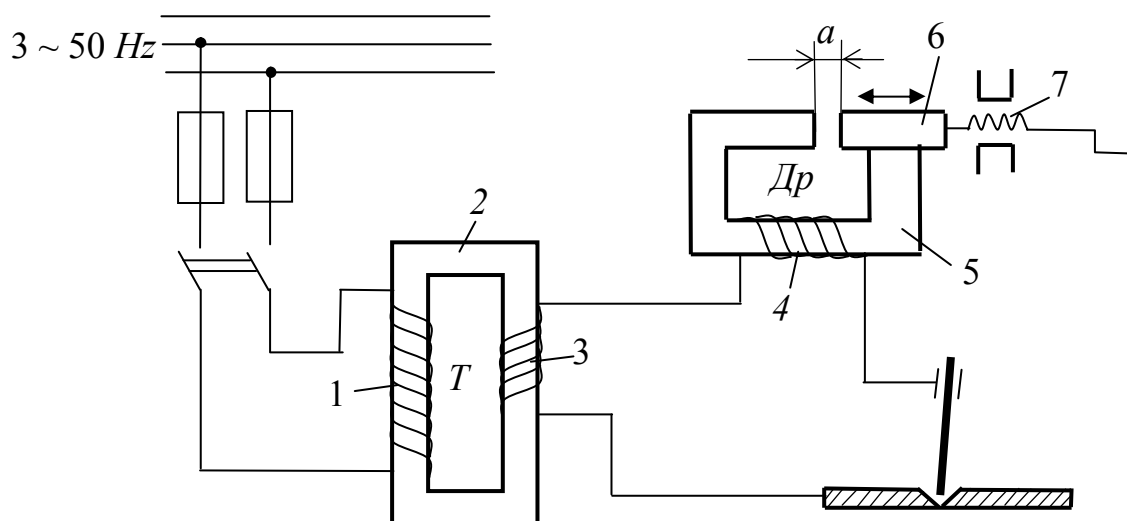


Рис. 16.5 - Схема зварювального трансформатора з окремим дроселем:
1, 3 — відповідно первинна й вторинна обмотки; **2** - осердя;
4 - обмотка дроселя; **5, 6** - відповідно нерухома й рухома частини осердя;
7 - гвинтове пристосування; **a** - зазор

При виникненні дуги сила зварювального струму зменшується. Слідом за цим зменшується ЕРС самоіндукції дроселя, спрямована проти напруги трансформатора, і у зварювальному колі встановлюється робоча напруга, необхідна для стійкого горіння дуги, менша за напругу холостого ходу. Змінюючи величину зазору a між нерухомим і рухомим магнітопроводом дроселя, змінюють індуктивний опір дроселя і тим самим силу струму у зварювальному колі. При збільшенні зазору магнітний опір магнітопроводу дроселя збільшується, магнітний потік слабшає, зменшується ЕРС самоіндукції котушки і її індуктивний

опір. Це приводить до зростання зварювальної сили струму. При зменшенні зазору сила зварювального струму зменшується.

За цією схемою виготовлені й експлуатуються зварювальні трансформатори типу СТЕ-24У, СТЕ-34У [2.23]. Такі трансформатори широко застосовують на будівельно-монтажних майданчиках, на заводах і при зварюванні магістральних трубопроводів.

Зварювальні апарати з вбудованим дроселем (рис. 16.6). Магнітопровід трансформатора складається з основного осердя 1, на якому розташовані первинна 2 й вторинна 6 обмотки трансформатора, і додаткового осердя 4 з обмоткою дроселя 5 (регулятор струму). Додатковий магнітопровід розташований над основним і складається з нерухомої і рухомої частин, між якими за допомогою гвинтового механізму 3 встановлюється необхідний повітряний зазор a .

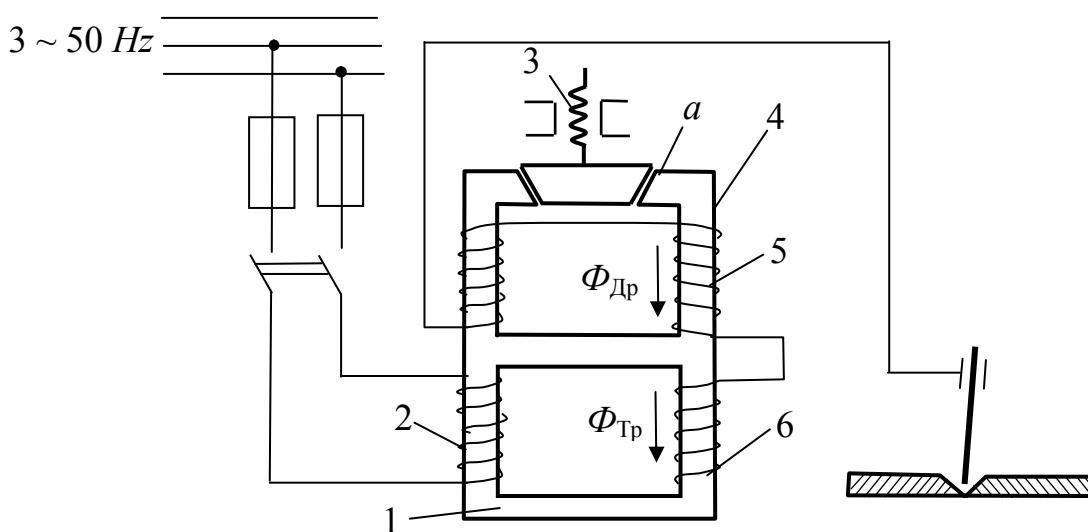


Рис. 16.6 - Схема зварювального трансформатора з вбудованим дроселем:

1 - осердя; 2, 6 - обмотки трансформатора відповідно первинна і вторинна; 3 - гвинтовий механізм; 4 - додаткове осердя; 5 - обмотка дроселя; a - зазор

Регулювання сили зварювального струму здійснюється зміною повітряного зазору a : чим більший зазор a , тим більша сила зварювального струму.

За цією схемою випускаються зварювальні трансформатори типу СТН-500, ТСД-500 та ін. [2.23].

Зварювальні апарати з рухомих магнітним шунтом (рис. 16.7) мають цільний замкнутий магнітопровід, у якому на одному стрижні розташовані первинна 4 і вторинна 3 обмотки, а на іншому — реактивна обмотка 1. Між ними знаходиться пересувний магнітний шунт — стрижень 2. Шунт замикає магнітні потоки первинної і реактивної обмоток, утворюючи магнітні потоки розсіювання, які мають значний індуктивний опір. В такий спосіб забезпечується падаюча зовнішня характеристика трансформатора.

Регулювання сили зварювального струму здійснюється переміщенням магнітного шунта уздовж напрямку магнітного потоку. При висуванні шунта розсіювання магнітних потоків первинної і реактивної обмоток зменшується, внаслідок чого зменшується індуктивний опір трансформатора. При цьому значен-

ня сили зварювального струму зростає. На такому принципі працюють зварювальні апарати типу СТАН-0, ОСТА-350 та ін. [2.23].

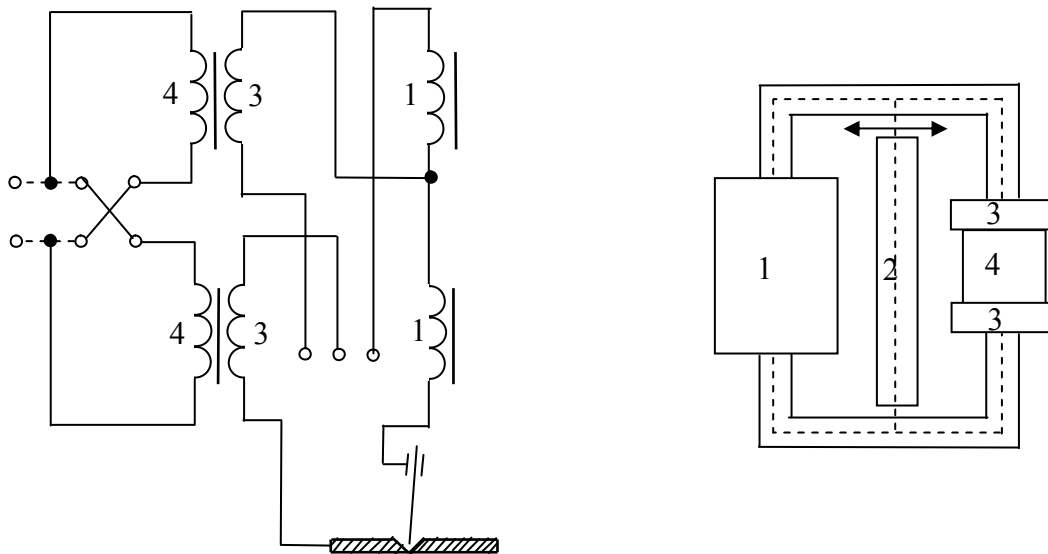


Рис. 16.7 - Схема зварювального апарата з рухомих магнітним шунтом:
1 - реактивна обмотка; 2 - магнітний шунт; 3, 4 - обмотки відповідно вторинна й первинна

Зварювальні апарати із збільшеним магнітним розсіюванням і рухомою обмоткою без дроселя. Трансформатор має магнітопровід у вигляді стрижнів, на яких розташовані по дві котушки: одна з первинною обмоткою, а друга із вторинною обмоткою. Котушки обмоток з'єднані паралельно. Первинна котушка закріплена нерухомо. Котушка вторинної обмотки переміщається гвинтовим механізмом вручну. Регулювання зварювальної сили зварювального струму здійснюється шляхом зміни відстані між котушками первинної й вторинної обмоток трансформатора. Чим менша відстань між котушками обмоток, тим більша сила зварювального струму. За цим принципом випускаються трансформатори типу ТС і ТСК з алюмінієвими обмотками.

Трифазні зварювальні трансформатори застосовують при зварюванні трифазною дугою спареними електродами. Застосування трифазних зварювальних апаратів має велике економічне значення, тому що вони забезпечують високу продуктивність, економію електроенергії (ККД досягає 0,9) і рівномірне завантаження фаз мережі при високому коефіцієнті потужності ($\cos\varphi \leq 0,8$). Однак зварювання трифазним струмом набуло обмеженого застосування через складність зварювального обладнання.

16.5. Установки контактного зварювання

Контактне зварювання, або зварювання під тиском, являє собою спосіб зварювання деталей, при якому концентроване виділення теплоти в зоні стику обумовлене значним перевищенням активного опору в цьому місці над опором самих деталей. Кількість теплоти, що виділяється в місці стику, визначається за відомою формулою

$$Q = 0,24 \cdot I^2 \cdot R_{\text{п}} \cdot t, \quad (16.1)$$

де $R_{\text{п}}$ - перехідний опір у місці стику.

На рис.16.8 показані схеми роботи устаткування контактної зварювання: стикового (рис.16.8,а), точкового (рис.16.8,б) і роликового (рис.16.8,в). Вони знайшли широке застосування у будівництві, зокрема для зварювання арматур і металевих конструкцій.

Найбільша потужність машин промислового виготовлення, призначених для контактної зварювання, досягає 750 кВА. Ці машини дозволяють зварювати заготовки з перерізом до 3500 мм² і деталі товщиною до 32 мм.

Для контактної зварювання можна використовувати як постійний, так і змінний струм. Однак на практиці переважно застосовують змінний струм, оскільки струм у тисячі ампер і напруга в декілька вольт, необхідні при зварюванні, досить просто без значних капітальних витрат можуть бути отримані на змінному струмі за допомогою трансформаторів.

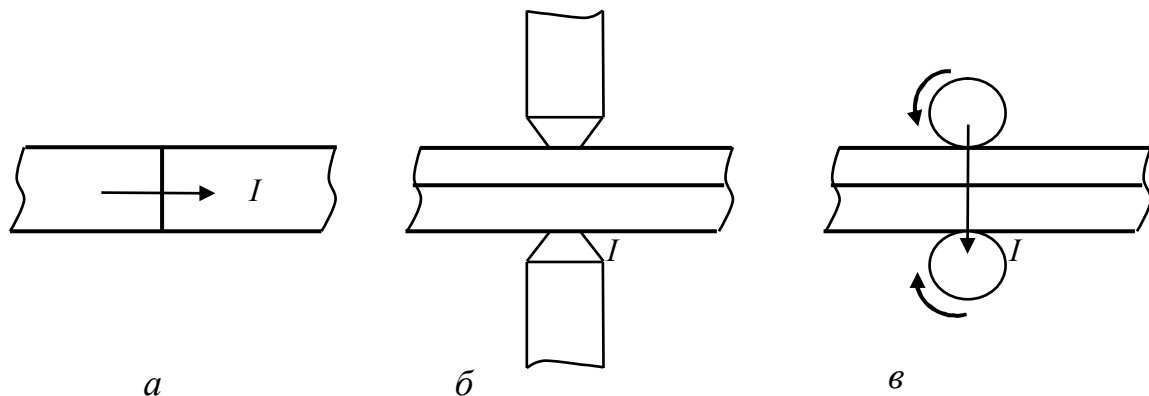


Рис.16.8 - Основні способи контактної зварювання

Подача зварювального струму може бути або безперервною (у деяких випадках при роликовому зварюванні), або переривною.

Значну тривалість струму підтримують реле часу, а включення і вимкнення зварювального струму виконується тиристорами.

Контрольні запитання з теми 16

1. Що розуміють під зварюванням?
2. Чим характеризуються автоматичне і напівавтоматичне зварювання?
3. Сформулюйте основні вимоги до джерел живлення зварювальної дуги.
4. Поясніть конструкцію зварювального генератора постійного струму.
5. Поясніть принцип роботи зварювального трансформатора з окремим дроселем.
6. Як працює зварювальний трансформатор з вбудованим дроселем?
7. Чим характеризуються установки контактної зварювання?

ТЕМА 17

ЕЛЕКТРООБЛАДНАННЯ ВАНТАЖОПІДЙОМНИХ МАШИН

Ключові поняття: вантажопідйомна машина, кранові електродвигуни, апаратура керування, контролер, командоконтролер, контактор, магнітний пускач, реле часу, проміжне реле, реле мінімального струму, реле максимального струму, теплове реле

17.1. Загальні відомості про вантажопідйомні машини

До вантажопідйомних машин (ВПМ), найбільш часто використовуваним у будівництві і на підприємствах будівельної індустрії, відносяться стрілові, баштові, козлові, мостові й інші крани, а також підйомники різного призначення. Електрообладнання цих машин має подібні конструктивні особливості і призначення.

Робота електрообладнання ВПМ характеризується наступними особливостями:

- режим роботи - повторно-короткочасний;
- часті зміни напрямку обертання (реверс);
- необхідність регулювання частоти обертання привода;
- значні перевантаження, вібрація;
- утруднений доступ для обслуговування і ремонту;
- робота в умовах забруднення, вологості, значного перепаду температур.

Для забезпечення наведених умов роботи електрообладнання ВПМ повинне відповідати вимогам підвищеної міцності, високоякісною ізоляцією і надійним захистом від впливу навколишнього середовища. Цим вимогам відповідають машини й апарати спеціального кранового виконання.

Електрообладнання ВПМ за призначенням підрозділяється на **основне** (обладнання електропривода) і **допоміжне** (обладнання робочого і ремонтного освітлення й опалення).

До основного електрообладнання належать:

- електродвигуни;
- апарати керування електродвигунами - контролери, командо-контролери, контактори, магнітні пускачі, реле керування;
- апарати регулювання частоти обертання електродвигунів - пускорегулюючі реостати, гальмові машини;
- апарати керування гальмами - гальмові електромагніти й електрогідравлічні штовхачі;
- апарати електричного захисту - захисні панелі, автоматичні вимикачі, максимальні і теплові реле, запобіжники, розподільні ящики й апарати, що забезпечують максимальний і нульовий захист електродвигунів;
- апарати механічного захисту - кінцеві вимикачі й обмежники вантажопідйомності, що забезпечують захист крана і його механізмів від переходу крайніх положень і перевантаження;
- напівпровідникові випрямлячі, що забезпечують живлення обмоток збудження гальмових машин, обмоток магнітних підсилювачів, силових кіл і кіл керування деяких типів кранів;

генератори змінного і постійного струмів, застосовувані на деяких типах баштових кранів як джерела живлення для всього електрообладнання або електрообладнання приводів окремих механізмів;

апарати і прилади, використовувані для різних перемикачів і контролю в силових колах і колах керування: кнопки, рубильники, вимикачі, перемикачі, вимірювальні прилади.

До допоміжного обладнання належать:

освітлювальні прилади (світильники, прожектори);

прилади електрообігріву (електропечі, нагрівачі);

прилади звукової сигналізації (дзвінки, сирени);

апарати керування і захисту (трансформатори, вимикачі, запобіжники та ін.), встановлені в колах освітлення і опалення.

17.2. Електродвигуни вантажопідійомних машин

На ВПМ застосовуються електричні машини як постійного, так і змінного струму. Будова і принцип роботи електричних машин постійного струму були розглянуті в розділі 10.1, машин змінного струму - у розділі 11.2. В даному розділі розглянемо особливості електродвигунів ВПМ.

17.2.1. Кранові електродвигуни. Електродвигуни спеціального кранового типу призначені для роботи як у приміщенні, так і на відкритому повітрі. Тому їх виконують закритими, із самовентиляцією (асинхронні двигуни) або з незалежною вентиляцією (двигуни постійного струму) і з вологостійкою ізоляцією. Оскільки двигуни розраховані на тяжкі умови роботи, їх виготовляють підвищеної міцності. Всі кранові електродвигуни характеризуються підвищеною перевантажувальною здатністю, великими пусковими моментами при порівняно невеликих пускових струмах і малій тривалості розгону. Відношення пускових моментів до номінального коливається в межах $2,3 \div 3,2$.

Кранові електродвигуни з контактними кільцями єдиної серії МТФ, МТН, 4МТН і з короткозамкненими кільцями, 4МТКФ призначені для приводу механізмів, робота яких характеризується короткочасним і повторно-короткочасним режимами. Серії електродвигунів 4-ї розробки в порівнянні з МТФ і МТКФ розраховані на високу температуру нагрівання і відрізняються від них меншими габаритами і масою.

Кранові асинхронні електродвигуни мають позначення, що складається з букв і цифр: МТ - з фазним ротором, МТК - з короткозамкненим ротором. Клас нагрівостійкості двигуна позначається буквою. Двигуни з індексом В (МТВ і МТКВ) мають нагрівостійку ізоляцію класу В з припустимою температурою нагрівостійкості 130°C . Двигуни з індексом Р (МТР і МТКР) мають нагрівостійку ізоляцію класу Р з температурою нагрівостійкості 155°C . Двигуни МТ і МТК виконують з ізоляцією класу Е, з припустимою температурою нагрівостійкості 120°C .

Перша цифра тризначного числа (0-7) після літерного позначення характеризує умовний зовнішній діаметр статорного пакета, друга цифра - порядковий номер серії, третя цифра - умовну довжину осердя статора. Цифра після дефіса, позначає число полюсів машини. Наприклад, позначення МТКФ 412-8

означає крановий короткозамкнений електродвигун четвертого габариту, першої серії, другої довжини, восьмиполюсний.

Наприклад, МТР-411-8 - крановий електродвигун з фазним ротором, 4-ї величини, 1-ї довжини, восьмиполюсний, з ізоляцією класу Р.

До корпусу електродвигуна кріпиться табличка з основними параметрами, що характеризують двигун, і назвою заводу-виготовлювача. У табличці вказують потужність електродвигуна у кВт при номінальному навантаженні, коефіцієнт потужності $\cos\phi$, частоту обертання, напругу на яку розрахований двигун у випадку з'єднання його обмоток «зіркою» або «трикутником», силу струму ротора при номінальній напрузі.

На стрілових кранах в основному використовують двигуни з фазним ротором, оскільки в них за допомогою резистора, що включається до кола ротора, можна регулювати величину пускового струму і пускового моменту.

Пусковий момент при деякому пусковому опорі може бути максимальним. Максимальний момент відповідає критичному ковзанню і визначається за номінальним моментом і коефіцієнтом кратності максимального моменту. Від пускового і максимального моментів залежить здатність електродвигуна під час пуску переборювати інерційні зусилля вантажу і передач виконавчих механізмів.

У випадку сталого режиму роботи момент, що розвивається на валу двигуна повинен бути завжди більший за момент вантажу, що піднімається. Якщо момент, переданий від вантажу на вал електродвигуна, більший за його максимальний момент, то двигун зупиняється, оскільки не може перебороти статичний момент. Момент, що розвивається при цьому двигуном, буде критичним. Якщо вчасно не вимкнути двигун, що перебуває під великим навантаженням, то він перегрівається і може згоріти. У зв'язку з цим не слід допускати перевантаження двигуна.

Перевантажувальна здатність кранових електродвигунів з фазним ротором при $PВ=25\%$ становить $2,5 \div 3,4$.

Працюють кранові електродвигуни в повторно-короткочасному режимі: періоди короткочасної роботи чергуються з тривалими періодами виключеного стану, в якому двигун охолоджується. При такому режимі двигун нагрівається менше, ніж при тривалій безперервній роботі, тому його можна більше навантажувати.

Припустиме навантаження двигуна залежить від $PВ$ і визначається стандартом: 15, 25, 40, 60 і 100% навантаження, визначеного для тривалого режиму роботи.

Електродвигуни ВПМ встановлюють під негерметичними капотами. Тому вони піддані впливу пилу, вологості, високої і низької температур. У зв'язку з цим, на ВПМ використовують електродвигуни в захищеному виконанні.

17.2.2. Пуск асинхронних електродвигунів ВПМ. Пуск електродвигунів з короткозамкненим ротором здійснюють за допомогою магнітних пускачів. Такий спосіб можливий за умови, що потужність двигуна не вище 20% потужності джерела живлення зовнішньої електромережі. Пуск потужних короткозамкнених двигунів здійснюють, перемикаючи статорну обмотку з «зірки» на «трикутник» при напрузі мережі 220 В.

Електродвигуни з фазним ротором включаються за допомогою контролерів і пускових реостатів, включених у коло ротора двигуна. Під час пуску опір

реостата поступово зменшують, збільшуючи при цьому пусковий момент і частоту обертання двигуна.

Частоту обертання асинхронних двигунів з фазним ротором регулюють, змінюючи опір ротора, для чого включають і виключають пускові реостати. Включення реостата до кола ротора зменшує частоту обертання ротора, а вимикання - збільшує її. Шунтування (виведення з кола) частини реостата здійснюють контролером. Регулювати частоту обертання цим способом можна тільки у випадку подолання двигуном великого моменту опору навантаження (підйом важкого вантажу, поворот з вантажем на великому вильоті). На холостому ходу з незначним навантаженням частота обертання двигуна практично не залежить від опору в колі ротора й наближається до синхронної. Спосіб регулювання частоти обертання зміною опору в колі ротора найпростіший, але разом з цим і самий неекономічний, в силу великих втрат у пусковому реостаті.

Реверс асинхронних двигунів забезпечується зміною напрямку обертання магнітного поля. Для одноразового реверсування на щитку виводів статора перемикають дві будь-які фази. Якщо є потреба періодичної зміни напрямку обертання ротора застосовуються реверсивні магнітні пускачі, контролери або перемикаючі рубильники.

17.2.3. Електродвигуни постійного струму. Кранові електродвигуни постійного струму типів ДК, П і 2П випускають на номінальну напругу 220 і 440 В. У позначенні двигуна (наприклад, ДК-309Б) букви позначають серію, а цифри - умовні розміри. Перша цифра після назви серії (1-8) - величина двигуна, що характеризує зовнішній діаметр сталевого якірного пакета; друга цифра - довжина пакета для даної величини; третя - довжина статорного осердя; буква після цифр - клас ізоляції.

Інші параметри і конструктивні особливості (напруга, потужність, частота обертання, спосіб охолодження) характеризуються каталожним номером.

17.2.4. Генератори змінного і постійного струму. На кранах використовуються генератори змінного (синхронні) і постійного струму потужністю 50 ÷ 100 кВт.

Генератор входить до складу силової установки крана, одержуючи обертання від дизеля через муфту. На електричних кранах постійного струму у випадку живлення від зовнішньої мережі змінного струму генератор приводиться до обертання від електродвигуна, включеного до зовнішньої мережі.

17.3. Елементи апаратури керування

Контролери. Контролери служать для керування роботою електродвигуна, тобто його включення, регулювання частоти обертання, зупинки і зміни напрямку руху (реверсування). Контролери, що застосовують для керування електродвигунами кранових механізмів, за принципом роботи розділяються на два види:

безпосереднього керування, або силові, які замикають або розмикають силові кола двигуна за допомогою контактних пристроїв контролера з ручним приводом;

дистанційного керування, або магнітні, керовані за допомогою командо-контролерів, що перемикають кола керування.

Силowymi контролерами, що використовують на баштових кранах, служать кулачкові контролери змінного струму ККТ (рис. 17.1).

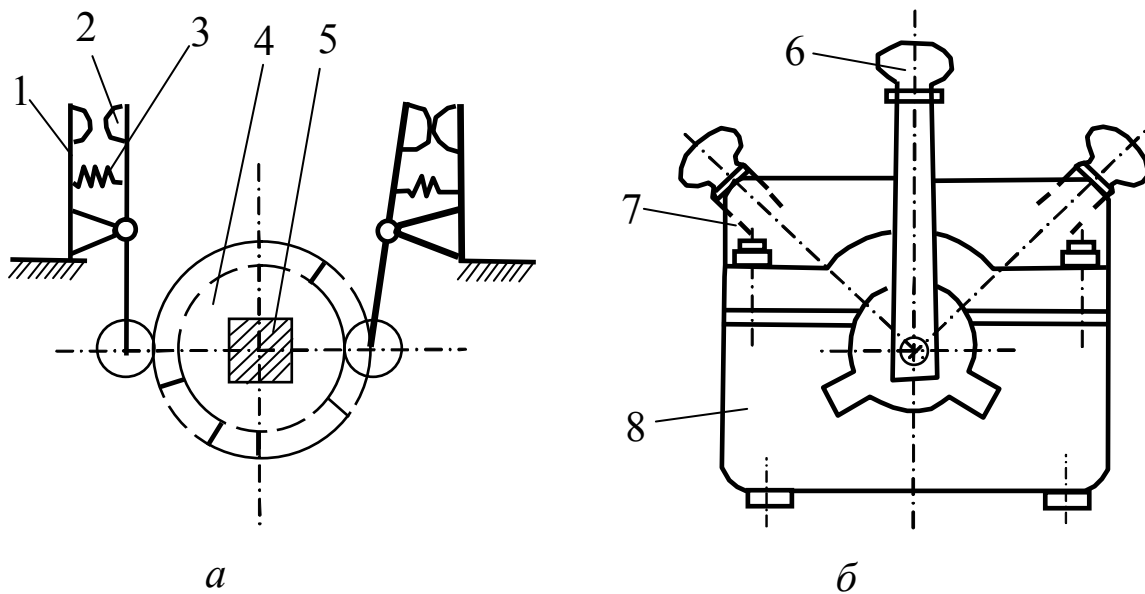


Рис. 17.1 - Кулачковий контролер ККТ-61:

а - контактна система; *б* - загальний вигляд;

1 – нерухомий контактний елемент; **2** - рухомий контакт з роликком; **3** - приводна пружина; **4** - кулачкова шайба; **5** - вал; **6** - рукоятка; **7** - кришка; **8** - корпус

Основними вузлами кулачкового контролера є контактні елементи і вал **5** з кулачковими шайбами **4**. Кожний контактний елемент складається з основи **1**, рухомого важеля **2** з роликком і рухомим контактом і приводною пружиною **3**, що забезпечує замикання рухомого і нерухомого контактів. Контактні елементи кріпляться до корпусу **8** контролера. Вал з кулачковими шайбами (кулачковий барабан) обертається в підшипниках, закріплених в корпусі контролера. Поворот кулачкового барабана здійснюється за допомогою рукоятки **6**, насадженої на виступаючий кінець вала.

Контролери випускають двох видів: контролери для керування одним і двома двигунами.

Магнітні контролери являють собою панель у відкритому або захищеному виконанні, на якій розміщені контактори, реле керування, плавкі запобіжники й інші апарати керування й електричного захисту.

Для керування котушками контакторів і реле магнітного контролера звичайно служить **командоконтролер**. Робота командоконтролера аналогічна роботі кулачкового контролера ККТ, але кількість кіл, що перемикаються, в нього менша, а контакти срібні, мостикового типу.

Магнітні контролери мають ряд переваг у порівнянні з силowymi:

магнітним контролером будь-якої потужності управляють за допомогою малогабаритного апарата - командоконтролера без застосування значного мускульного зусилля машиніста;

магнітні контролери можуть бути встановлені поза кабіною, у будь-якому місці на крані;

контактори магнітних контролерів більш зносостійкі, ніж контакти кулачкових контролерів.

Застосування магнітних контролерів дозволяє автоматизувати операції пуску і гальмування двигуна, що спрощує керування приводом і охороняє двигун від перевантажень.

Однак магнітні контролери мають значно складнішу схему і більшу кількість електроапаратів, ніж силові, і тому вимагають більш ретельного догляду.

Контактори і магнітні пускачі. *Контактором називається електричний апарат, призначений для включення і відключення силових електроприймачів.*

Принцип роботи контактора полягає в наступному. При подачі напруги на котушку електромагніта під її дією замикаються силові контакти контактора і здійснюється включення електроприймача. При знятті напруги з котушки електромагніта розмикаються силові контакти контактора й електроприймач відключається.

Залежно від роду струму *розрізняють контактори постійного і змінного струмів*. За числом кіл, що перемикаються одночасно, контактори розділяють на однополюсні і багатопольсні. Контактори постійного струму випускають одно- і двополюсними, а контактори змінного струму - дво-, три- і чотириполюсними.

Головні контакти роблять масивними, розрахованими на більшу силу струму, а блок-контакти - невеликими, тому що в колі керування сила струму не перевищує $5 \div 10$ А.

При розмиканні електричних кіл, що перебувають під навантаженням, між силовими контактами контактора виникає електрична дуга, яка викликає прискорене зношування контактів і навіть їхнє руйнування. Для скорочення часу горіння дуги застосовують різні системи примусового дугогасіння.

Контактори використовують у магнітних контролерах баштових кранів як лінійні контактори кіл захисту й у реверсорах.

Магнітним пускачем називається малогабаритний контактор спеціального виконання, призначений для пуску, зупинки і реверсування асинхронних короткозамкнених електродвигунів, а також для комутації (замикання і розмикання) інших електричних кіл. Магнітний пускач може мати вбудовані теплові реле для захисту електричного кола від перевантажень.

На баштових кранах магнітні пускачі застосовують для керування короткозамкненими двигунами, в магнітних контролерах і для комутації інших силових кіл.

Реле керування і захисту. Для керування і захисту електродвигунів використовують реле часу, проміжні реле, реле мінімального струму, реле максимального струму, теплові реле.

Реле часу застосовують в магнітних контролерах кранів для автоматичного замикання і розмикання кіл керування з заданою витримкою часу.

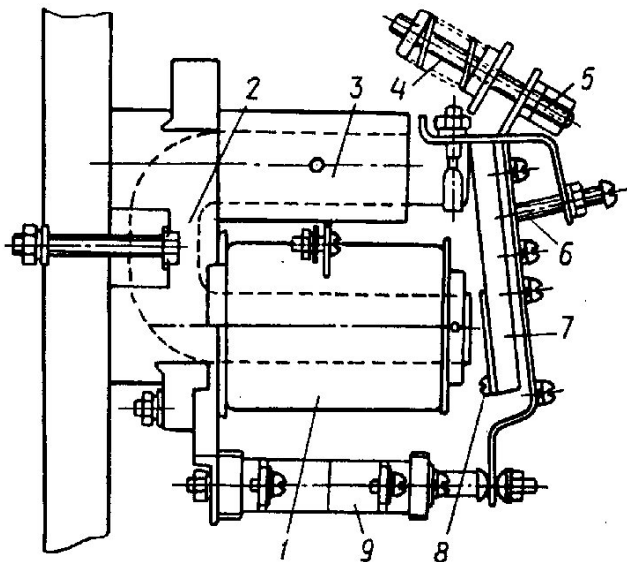


Рис.17.2 - Реле часу постійного струму: 1 - котушка; 2 - ярмо; 3 - гільза; 4 - зворотна пружина; 5 - регульовальна гайка; 6 - упорний гвинт; 7 - якір; 8 - немагнітна прокладка; 9 - контактна система

На рис.17.2. показано будову електромагнітного реле часу постійного струму. Котушка реле укріплена на ярмі. До ярма на хитній призматичній опорі закріплений якір, який у виключеному стані утримується зворотною пружиною.

Робота реле часу заснована на тому, що, в наслідок явища самоіндукції, при вимиканні котушки струм в ній зменшується поступово. Коли котушка включається, у магнітній системі реле виникає магнітний потік, під дією якого якір швидко, без витримки часу притягується до ярма. Якщо котушку закоротити або виключити, то струм, що поступово зменшується в обмотці, буде підтримувати магнітний потік реле.

В силу цього якір залишається ще якийсь час притягнутим до ярма. Коли сила притягання якоря до ярма стане меншою за зусилля зворотної пружини, якір реле під її дією відійде від котушки. Час, протягом якого якір залишається притягнутим після вимикання котушки, називається часом витримки реле. Оскільки якір пов'язаний з рухомими контактами контактної системи, то контакти розмикаються (або замикаються) з витримкою часу. Час витримки залежить від типу реле, способу вимикання котушки і знаходиться в межах $0,2 \div 0,3$ с.

Проміжне реле застосовують в кранових схемах як допоміжний апарат, якщо основний апарат не має достатньої кількості контактів, необхідних для роботи схеми, а також, якщо потужність контактів основного апарата недостатня для розмикання або замикання кола керування.

Будову проміжного реле показано на рис. 17.3.

Проміжні реле випускають з котушками постійного і змінного струмів. Реле містить від трьох до шести контактів. Рухомі контакти реле - мостикового типу. Вони закріплені на стрижні, з'єднаному з якорем. Коли на котушку подається напруга, якір притягується до ярма, а пов'язані з ним мостикові контакти замикають або розмикають нерухомі контакти, виконуючи необхідні перемикання в схемі керування. Контакти проміжного реле розраховані на невелику силу струму (до 20 А) і можуть включатися тільки до кіл керування.

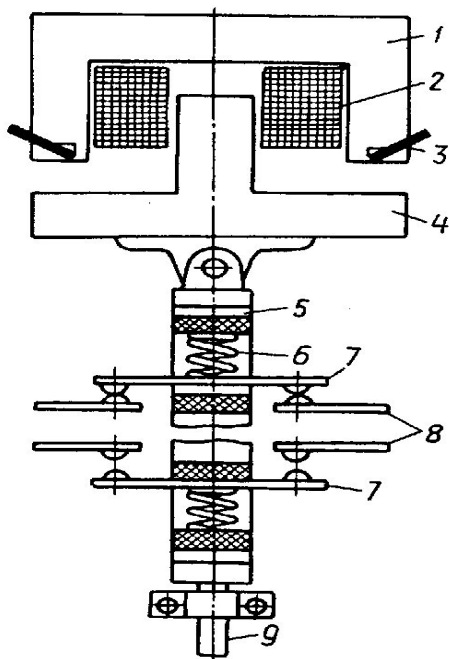


Рис.17.3 - Проміжне реле змінного струму:

- 1- ярмо; 2 - котушка; 3 - к.з. виток;
- 4 - якір; 5 - ізоляційна рейка; 6 - контактна пружина; 7 - контактний місток;
- 8 - нерухомі контакти; 9 - стрижень

Реле максимального струму - електромагнітне струмове реле миттєвої дії. Реле застосовують для захисту електродвигунів від пошкодження при різкому зростанні сили струму, наприклад, при великому перевантаженні, різкому включенні, короткому замиканні. Будову реле максимального струму показано на рис. 17.5.

Котушка реле включається послідовно у фазу силового кола електродвигуна, а контакти 1 - у коло керування апаратом, що забезпечує автоматичне вмикання кола живлення двигуна. При проходженні струму в котушці збуджується магнітне поле, яке росте із збільшенням сили струму. Це поле замикається через магнітопровід і діє на штовхач 5, закріплений у втулці 6. Під дією магнітних сил штовхач разом із втулкою підтягується уверх і, якщо сила струму перевищує задану величину, на яку настроєне реле, впливає на контактний місток, розмикаючи контакти. Окремі реле в цьому випадку не мають своїх контактів, а встановлюються до пристрою з одним контактом для всіх реле. Таке групове реле може складатися з чотирьох блок-реле.

Реле настроюють на силу струму спрацьовування обертанням гвинта 8 у відповідності із шкалою покажчика, з'єданого з цим гвинтом. Чим нижче опущений якір із втулки, тим більша сила струму необхідна для спрацьовування реле.

Реле мінімального струму. Реле застосовують в схемі привода вантажної лебідки з гальмовою машиною для контролю сили струму обмотки збудження. Будову реле мінімального струму показано на рис.17.4.

Котушка реле включається до кола збудження гальмової машини. Коли сила струму в колі досягає значення спрацьовування реле, при якому притягання якоря до полюсного наконечника 2 стане більшим за протидіючу силу пружини 12, реле ввімкнеться. При цьому верхні контакти 6 замкнуться, а нижні 11 розімкнуться.

Величину струму спрацьовування реле можна регулювати шляхом зміни сили натягу зворотної пружини за допомогою корончатої гайки 5 і змінюючи повітряний проміжок в електромагніті гвинтом 4. При ослабленні натягу пружини або при зменшенні повітряного проміжку реле включається при меншій силі струму в котушці.

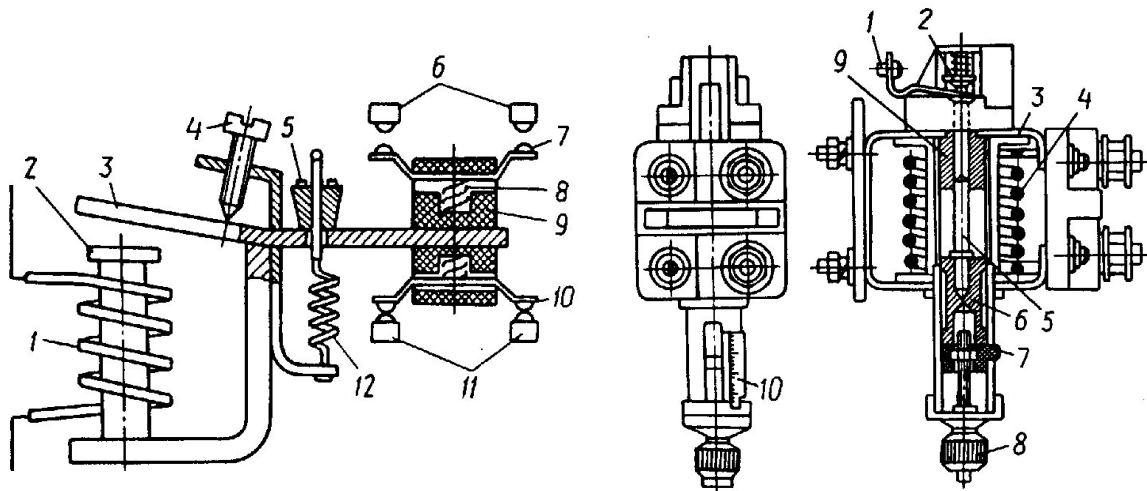


Рис.17.4 - Реле мінімального струму:

- 1 – котушка; 2 – ярмо; 3 – якорь;
- 4 – гвинт; 5 – гайка;
- 6, 7, 10, 11 - контакти;
- 8, 12 – пружини; 9 - колодки

Рис.17.5 - Реле максимального струму:

- 1 – нерухомий контакт; 2 - контактний місток; 3 – магнітопровід; 4 – котушка;
- 5 – штовхач; 6, 7, 9 – втулки,
- 8 - регулювальний гвинт; 10 - шкала

Теплове реле служить для захисту електродвигуна від невеликих, але тривалих перевантажень, при яких сила струму двигуна на 30 % і більш перевищує номінальне значення. Теплове реле спрацьовує при певному значенні сили струму протягом деякого інтервалу часу.

Основним елементом реле (рис.17.6) є біметалічна пластина, зварена з двох металів з різними коефіцієнтами лінійного розширення. Коли пластина нагрівається робочим струмом, що протікає по нагрівальному елементу (або безпосередньо по пластині), вона вигинається у бік металу з меншим коефіцієнтом лінійного розширення.

В тепловому реле біметалічна пластина впирається у верхній кінець пружини. Нижній кінець пружини давить на виступ пластмасової колодки, що шарнірно закріплена на осі. В положенні, показаному на рис.17.6 рух пластини і верхнього кінця пружини обмежується упором 5. Пружина впливає на виступ колодки так, що вона опиняється поверненою за годинниковою стрілкою, а закріплений на ній рухомий контакт - замкненим з нерухомим контактом.

Коли по нагрівальному елементу протікає підвищений струм, біметалічна пластина нагрівається і її нижній кінець переміщується в напрямку стрілки А. Внаслідок цього, верхній кінець пружини переходить правіше й пластмасова колодка повертається проти годинникової стрілки (показано пунктирною лінією), а контакти 1 і 2 розмикаються. Упори 5 і 8 обмежують положення нижнього кінця пластини.

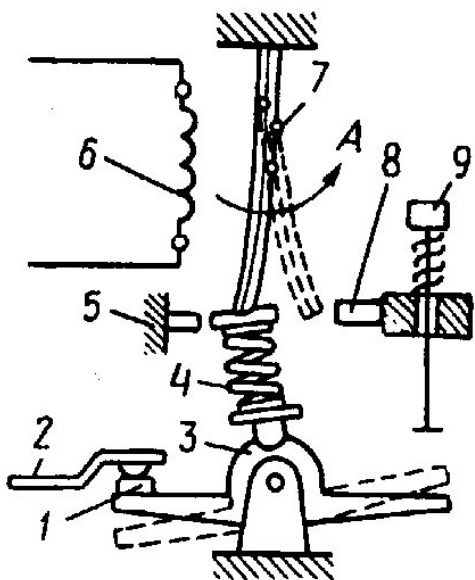


Рис. 17.6 - Будова теплового реле:
 1 - рухомий контакт; 2 - нерухомий контакт; 3 - колодка; 4 - пружина;
 5, 8 - підпірки; 6 - нагрівальний елемент;
 7 - біметалічна пластина; 9 - зворотний пристрій

Резистори. Застосовувані в електроустаткуванні баштових кранів резистори діляться на пускорегулюючі, що включаються до силової мережі електродвигунів, і резистори, використовувані в колах керування і сигналізації.

Пускорегулюючі резистори (реостати) включаються до кола ротора електродвигуна і служать для плавного розгону, гальмування і регулювання частоти обертання електродвигуна, а також для гальмування його в режимі противключення.

У **дротових резисторах** на металеві тримачі, ізольовані по гранях порцеляновими ізоляторами, намотаний константановий дріт.

Елементи **стрічкових резисторів** (рис. 17.7) виконують з намотаної на ребро стрічки 3, укріпленої на сталевому тримачі за допомогою порцелянових ізоляторів 1. Ці елементи збираються в ящику аналогічно дротовим резисторам.

Пускорегулюючій реостат залежно від потужності і призначення електродвигуна складається з одного або декількох ящиків резисторів.

Включають реостати до кола ротора двигуна або виключають (закорачивають) їх у процесі роботи за допомогою контролерів. Резистори розраховані, як правило, тільки на короткочасне включення при пуску або гальмуванні двигуна. Тривала робота електродвигунів з включеними реостатами (рукоятка контролера не встановлена в крайнє положення) неприпустима, тому що при цьому резистори сильно перегріваються.

У вихідне положення реле повертається само, коли біметалічна пластина охолоне (реле з самоповерненням). Упор 8 може бути знятим; тоді реле повертається у вихідне положення зворотним пристроєм. Реле спрацьовує з витримкою часу, що перебуває у зворотній залежності від сили струму.

Чим більша сила струму в нагрівальному елементі, тим менший час протягом якого біметалічна пластина нагрівається до спрацьовування реле. Теплове реле не спрацьовує у випадку миттєвого росту сили струму, тому не може служити надійним захистом від коротких замикань. Теплові реле використовують у схемах ВПМ для захисту короткозамкнених АД і встановлюють в магнітних пусках або в автоматичних вимикачах з тепловими або комбінованими розчеплювачами.

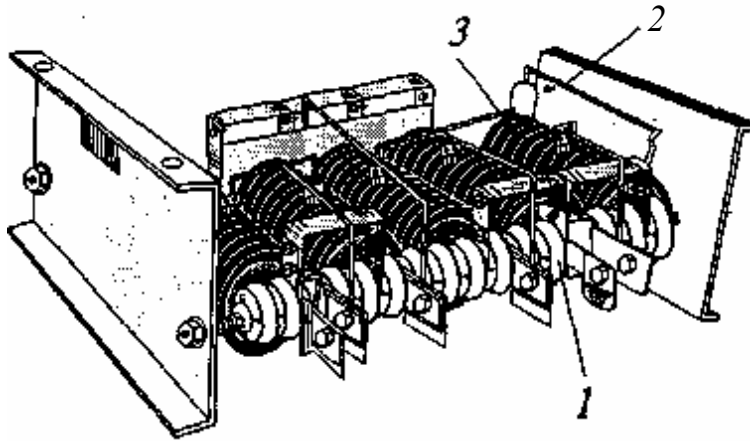


Рис.17.7 - Ящик із стрічковими резисторами:
1 - ізолятори; 2 - перемичка; 3 - фехралева стрічка.

Гальмові пристрої. *Гальмові машини* застосовують в електроприводі вантажопідйомних лебідок для одержання знижених швидкостей переміщення вантажу.

На баштових кранах встановлюють гальмову машину змінного струму ТМ-4А, що представляє собою короткозамкнений асинхронний електродвигун спеціального виконання, що має малу частоту обертання.

Гальмова машина розрахована на короточасну роботу з ПВ = 15 % і повинна використовуватися тільки для невеликих переміщень вантажів.

Гальмові електромагніти й електрогідравлічні штовхачі. Гальмові електромагніти й електрогідравлічні штовхачі застосовують для розгальмовування колодкових гальм у механізмах крана.

Гальмові електромагніти. Гальмові електромагніти мають дві основні частини: магнітопровід і обмотку збудження (котушку). Магнітопровід складається з нерухомого ярма й рухомого якоря. При проходженні струму через укріплену на ярмі котушку виникає магнітне поле, під дією якого якор притягається до ярма й через систему важелів розгальмовує гальмо.

Гальмові електромагніти розділяють за родом струму живлення на електромагніти змінного і постійного струму.

Електрогідравлічні штовхачі. Електрогідравлічні штовхачі - це машини, що перетворюють електричну енергію на механічну і мають виконавчий орган, що прямолінійно переміщується (шток).

В порівнянні з гальмовими електромагнітами електрогідравлічні штовхачі мають ряд переваг: їх розміри і маса менші в порівнянні з аналогічними за робочими параметрами електромагнітами, споживання електроенергії також у кілька разів менше; величина напірного зусилля гідроштовхача не залежить від положення поршня, в той час як в електромагніта зусилля різко змінюється залежно від величини повітряного зазору між ярмом і якорем; з підвищенням зовнішнього навантаження до величини максимального напірного зусилля штовхача поршень зупиняється. При цьому не відбувається ні перевантаження двигуна, ні механічних пошкоджень елементів штовхача.

Напівпровідникові випрямлячі. Напівпровідникові випрямлячі служать для перетворення змінного струму на постійний, який застосовують на баштових кранах для живлення обмоток збудження гальмових машин і гальмових електромагнітів, кіл керування котушок контакторів і кіл керування магнітних підсилювачів, для динамічного гальмування асинхронних двигунів, а також для живлення кіл обмежників вантажопідйомності й анемометрів.

Кінцеві вимикачі. Кінцеві вимикачі служать для обмеження дії механізмів крана, включення кіл сигналізації, а також використовуються як вимикачі блокування.

За принципом роботи кінцеві вимикачі підрозділяють на важільні (рис. 17.8), що спрацьовують при дії на них пристроїв, що відключаються, і приводні (шпindelьні), які жорстко пов'язані з валом механізму. Останні спрацьовують після повороту вала вимикача на певний кут.

Плавкі запобіжники. Плавкі запобіжники призначені для захисту електрообладнання й електричних мереж від великих струмів, що виникають при коротких замиканнях, і значних (50% і більше) перевантаженнях.

В запобіжнику міститься провідник з низькою температурою плавлення (плавка вставка), через який проходить струм кола, яке потрібно захистити. При збільшенні сили струму виділяється велика кількість тепла, під дією якого провідник розплавляється і розмикає коло. На баштових кранах застосовують трубчасті запобіжники без наповнення ПР-2 і з наповненням ПН-2, НПР, НПН.

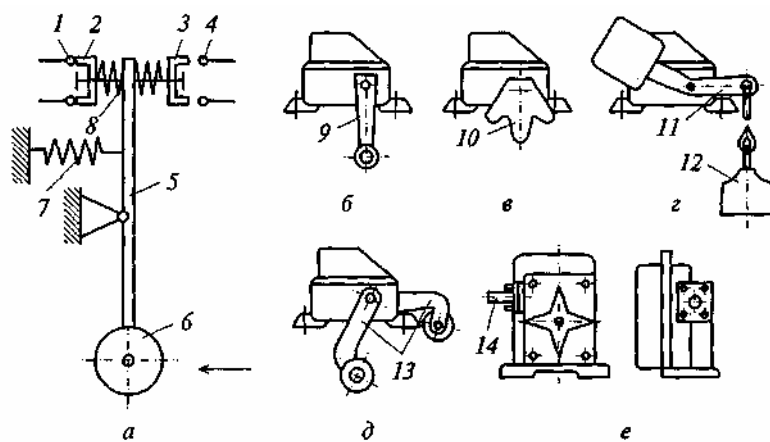


Рис. 17.8 - Кінцеві вимикачі:

- а - важільний; б - КУ-701; в - КУ-704; г - КУ-703; д - КУ-706; е - ВУ-250;
- 1, 4 - нерухомі контакти; 2,3 - контактні містки; 5, 9, 13 - важелі; 6 - ролик;
- 7 - зворотна пружина; 8 - пружина контактних містків; 10 - сектор;
- 11 - важіль з противагою; 12 - вантаж; 14 - вхідний вал

Рубильники і силові розподільні ящики. Рубильники і силові розподільні ящики служать для нечастої комутації (замикання і розмикання) електричних кіл змінного і постійного струму напругою до 500 В. На баштових кранах рубильники застосовують в захисних панелях і в силових розподільних ящиках. Силові розподільні ящики використовують на баштових кранах в якості ввідних (портальних) рубильників, встановлюваних у нижній частині металоконструкції крана, на порталі або на ходовій рамі.

Рубильник (рис. 17.9,а) має один або кілька рухомих ножів 1, шарнірно закріплених у контактних стійках 6. Ножі зв'язані траверсою 3 з ізолюючого матеріалу. При включенні рубильника ножі вводяться до контактних губок 2. До губок приєднують провід від джерела живлення, а до контактних стійок ножів - провід кола, що включається рубильником. Рубильником керують (включають і відключають) за допомогою рукоятки 4.

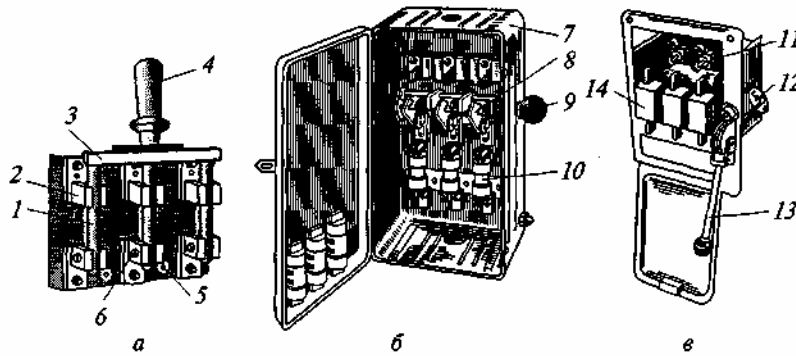


Рис. 17.9 - Апарати для нечастої комутації електричних кіл:

- а - рубильник; б - силовий розподільний ящик; в - блок запобіжник-вимикач;
 1 - ніж; 2, 11 - контактні губки; 3 - траверси; 4, 9, 13 - рукоятки; 5 - ізоляційна плита;
 6 - контактна стійка; 7 - шафа; 8 - вбудований рубильник; 10 - запобіжники;
 12 - важільна система; 14 - рухомий ніж-запобіжник

За числом кіл, що розмикаються, розрізняють одно-, дво- і триполюсні рубильники.

Силовий розподільний ящик (рис. 17.9,б) являє собою шафу 7 з вбудованими до неї рубильником 8 і запобіжниками 10. Рубильник управляється за допомогою важільного привода бічною рукояткою 9. Рукоятка має блокувальний пристрій, завдяки якому не можна відкрити кришку шафи при включеному рубильнику і включити рубильник при відкритій кришці. В корпусі передбачений затискач для кріплення заземлюючого проводу. В деяких конструкціях силових розподільних ящиків замість окремо встановлюваних рубильника і плавких запобіжників застосовують блок, що вбудовується, запобіжник-вимикач (рис. 17.9,в). Блок складається з контактних губок 11, встановлених на ізоляційній панелі, і рухомих ножів 14, виконаних разом із запобіжниками. Блок включається і відключається рукояткою 13, пов'язаною з ножами за допомогою важільної системи 12.

На всіх розподільних ящиках, які встановлені в якості порталного рубильника на крані або в якості рубильника на підключувальному пункті біля підкранової колії, передбачається пристрій для запирання ящика з рукояткою, встановленою в положення «Виключене». Він повинний бути виконаним так, щоб у замкненому положенні не можна було включити рукоятку, а при включеній рукоятці - замкнути пристрій.

Автоматичні вимикачі. Автоматичні вимикачі (автомати) призначені для автоматичного відключення електричних кіл у випадку порушення нормальних умов їхньої роботи (наприклад, при перевантаженні або короткому замиканні), а також для нечастої комутації.

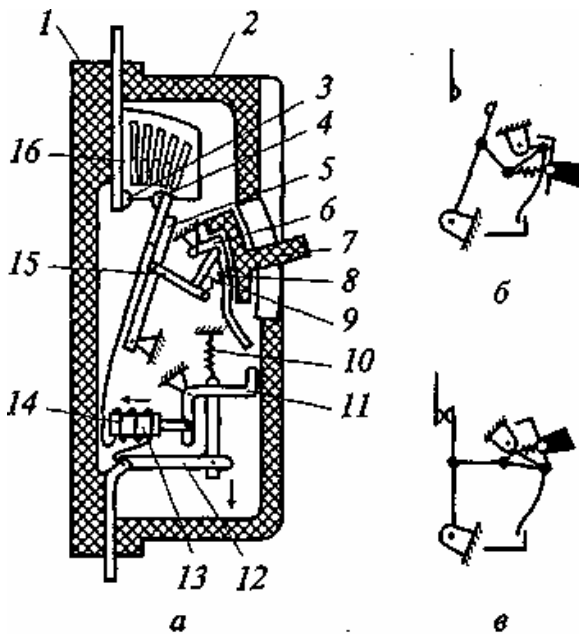


Рис. 17.10 - Автоматичний вимикач А-3100:
 а - конструктивна схема; б - важільна система
 автомата перед включенням; в - важільна
 система автомата після включення

Автомат (рис. 17.10,а) складається з корпусу (основа 1 і кришка 2), комутуючого пристрою (нерухомі контакти 3 і рухомі контакти 4), дугогасильних камер 16, механізму керування і розчеплювачів максимального струму.

До складу механізму керування входять рукоятка 7, фігурна деталь 6, пружини 8 і 10, важелі 9 і 15.

Автоматичний вимикач відключається (розмикає свої силові контакти) при спрацьовуванні розчеплювачів максимального струму.

За принципом дії розчеплювачі бувають: тепловими, електромагнітними і комбінованими, що складаються з послідовно включеного теплового й електромагнітного розчеплювачів. Основним елементом

теплового розчеплювача є біметалічна пластина.

Електромагнітний розчеплювач складається з котушки 14 і осердя 13. При виникненні струму короткого замикання осердя миттєво втягується до котушки. При цьому важіль 11 повертається, звільняє від зачеплення із зубом фігурну деталь 6 і автомат відключається без витримки часу.

Апаратура ручного керування. Для нечастих перемикачів кіл керування і освітлення в схемах баштових кранів застосовують кнопки керування, вимикачі керування, пакетні вимикачі і універсальні перемикачі.

Кнопки керування (рис. 17.11,а) служать для замикання і розмикання кіл котушок контакторів, магнітних пускачів і реле, а також для включення звукового сигналу. Комплект кнопок, вбудованих у загальний кожух, називається *кнопковою станцією*.

Вимикачі керування бувають з ручним приводом і педальним (ножним). Вимикачі з ручним приводом використовують для відключення лінійного контактора, їх звичайно називають аварійними вимикачами. Педальні вимикачі (рис. 17.11,б) застосовують для включення кіл керування, наприклад для керування посадковою швидкістю вантажних лебідок в схемі противключення. Контакти вимикачів керування розраховані на силу струму до 10 А.

Пакетні вимикачі (рис. 17.11,в) застосовують в схемі кранів для включення кіл керування і освітлення. За допомогою пакетних вимикачів включають робоче освітлення і нагрівальні прилади.

Пакетний вимикач складається з двох вузлів: контактної системи і перемикаючого механізму. Пакетні вимикачі випускають у відкритому і захищеному виконанні на величину сили струму від 10 до 60 А.

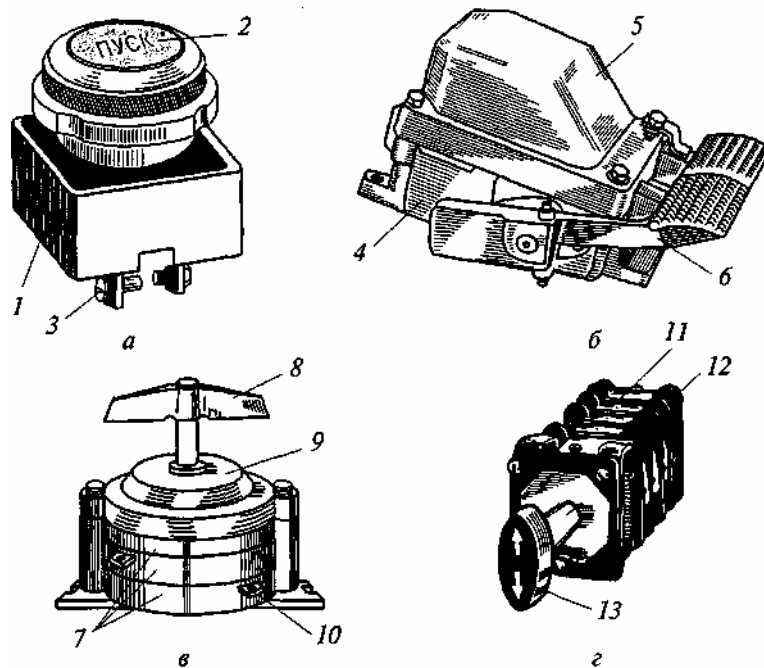


Рис. 17.11 - Апарати ручного керування для комутації кіл керування й освітлення кранів:

а - кнопка керування; б - педальний вимикач; в - пакетний вимикач;
г - універсальний перемикач.

Універсальні перемикачі (рис. 17.11,г) - це багатокільні електричні апарати, застосовувані для нечастих перемикачів електричних кіл. На баштових кранах, в яких передбачене керування механізмами з кабіни або з переносного монтажного пульта, універсальні перемикачі використовують для перемикачів схеми крана на пульт або кабіну. На деяких кранах перемикачі застосовані в якості командоапаратів для керування магнітними контролерами.

Струмоприймачі. За допомогою струмоприймача електрообладнання обертової частини крана пов'язане із зовнішньою мережею й електроапаратами, встановленими на неповоротній частині крана. За принципом роботи струмоприймачі баштових кранів розділяють на кільцеві і безкільцеві.

Безкільцевий струмоприймач являє собою шлейф з гнучких проводів, що зв'язують затискачі кола на обертових і неповоротній частинах крана. Довжина проводів вибирається достатньою для двох повних обертів крана (720°) в обидва боки від початкового положення.

Безкільцевий струмоприймач застосовують на більшості баштових кранів, тому що він значно простіше і надійніше за кільцевий. При експлуатації крана з безкільцевим струмоприймачем необхідно систематично спостерігати за роботою обмежника повороту, тому що його несправність може привести до скручування і обриву проводів гнучкого шлейфа.

Проводи і кабелі. Для підключення електрообладнання до зовнішнього кола, а також для електричного зв'язку між електродвигунами й електроапаратами на баштовому крані застосовують проводи і кабелі.

Проводи і жили кабелів всіх кіл кранової електричної схеми повинні мати добре помітне буквене і цифрове маркування.

Відповідно до правил будови електроустановок електропроводка на кранах може виконуватися проводами і кабелями з мідними жилами. Переріз проводів і струмоведучих жил кабелів вибирають за припустимими тривалими струмовими навантаженнями залежно від потужності, споживаної приймачем. Однак за умовами механічної міцності переріз мідних проводів повинний бути не менш $2,5 \text{ мм}^2$. В колах керування для приєднання командоапаратів, а також у колах телекерування і зв'язку допускається використовувати гнучкі проводи з мідними жилами перерізом менше $2,5 \text{ мм}^2$ за умови, що ці проводи не несуть механічного навантаження.

Зовнішню електропроводку по крану виконують гнучким кабелем з мідними жилами в гумовій або рівноцінній ізоляції, призначеній для роботи в інтервалі температур від -40 до $+40^\circ\text{C}$. Для електропроводки в шафах магнітних контролерів і в кабінах використовують одножилні і багатожилні проводи (ПР, ПРГ, ПВ-ХЛ, ПГВ-ХЛ) або кабелі для зовнішньої проводки.

Кабельні барабани. Електрична енергія подається від зовнішнього кола до електрообладнання крана по кабелю. Довжина кабелю, що з'єднує вхідний рубильник на ходовій рамі (порталі) баштового крана з підключальним пунктом у кранового шляху, звичайно дорівнює 50 м.

Для запобігання кабелю від зношування й обривів при зачіпанні за нерівності підкранової колії застосовують різні засоби. При довжині шляху більше 50 м підключальний пункт розміщують усередині підкранової колії, а для кабелю влаштовують дерев'яний лоток, по якому кабель протаскують краном. При довжині шляху 50 м і менше уздовж підкранової колії натягують на стійках дріт або канат, і до них за допомогою дротових кілець прикріплюють кабель.

Застосування кабельного барабана виключає необхідність виконувати ці складні й ненадійні пристрої. Кабельний барабан призначений для намотування (або змотування) кабелю при переміщенні крана по рейковому шляху. Барабан являє собою порожній циліндр, усередині якого міститься кільцевий струмоприймач, що зв'язує кабель, який намотується, з вхідним рубильником.

Кабель намотується на зовнішню циліндричну поверхню барабана. Кабельний барабан закріплюється на металоконструкції крана й має приводний пристрій, за допомогою якого відбувається намотування кабелю на барабан при русі крана до підключального пункту. Кабель змотується з барабана за рахунок власного натягу або в результаті зміни напрямку обертання привода барабана.

17.4. Електричний привод будівельних кранів

Електричний привод виконавчих механізмів ВПМ використовується на гусеничних і пневмоколесних самохідних кранах, а також на автомобільних і баштових кранах.

На будівельних кранах найбільше поширення одержав багатодвигунний електричний привод змінного і постійного струмів. Причому електричний струм часто виробляється власною силовою установкою і надходить від синхронного генератора до електродвигунів виконавчих механізмів. Електричні схеми привода будівельних кранів передбачають можливості живлення електродвигунів не тільки

від генератора, але й від зовнішньої мережі трифазного струму напругою 380 В. Живлення від зовнішньої мережі здійснюється по кабелю, що дає можливість передавати електроенергію через кільцевий струмоприймач на панель керування в кранах з приводом змінного струму. В кранах з приводом постійного струму від зовнішньої мережі струм підводиться до електродвигуна змінного струму, який обертає синхронний генератор постійного струму.

Як приклад розглянемо електричну схему крана КБ-401А. На рис. 17.12. показана електрична схема силових кіл крана, на рис.17.13 - схема кіл керування, а на рис.17.14 - схема кіл освітлення, опалення і сигналізації.

Електропривод баштового крана КБ-401А (рис. 17.12) розрахований на живлення від зовнішньої трифазної електричної мережі змінного струму з лінійною напругою 380 В і нейтральним проводом. Електрична схема кіл керування (рис. 17.13) працює на змінному струмі напругою 220 В і постійному струмі від випрямляча $V2$. Допоміжні пристрої (освітлення, опалення, сигналізації) живляться змінним струмом напругою 220 В (рис. 17.14). Електричне коло ремонтного освітлення працює на змінному струмі напругою 12 В від понижувального трансформатора $T2$ (рис. 17.14).

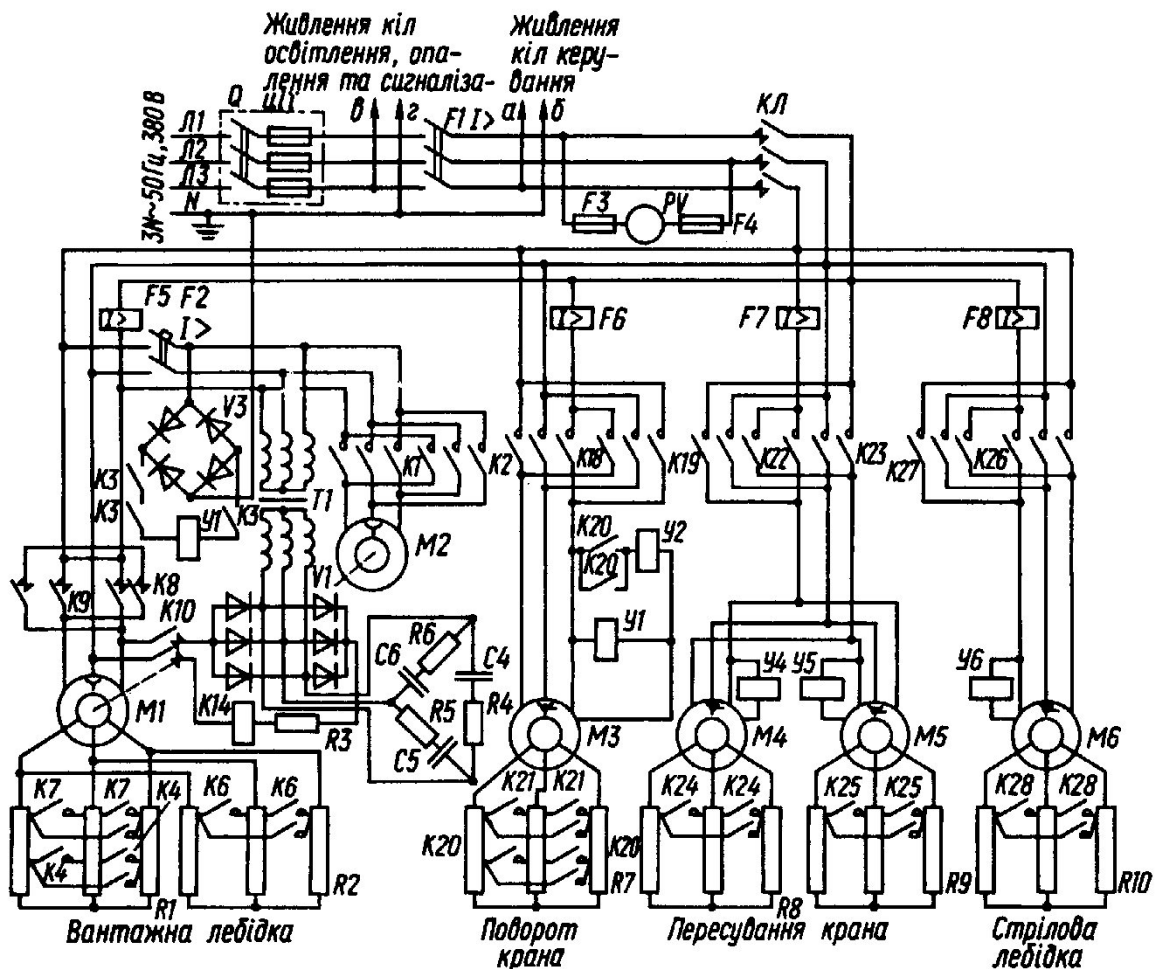


Рис.17.12 - Схема силових кіл крана КБ-401А

Живлення електродвигунів (рис. 17.12) здійснюється через вхідний рубильник Q , автоматичний вимикач $F1$, контакти лінійного контактора $KЛ$ і контакти контакторів реверса.

Частоту обертання всіх двигунів під час пуску регулюють зміною опору пускорегулюючих реостатів. Частоту обертання електропривода поворотного механізму додатково регулюють за допомогою допоміжного гальма з електромагнітом $V2$, що підгальмовує механізм у першому положенні ручки командоконтролера. Для одержання малих частот обертання механізму підйому вантажу, використовують електропривод з гальмовою машиною змінного струму й динамічним гальмуванням приводного електродвигуна.

В електроприводі механізму піднімання вантажу крана КБ-401А передбачений захист кремнієвих випрямлячів з електромагнітом $V1$ постійного струму.

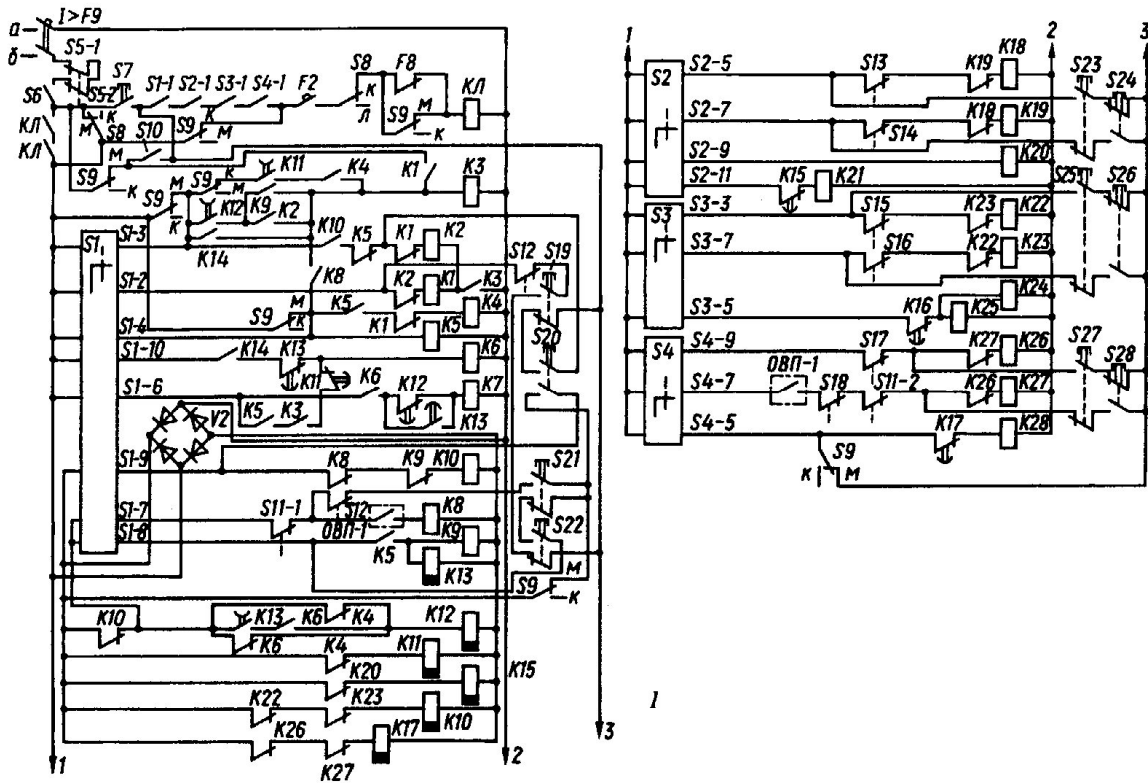


Рис.17.13 - Схема кіл керування краном КБ-401А

Захист випрямлячів від перенапруги забезпечується трьома ланцюжками, кожний з яких містить послідовно включені резистори ($R4$, $R5$, $R6$) і конденсатори ($C4$, $C5$, $C6$), з'єднані «трикутником» і включені до трьох фаз випрямного містка $V1$.

Головний електромагніт постійного струму живиться від силових кіл за спеціальною схемою через випрямляч $V3$ і контакти контактора $K3$.

В електроприводах усіх механізмів застосовані магнітні контролери, керувати якими можна або з кабіни крана, або з виносного пульта.

Під час виконання робіт керування здійснюється з кабіни за допомогою командоконтролерів $S1$, $S2$, $S3$, $S4$. Послідовність замикання їхніх контактів приведена в таблицях 17.1 -17.3, де замкнутий контакт позначений знаком "X".

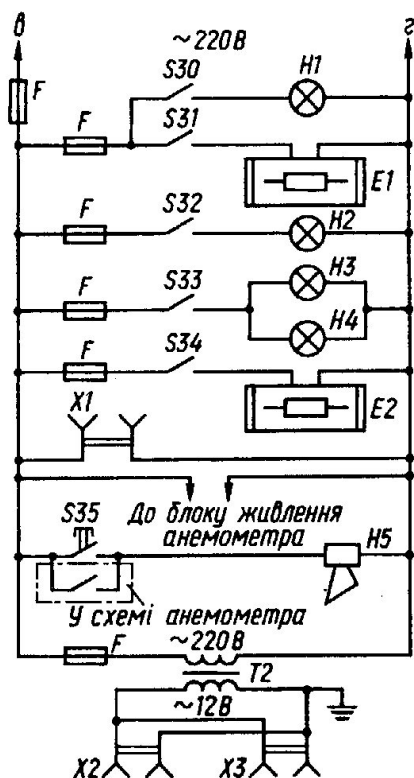


Рис.17.14 - Схема кіл освітлення, опалення і сигналізації крана КБ-401А

Таблиця 17.1 - Замикання контактів командоконтролера вантажної лебідки крана КБ-401А

Контакт	Положення ручки							
	Підйом				0	Опускання		
	3	2	1	1		2	3	
S1-1				X				
S1-2			X					
S1-3					X	X	X	
S1-4	X	X	X				X	
S1-6	X						X	
S1-7	X	X	X					
S1-8							X	
S1-9					X	X		
S1-10	X				X			

Таблиця 17.2 - Замикання контактів командоконтролера поворотного механізму крана КБ-401А

Контакт	Положення ручки							
	Підйом				0	Опускання		
	3	2	1	1		2	3	
S2-2				X				
S2-5	X	X	X					
S2-7					X	X	X	
S2-9	X	X				X	X	
S2-11	X						X	

Таблиця 17.3 - Замикання контактів командо контролера пересування крана й підйому стріли крана КБ-401А

Контакти командоконтролера		Положення ручки					
		Уперед Підйом		0	Назад Опускання		
S3	S4	2	1		1	2	
S3-1	S4-1			X			
S3-5	S4-5	X			X		
S3-7	S4-7				X		
S3-9	S4-9	X	X				

У випадку монтажу самого крана і його випробування, коли машиніст не може перебувати в кабіні, механізмами керують з виносного пульта кнопками *S19...S28*. Передача керування на кабіну або виносний пульт виконується універсальним перемикачем *S9*, ручку якого встановлюють у положення *K* (керування краном з кабіни) або в положення *M* (керування з виносного пульта).

В схемах електроприводів кранових механізмів забезпечується східчастий розгін двигуна під контролем реле часу. При цьому ступені пускорегулюючих реостатів закорочуються відповідно до витримки реле часу. Наприклад, якщо встановити ручку стрілового командоконтролера *S4* відразу в друге положення піднімання (опускання), спочатку увімкнеться контактор реверса *K26* (*K27*) і двигун почне працювати з повним опором реостата. Одночасно виключиться реле часу *K17*. Коли закінчиться витримка часу, реле *K17* спрацьовує й своїми контактами замкне коло котушки *K28*. Контакт *K28* увімкнеться й закоротить реостат, залишивши в колі ротора двигуна *M6* невеликий опір, що не вимикається.

Електродвигуни, електроапарати і кранові механізми захищають автоматами, реле максимального струму, плавкими запобіжниками і кінцевими вимикачами (рис. 17.12).

Нульовий захист виконують контакти командоконтролерів *S1-1*, *S2-1*, *S3-1*, *S4-1*, замкнуті тільки в нульовому положенні ручок. Ці контакти включені послідовно з кнопкою *S7* у коло котушки лінійного контактора *KL*.

Електродвигуни кранових механізмів захищені від перенапруги за допомогою реле максимального струму. Котушки реле *F5*, *F6*, *F7* і *F8* включені до одної фази живлення електропривода кожного механізму. Реле об'єднані в один блок і діють на загальний контакт *F8*, включений до кола котушки лінійного контактора *KL*. Спрацьовування будь-якого реле обумовлює розмикання кола котушки й відключення силового кола крана від живильної мережі.

Одна фаза гальмової машини *M2* і кола живлення випрямляча *VI* також захищені реле *F5*, а дві інші фази - триполюсним автоматом *F2*. Третій полюс автомата включений у коло котушки лінійного контактора *KL*. Тому у випадку спрацьовування автомата лінійний контактор вимикається.

Захист загального живлення кола від короткого замикання здійснюють автоматичний вимикач і плавкі запобіжники силового вхідного ящика *Q*. Кінцевий захист від переходу крановими механізмами крайніх положень виконують кінцеві вимикачі, що розмикаються, контакти яких включені до кіл котушок відповідних контакторів.

Кінцевий вимикач *S11* розмикається, коли гакова підвіска підходить до стріли. Кінцевий вимикач *S13* розмикається в крайньому правому положенні поворотної платформи, а *S14* - у її крайньому лівому положенні. Контакт *S15* кінцевого вимикача обмежника пересування крана розмикається в крайньому положенні під час руху крана вперед, а контакт *S16* того ж вимикача - у крайньому положенні під час руху назад. Кінцеві вимикачі *S17* і *S18* виключають електродвигун стрілової лебідки відповідно в крайніх верхніх і крайньому нижньому положеннях стріли.

Роботу вантажної лебідки контролює обмежник вантажопідйомності ОВП-1, вихідний контакт якого включений у коло котушки *K8*. У випадку роз-

микання контакту (в результаті перевищення вантажопідйомності) вимикається контактор підняття вантажу й електрична схема дає можливість виконувати операцію опускання вантажу.

Якщо потрібно терміново зупинити всі кранові механізми, лінійний контактор можна виключити аварійним вимикачем *S6* у кабіні керування або *S10* - на виносному пульті.

В колах освітлення, опалення й сигналізації (рис. 17.13) лампа *H1* освітлення кабінки й лампи *H2*, *H3*, *H4* прожекторів освітлення робочої зони управляються пакетними вимикачами *S30...S34*. Кабіна керування опалюється нагрівальними приладами *E2*. Трубчасті нагрівачі *E1* служать для обігріву ліхтаря кабінки.

Звукова сирена *H5* включається кнопкою *S35* і контактом, що розмикається, вихідного реле анемометра. При нормальному вітровому навантаженні й справній схемі анемометра його вихідне реле включене і контакт у колі сирени буде розімкнутим. У випадку вимикання вихідного реле анемометра (в результаті посилення вітру або несправності в схемі анемометра) контакт замикається й включає сирену.

До кіл освітлення приєднаний блок живлення анемометра й трансформатор *T2* з розетками *X1* і *X2* для включення ламп ремонтного освітлення. Кола освітлення, опалення й сигналізації захищені плавкими запобіжниками.

Контрольні запитання з теми 17

1. Яке обладнання належить до вантажопідйомних машин і якими особливостями характеризується його робота?
2. Дайте характеристику основного електрообладнання ВПМ.
3. Приведіть приклади допоміжного електрообладнання ВПМ.
4. Дайте характеристику крановим асинхронним електродвигунам.
5. Як здійснюється пуск асинхронних електродвигунів ВПМ?
6. Дайте характеристику крановим електродвигунам постійного струму.
7. Які основні елементи апаратури керування?
8. Поясніть принцип роботи реле постійного струму.
9. Поясніть принцип роботи реле мінімального струму.
10. Поясніть принцип роботи реле максимального струму.
11. Поясніть принцип роботи теплового реле.
12. Поясніть призначення основних елементів силових кіл крана КБ-401А.
13. Поясніть призначення основних елементів кіл керування краном КБ-4001А.

ТЕМА 18

ЕЛЕКТРИЧНІ РУЧНІ МАШИНИ

Ключові поняття: електрична ручна машина, клас ізоляції, комбінований електромеханізм, вібратор.

18.1. Загальні відомості про електричні ручні машини

В будівельному виробництві застосовуються різноманітні механізми і ручні машини, оснащені електроприводом. Тією ж самою машиною при застосуванні різних стандартних або спеціальних робочих інструментів або спеціалізованих насадок можна виконувати різні технологічні операції й обробляти різні матеріали, тому електричні ручні машини можна розділити за основним відповідним назві машини призначенням на наступні групи: свердлильні машини; шліфувальні машини; машини для розпилювання деревини; гайковерти і шуруповерти; машини ударної дії; вібратори.

Електричні ручні машини (ЕРМ) приводяться до руху електродвигуном або електромагнітом, що складає з машиною єдине ціле. Як двигуни застосовуються:

асинхронні трифазні електричні машини з короткозамкненим ротором, нормальною і підвищеною частотою струму;

асинхронні однофазні електричні машини з короткозамкненим ротором, нормальною і підвищеною частотою струму;

обернені (тобто обертається статор, а ротор закріплений нерухомо) асинхронні трифазні електричні машини з короткозамкненим ротором, нормальною і підвищеною частотою струму;

універсальні колекторні електричні машини;

електричні машини зворотно-поступального руху (електромагнітні).

В ЕРМ, як правило, застосовують спеціально виготовлені для них електродвигуни, що працюють на напрузі 36 або 220 В. У пересувних машинах використовують також двигуни загального призначення на напругу 380/220 В.

Спеціалізованими заводами по виготовленню ручних машин застосовуються наступні умовні позначки електродвигунів: КН - колекторний нормальної частоти струму; КНД - колекторний нормальної частоти струму з подвійною ізоляцією; АН - асинхронний нормальної частоти струму; АП - асинхронний підвищеної частоти струму. Наступні за буквами цифри позначають габарит двигунів (діаметр і довжину активної сталі статора або індуктора).

В силу ручного використання цієї групи електричних механізмів особливу увагу при їхній розробці приділяють питанням електричної ізоляції.

18.2. Ізоляція електричних ручних машин

ЕРМ випускають трьох класів виконання за напругою й ізоляцією:

I клас - на номінальну напругу 220 В, в яких хоча б одна металева деталь, доступна для дотику, відділена від частин, що перебувають під напругою тільки робочою ізоляцією;

II клас - на номінальну напругу 220 В, в яких всі металеві деталі, доступні для дотику, відділені від частин, що перебувають під напругою, подвійною або посиленою ізоляцією;

III клас - на номінальну напругу 36 В.

ЕРМ першого класу небезпечні відносно ураження робітника електричним струмом. При роботі їх необхідно надійно заземлювати, використовувати гумові килимки й діелектричні рукавички, але навіть при цьому в будівельних умовах їх не скрізь дозволяється експлуатувати. Повна електробезпека роботи з машинами I-го класу може бути забезпечена тільки при підключенні їх до мережі через захисно-відключний пристрій, що гарантує відключення машини від мережі у разі витoku струму й короткого замикання обмоток двигуна. Час спрацьовування захисту не більше 0,05 с.

ЕРМ другого класу (з подвійною ізоляцією) - найбільш прогресивні, тому що вони можуть живитися від освітлювальної мережі, їх не потрібно заземлювати, при цьому забезпечується повна електробезпека роботи при дотриманні правил експлуатації. Подвійна ізоляція машин здійснюється двома основними способами: статор (індуктор з котушками) двигуна, щітковий механізм, вимикач і всі струмопровідні (сполучні) проводи розміщені в корпусі і рукоятці з ізоляційного матеріалу (високоміцна пластмаса), а вал ротора (якоря) має електроізоляційну втулку, що ізолює його від ротора (якоря) і колектора (рис. 18.1); статор (індуктор з котушками) двигуна, щітковий механізм і всі струмопровідні (сполучні) проводи змонтовані в пластмасовому або алюмінієвому корпусі, який монтується в захисному пластмасовому корпусі. До корпусу кріпиться рукоятка, в якій встановлений електровимикач і струмопровідний кабель (як варіант пластмасова втулка може бути поміщена між статором і зовнішнім металевим корпусом). Вал двигуна не має проміжної ізоляційної втулки, замість втулки другою ізоляцією служить ведена шестірня з електроізоляційного матеріалу (пластмаса, текстоліт). Шестірня може мати тільки маточину з електроізоляційного матеріалу, а вінець - сталевий.

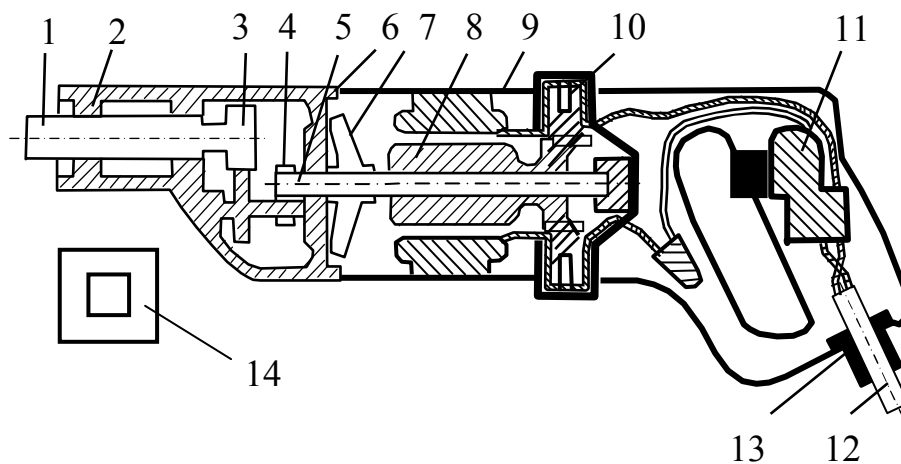


Рис.18.1 - Ручна електрична свердлильна машина:

- 1- шпиндель; 2 - металевий корпус редуктора; 3 - редуктор; 4 - ізоляційна шестірня;
- 5 - вал; 6 - проміжний пластмасовий щит; 7 - пластмасовий вентилятор; 8 - якір;
- 9 - пластмасовий зовнішній корпус; 10 - ковпачок щікотримача; 11 - вимикач;
- 12 - струмопровідний кабель; 13 - захисна гнучка трубка; 14 - умовне позначення на корпусі машин з подвійною ізоляцією

Машини II класу (з подвійною ізоляцією) на корпусі або на заводському щитку мають спеціальний знак (рис. 18.1).

Машини III класу в роботі безпечні і повинні одержувати живлення від автономних джерел струму або від мережі через трансформатори або перетворювачі частоти струму, якщо в машині вбудований двигун підвищеної частоти.

18.3. Приклади конструкцій електричних ручних машин

Існують різні конструкції дрилів, електропилوک, електрорубанків, електрошліфувальних машин, електромагнітних перфораторів і інших електрифікованих ручних інструментів, але силове електрообладнання їх завжди будується на основі електродвигунів обертового руху або на базі тільки зворотно-поступальних рухових пристроїв, або являє собою комбінований електромеханізм з обертовим ударним елементом зворотно-поступальної дії.

18.3.1. Комбінований електромеханізм. Прикладом ручного електроінструмента, який застосовують як електробур і електромолоток, служить електромагнітний перфоратор, наприклад типу ІЕ-4709 Б (рис. 18.2). Цей перфоратор підключається гнучким переносним проводом до мережі напругою 220 В і частотою 50 Гц, споживана сила струму в номінальному режимі 3,2 А, споживана потужність - 650 Вт.

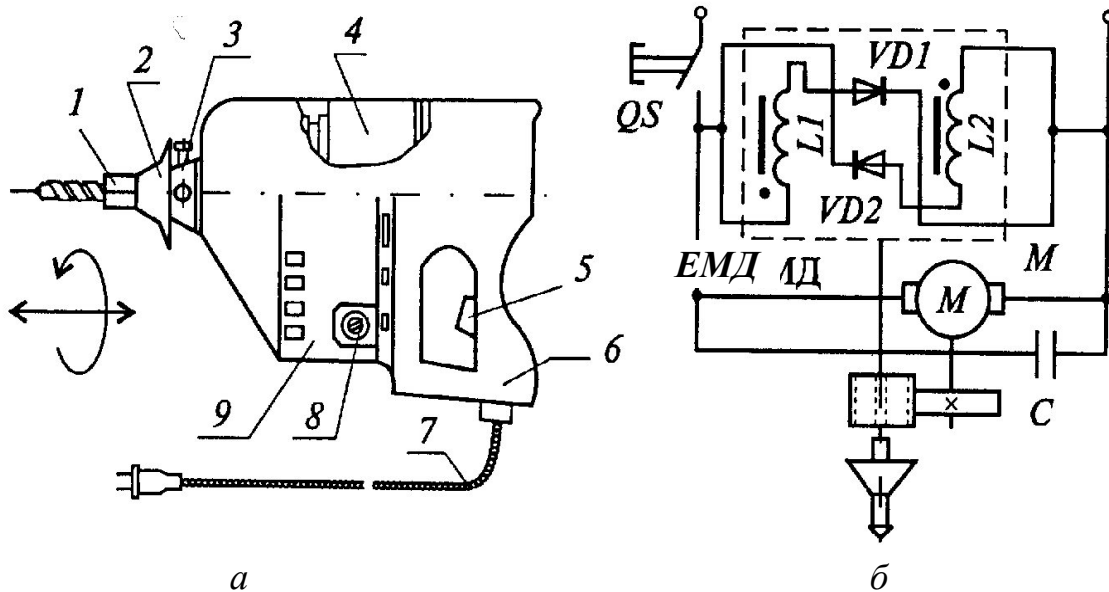


Рис. 18.2 - Електромагнітний перфоратор:

- (а) – будова; (б) - принципова схема: 1 - робочий орган; 2 - гумовий фартух; 3 - букси; 4 - двигун; 5 - вимикач з самоповерненням; 6 - ручка; 7 - провід; 8 - отвір; 9 - корпус

18.3.2. Вібратори. Вібраторами називають вібраційні машини, призначені для збудження механічних коливань. Вони являють собою машини, які перетворюють механічну, електричну або хімічну енергію на механічні коливання і передають їх матеріалам або пристроям. Коливання характеризують амплітудою A , тобто найбільшим відхиленням від середнього положення, вимірюваним у міліметрах, і частотою n , тобто числом періодів коливань в одиницю часу (1 с).

Ефективне ущільнення бетонної суміші вібруванням досягається лише при певних значеннях амплітуди й частоти, при яких виникають прискорення, що знижують сили внутрішнього тертя між частками суміші настільки, що вони починають переміщуватися відносно одна одної під дією сили ваги. На практиці застосовують вібратори з частотою коливань $n = 25-250 \text{ с}^{-1}$ і амплітудою коливань 0,1-3 мм (більші значення амплітуди для менших значень частоти).

За видом привода вібратори підрозділяють на електромеханічні, електромагнітні, пневматичні, гідравлічні й моторні, що приводяться до дії двигунами внутрішнього згоряння. Найбільше поширення одержали електромеханічні інерційні вібратори з обертовими неврівноваженими вантажами, закріпленими на валу ротора електродвигуна або на окремому валу, що отримує обертання від електродвигуна через муфту або клиноремінну передачу.

Поверхневі і зовнішні вібратори. Найбільш широко застосовують електромеханічні вібратори відцентрового типу, в яких інерційний елемент у вигляді дебаланса або бігунка робить обертний рух і передає виникаючу при цьому відцентрову силу на підшипники вала дебаланса або опору бігунка.

Електромеханічний дебалансний вібратор ІВ-70 (рис. 18.3) складається з корпусу, електродвигуна й дебалансного віброзбуджувача. В алюмінієвому корпусі 1 з підшипниковими щитами 4 розташований трифазний асинхронний електродвигун, до обмоток статора 3 якого струм поступає через клемну коробку 2, а ротор 5 укріплений на валу 6. Вал опирається на підшипники 7, а на консольних частинах вала укріплені дебаланси 8, закриті кришками 9. Кришки стягнуті шпильками 10 і щільно примикають до корпусу, в нижній частині якого перебувають настановні лабети з отворами під болти кріплення вібратора до коритоподібної основи, опалубки або інших елементів конструкції, через яку коливання передаються часткам бетонної суміші.

При поверхневому ущільненні бетонної суміші основа вібратора передає ефективні коливання на глибину до 20 см. Поверхневий вібратор, встановлений на рейці, може служити для розрівнювання і поверхневого ущільнення бетонної суміші на великій площі. Вібратор, якщо його від'єднати від рейки й основи, може бути використаний як зовнішній вібратор для надання коливань опалубці, ринві, стінці бункера. Він має два здвоєних дебаланси, які являють собою сталеві циліндричні деталі, ексцентрично укріплені на валу. Оскільки центр маси дебаланса зміщений відносно осі вала, то при обертанні вала й дебалансів виникає відцентрова сила інерції, що надає вібратору змушені коливання. Частота коливань дорівнює частоті обертання дебалансів, а амплітуда коливань залежить від маси коливних частин і статичного моменту маси дебалансів, під якою мають на увазі добуток маси дебалансів на ексцентриситет маси, тобто на відстань від осі обертання до центра маси дебалансів.

Оскільки зовнішній дебаланс в кожній парі має чотири шпонкових пази, його можна встановити під різними кутами відносно внутрішнього, змінюючи загальний ексцентриситет маси здвоєного дебаланса. Коли осі дебалансів збігаються, ексцентриситет маси найбільший, а при збільшенні кута ексцентриситет маси зменшується, оскільки загальний центр маси для розсунутих дебалансів, лежить посередині лінії, що з'єднує центри маси кожного дебаланса, і відстоїть

від осі обертання на меншій відстані. Відповідно зменшуються статичний момент маси дебалансів і змушуюча сила, яку вони викликають.

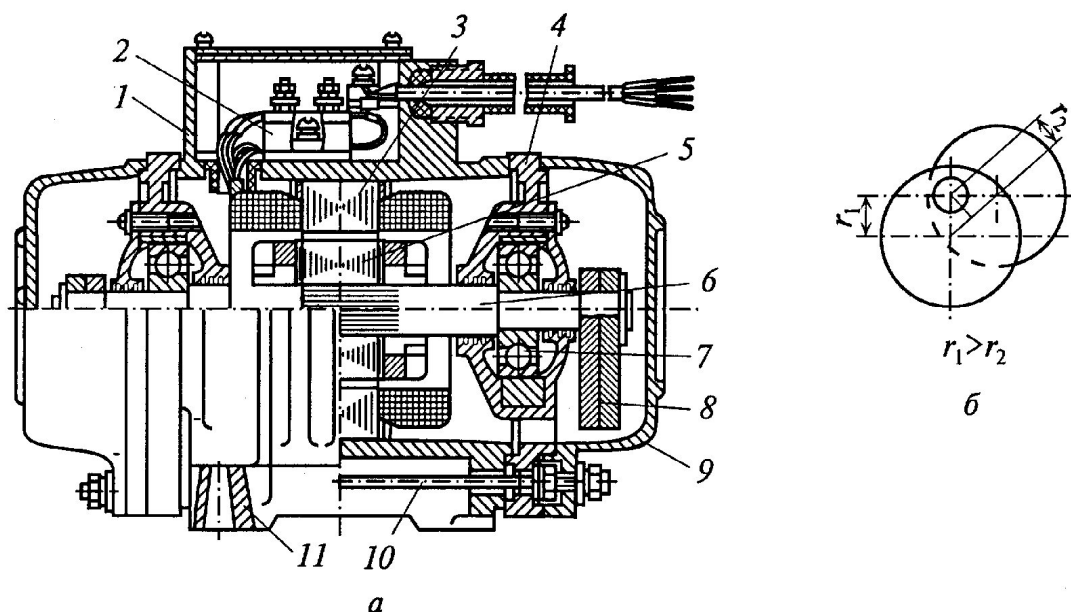


Рис. 18.3 - Електромеханічний дебалансний однофазний вібратор ІВ-70 з круговими коливаннями:

а - загальний вид; **б** - схема регулювання дебаланса; **1** - корпус; **2** - клемна коробка; **3** - обмотка статора; **4** - щити; **5** - ротор; **6** - вал; **7** - підшипник; **8** - дебаланси; **9** - кришки; **10** - шпильки; **11** - настановні лабети

Вібратор ІВ-70 при частоті 2800 хв^{-1} і відповідній установці зовнішніх дебалансів генерує змушуючу силу, рівну 2; 2,5; 3, 15 і 4 кН. Живлення електродвигуна здійснюється від мережі змінного трифазного струму напругою 220/380 В і частотою 50 Гц. Потужність електродвигуна 0,4 кВт, маса вібратора 20 кг. При безпосередньому обслуговуванні вібратора, наприклад при поверхневому ущільненні бетонної суміші, напруга 220/380 В являє велику небезпеку для обслуговуючого персоналу. В цьому випадку використовують аналогічний за будовою вібратор ІВ-68, який розвиває при частоті 1400 хв^{-1} змушуючу силу у 5 кН і має електродвигун, що живиться струмом напругою 36 В від понижувального трансформатора. Зовнішні вібратори прикріплюють до опалубки, тічкам, бункерам. Їхні електродвигуни живляться струмом безпосередньо від мережі напругою 220/380 В і не вимагають понижувальних трансформаторів, що особливо зручно при використанні великої кількості вібраторів.

Внутрішні (глибинні) вібратори застосовують для ущільнення бетонної суміші при виготовленні великих збірних будівельних елементів, насичених арматурами, а також при спорудженні монолітних залізобетонних конструкцій. Їхня робота досить ефективна, тому що корпус вібратора впливає безпосередньо на бетонну суміш. Внутрішні вібратори виготовляють з вбудованим електродвигуном, що обертає дебалансний вал у корпусі, і з винесеним електродвигуном, що передає обертання віброелементу гнучким валом.

18.4. Експлуатація і ремонт електричних ручних машин

Правила техніки безпеки експлуатації електричних машин, а також ремонт і випробування після ремонту загальні для всіх видів машин і обладнання з електричним приводом. Однак є додаткові вимоги, що ставляться до ручних електричних машин, особливо до машин з подвійною ізоляцією (II класу):

ручні машини (поза робочим часом) повинні зберігатися в сухих опалювальних приміщеннях;

повинен бути організований облік робочого часу;

при видачі машини в роботу її необхідно оглянути, перевірити на холостому ходу чіткість роботи вимикача, а також справність (опір) ізоляції мегомметром на 500 В при включеному вимикачі;

забороняється застосовувати для роботи машини, а також слід припинити роботу у випадках: виявлення тріщин на корпусних деталях і рукоятці; ушкодження кришок щіткотримача, нечіткої роботи вимикача; пошкодження штепсельного з'єднання, кабелю або його захисної трубки; колового вогню на колекторі; диму або запаху, характерного для палаючої ізоляції;

забороняється працювати в приміщеннях вибухонебезпечних або з хімічно активним середовищем, що руйнує ізоляцію, а також на відкритих майданчиках під час випадання опадів (дощ, сніг);

оператор повинен дотримувати гранично припустимої тривалості роботи й не допускати перевантажень, понад зазначених у паспорті, а також не піддавати машину ударам. Слід мати на увазі, що при збільшенні навантаження (посиленні подачі) понад паспортну на машину з асинхронним двигуном, що має «жорстку» характеристику, він буде перекидатися (зупинятися), що викличе, в кінцевому підсумку, передчасне згоряння обмотки. Колекторний двигун має «м'яку» характеристику, тому він буде знижувати оберти. При цьому збільшується споживана потужність, в результаті двигун буде перегріватися понад припустиму норму, а продуктивність знизиться, тому що оберти шпинделя не будуть оптимальними;

необхідно стежити за температурою корпуса двигуна, яка не повинна перевищувати 60°C (практично, якщо долоня руки не витримує дотику до корпуса двигуна, то він перегрівся понад норму);

щодня після закінчення роботи машину потрібно очищати від забруднень, а при необхідності підтягувати кріпильні деталі.

При експлуатації ручних машин з подвійною ізоляцією необхідно пам'ятати, що:

заземлювати їх не можна;

застосування індивідуальних засобів захисту (гумові килимки, діелектричні рукавички) не потрібне;

дозволяється виконувати роботи в приміщеннях і на відкритих майданчиках із земляною, бетонною, асфальтовою, металевою, дерев'яною та іншою підлогами, а також на металоконструкціях, у казанах, трубах та ін.;

машини можна використовувати при температурі від - 35°C до + 35°C і відносній вологості до 90% при температурі +20°C;

через кожні 50 годин роботи рекомендується очищати колектор і щітковий механізм від вугільного пилу; продувати машину очищеним стисненим повітрям під тиском до 0,15 мПа;

необхідно періодично проводити контроль машин. Контроль ручних машин з подвійною ізоляцією необхідно проводити через кожні 100 годин роботи, але не рідше одного разу в три місяці. Контроль необхідний також при кожній зміні щіток.

При контролі машину з подвійною ізоляцією розбирають, при цьому:

видаляють струмопровідний пил; перевіряють мегомметром робочу й додаткову ізоляцію (опір кожної з них повинний бути не менше за 2 МОм); струмопровідний пил видаляють стисненим повітрям при тиску до 0,15 мПа й протирають ізоляційні поверхні технічною серветкою, змоченою в бензині;

оглядають корпусні деталі, струмопровідний кабель і штепсельне з'єднання;

після зборки машини проводять випробування електричної міцності ізоляції машини при включеному вимикачі напругою 2500 В, частоти 50 Гц протягом 1 хв на високовольтній установці, наприклад приладом УПУ-1М (електроди при випробуванні прикладають до одного з контактів штепсельної вилки й до металевих деталей машини, доступних для дотику під час роботи);

якщо при контролі машини будуть виявлені будь-які дефекти, то вона повинна бути здана в ремонт.

Ремонт машин проводять тільки в спеціалізованій майстерні підготовленим для цього персоналом. Після проведення ремонту кожен машину піддають випробуванням у лабораторних умовах.

Контрольні запитання з теми 18

1. Які електродвигуни застосовуються в ЕРМ?
2. Яку ізоляцію застосовують в ЕРМ?
3. Поясніть будову ручної електричної свердлильної машини.
4. Поясніть схему електромагнітного перфоратора.
5. Поясніть будову і принцип дії електромеханічного дебалансного вібратора ІВ-70.
6. Які правила безпеки при роботі з ЕРМ?
7. Які правила безпеки при ремонті ЕРМ?

ТЕМА 19

ЕЛЕКТРОПРОГРІВ БЕТОНУ І ҐРУНТУ

Ключові поняття: електропрогрів бетону (електродний, індукційний, інфрачервоний, непрямий, електропрогрів поза формою), електропропарювання, електропрогрів ґрунту.

На теплову обробку бетону витрачається близько 70% часу, необхідного для виготовлення залізобетонних виробів. Тому на практиці застосовують різні методи теплової обробки бетону, що забезпечують зниження часу на цю операцію. До таких методів належить електричне нагрівання як у процесі формування бетонної суміші, так і під час знаходження її у формах. При наявності попереднього електропрогріву бетонної суміші й форм час теплової обробки бетону може бути істотно знижений до декількох годин.

19.1. Електропрогрів бетону

Існує кілька методів електротермообробки бетону.

Електродний наскрізний - електроди розміщені вертикально до товщі бетону. Застосовується для збірних і монолітних фундаментів, стін, блоків.

Електродний периферійний - електроди закріплюють в опалубці в спеціальних щитах або термоактивному шарі тирси, змоченої розчином хлористого натрію (NaCl). Застосовується для однобічного прогріву конструкцій товщиною більше за 20 см або двостороннього - до 20 см.

Індукційний - виріб розміщається у змінному магнітному полі, утвореному електричною обмоткою, і нагрівається вихровими струмами. Застосовується при прогріві збірних і монолітних конструкцій: колон, балок, рам, стовбурів, труб та ін.

Інфрачервоний прогрів високотемпературними нагрівачами за допомогою ламп розжарювання, трубчастих, дровових та інших нагрівачів. Застосовується для прогріву монолітних конструкцій складної конфігурації і при сушінні виробів.

Непрямий прогрів низькотемпературними нагрівачами за допомогою трубчастих, плоских, струнних та інших нагрівачів, вмонтованих до опалубки або матів. Застосовується для усіх видів виробів.

Інфрачервоний прогрів у камерах з випромінювальними поверхнями. Застосовується при виготовленні плит і панелей.

Електропрогрів бетонної суміші поза формою, при якому суміш у гарячому стані укладається у форму. Застосовується для зведення монолітних конструкцій і при виготовленні виробів у заводських умовах.

Прогрів електродним способом може здійснюватися тільки змінним струмом, тому що постійний струм викликає необоротні хімічні реакції, які змінюють структуру бетону. Опір електричного кола залежить від питомого опору бетону, поверхні зіткнення з бетоном і відстані між електродами. Електропровідність бетону залежить від вмісту в ньому вологи і в міру твердіння бетону зменшується.

Для підтримки розрахункового тепловиділення до бетону вводять різні домішки - CaCl , NaCl , що прискорюють твердіння і зменшують опір бетону.

Застосовувані при прогріві електроди підрозділяються на пластинчасті, смугові, стрижневі і струнні (рис. 19.1). Для перших двох видів застосовують покрівельну сталь, для інших - прутки діаметром 5-12 мм. Пластинчасті електроди мають вигляд пластин, що повністю або частково закривають протилежні площини по товщині виробу. Струнні електроди закріплюють уздовж осі довгомірних конструкцій. Відстані між електродами беруть відповідно до рис. 19.1.

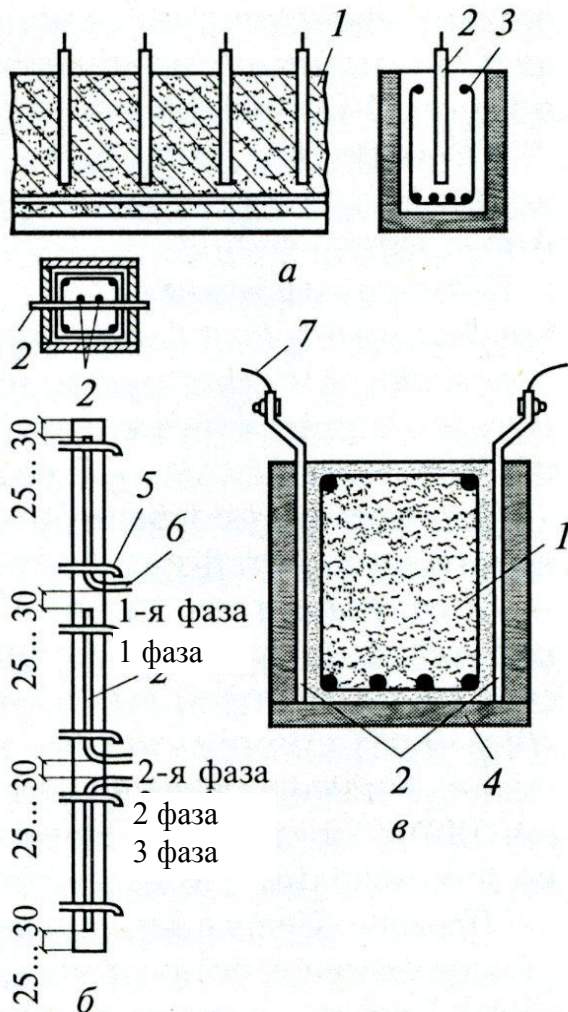


Рис.19.1 - Електродний метод електропрогріву бетону:

а - за допомогою стрижневих електродів;

б - струнних; в - пластинчастих;

1 - бетон; 2 - електроди; 3 - арматура; 4 - опалубка; 5 - гаки; 6 - виводи електродів для приєднання до живильної мережі; 7 - прово-

Особливо важливим є електропрогрів у зимовий час. Замерзання бетону в процесі твердіння знижує його міцність, причому тим більше, чим раніше він був заморожений. При досягненні бетоном 50...60% міцності заморожування не впливає на кінцеву міцність бетону. Виходячи з цього вибирають режим прогріву. Тривалий режим застосовують для масивних конструкцій, прискорений - для полегшених конструкцій, проміжний - для інших конструкцій.

Крім того, можливо застосування таких режимів: ступеневий режим з декількома ізотермічними ступенями (застосовують для монолітних попередньо навантажених конструкцій), режим «ізотермічний прогрів і остигання», при якому прогрів здійснюється за методом електророзігріву поза формою (застосовується для монолітних конструкцій), саморегулюючий режим з постійною напругою струму прогріву (для масивних конструкцій), імпульсний режим з поперемінним відключенням струму. Максимальна температура процесу обмежується гранично припустимою для певної марки бетону (звичайно 40-80°C).

Електропрогрів бетону здійснюється за допомогою спеціальних трифазних трансформаторів з масляним охолодженням із зміною напруги ступенями. Поряд з ними можуть бути використані однофазні, в тому числі зварювальні трансформатори, що підключаються трифазними групами. Зварювальні трансформатори розраховані на повторно-короткочасний режим, і їхнє безперервне навантаження при прогріві повинне становити 60-70% номінального.

Електропроводку від знижувальних трансформаторів до місця електропрогріву виконують тільки ізольованими проводами з кріпленням на дерев'яних опорах, на ізоляторах або спеціальних переносних опорах у вигляді козел. Щоб уникнути втрат у лініях трансформатори повинні розташовуватися якнайближче до електродів у місці прогріву бетону. Контакти сполучних проводів з електродами та іншими проводами забезпечують за допомогою болтів або знімних затискачів.

Перед включенням вторинної мережі трансформатор перевіряють в режимі холостого ходу, при цьому перевіряють також можливість регулювання вторинної напруги. Під час роботи треба стежити за допомогою амперметрів або вимірювальних кліщів за рівномірним навантаженням на фазах.

У міру твердіння бетону його опір зменшується. Для підтримки струму необхідно зменшувати напругу на виході трансформатора.

Вимір температури бетону при електропрогріві роблять термометрами в шпарах, заздалегідь заготовлених, не менше трьох у кожному конструктивному елементі. У перші 5-6 годин температуру вимірюють щогодини, у наступні 18 годин - через 2 години і далі - 2 рази в зміну.

Для електропрогріву бетону, цегельної кладки, оштукатурених поверхонь використовують зовнішні джерела тепла. Електропрогрів виробів з використанням зовнішніх джерел тепла, на відміну від електродного прогріву, відбувається за рахунок тепла, що виділяється поза конструкцією й передається бетону через проміжні матеріали (тирсу, воду, повітря, пар, металеві стінки) або за рахунок випромінювання. Оскільки зовнішній електропрогрів менш економічний, ніж електродний, його застосовують тільки для виробів складної конфігурації.

Прогрів бетону електричними печами опору. В електричних печах опору, застосовуваних для непрямого прогріву бетону, нагрівальним елементом служить ніхромовий або фехралевий дріт. Найпростіша піч, призначена для електропрогріву бетонних і залізобетонних виробів невеликої товщини, являє собою дерев'яну ринву параболічної форми з шпунтованих дощок товщиною 40 мм.

Для прямого електропрогріву використовують інвентарні електрощити. Електрощит являє собою раму з сталевих кутиків, усередині якої на сталевому листі товщиною 1 мм по шару тонкої ізоляції покладений нагрівальний сталевий або ніхромовий дріт. Зверху дріт ізольований листовим азбестом і шаром мінеральної вати товщиною 20-30 мм, захищеним листом дахового заліза. При прогріві кілька таких щитів включаються послідовно. Температуру бетону регулюють включенням у коло різного числа електрощитів.

Для прогріву залізобетонних труб і кілець використовують циліндричні печі з нагрівальною спіраллю, намотаною на шматок асбоцементної труби.

Електропрогрів за допомогою термоактивного шара. Конструкцію, що прогривається, покривають шаром тирси, змоченої для підвищення електропровідності слабким розчином солі (3-5 %). В тирсу закладають електроди з круглої або смугової сталі, що включаються до мережі. При включенні струму тирса нагрівається й тепло передається конструкції. Для збільшення електропровідності тирси її після засипання злегка пресують. Температура тирси підтриму-

ється на рівні 80-90°C. Необхідна потужність в період підйому температури 7-8 кВт на 1 м³ бетону, а витрата електроенергії на прогрів такого ж обсягу бетону досягає 120-160 кВт·год.

Прогрів за допомогою термоформ з нагрівальними елементами. При електропрогріві збірних залізобетонних виробів застосовують панелі із струмопровідної гуми. Електропровідність такої гуми створюється за рахунок великого вмісту в ній сажі. Нагрівальні панелі мають середній струмопровідний шар товщиною 2 мм, в який забиті електроди з латунної сітки або смуги, і два зовнішніх шари із звичайної гуми товщиною 0,5 мм.

Важливою перевагою цього способу є герметизація виробу в процесі його прогріву, що виключає випар вологи з бетону.

Електропропарювання. Парове середовище в пропарювальній камері створюється за допомогою електричних нагрівальних елементів-спіралей або електродів, установлених в нижній частині камери. Потужність нагрівальних пристроїв визначається з розрахунку 7-8 кВт на 1 м³ виробів, що прогриваються. До нагрівачів подається мережева напруга. Для прискорення нагрівання виробу рекомендується застосовувати замість води 0,5%-ний розчин повареної солі.

Спосіб електропропарювання залізобетонних виробів застосовують для виробів складної конфігурації.

Електропрогрів інфрачервоними променями. При інфрачервоному прогріві, на відміну від інших способів зовнішнього обігріву бетону, забезпечується безпосередня передача теплової енергії від джерела випромінювання до виробу, що нагрівається. Як джерела інфрачервоного випромінювання використовують лампи розжарювання типу ЗН потужністю 300 і 500 Вт при напрузі 127 і 220 В. Застосовують також звичайні лампи розжарювання потужністю 200-500 Вт.

Потужність, необхідна для електропрогріву бетону, яка є одним з основних факторів, що визначають вибір електрообладнання і розрахунок живильної мережі, залежить від модуля поверхні конструкції, що прогривається, температури прогріву, температури зовнішнього повітря, початкової температури бетону, конструкції опалубки, ефективності утеплення й особливо від швидкості розігріву бетону.

Як джерела живлення для електропрогріву застосовують, як правило, трансформатори. При електротермообробці бетону для підтримки заданого режиму застосовують трансформатори із східчастим регулюванням напруги, автотрансформатори й індукційні регулятори. Трансформатори вибирають за потужністю і напругою.

Випускається комплектна трансформаторна підстанція зовнішньої установки КТП-ОБ-63В1, призначена для електропрігреву ґрунту і бетону. У КТП установлений трансформатор ТМОБ-63 номінальною потужністю 63 кВА.

Орієнтовний розрахунок витрати електроенергії (W) і необхідної потужності (P) для електропрогріву бетону виконують відповідно за формулами

$$W = W_{\text{пит}} V; \quad P = \rho V, \quad (19.1)$$

де $W_{\text{пит}}$ - питома витрата електроенергії, кВт·год/м³; ρ - питома потужність на 1 м³ бетону, кВт/м³; V — обсяг бетону, м³.

Питома витрата електроенергії $W_{пит}$ (кВт·год/м³) при прогріванні бетону різними способами:

електродний спосіб прогріву.....80... 120,
 індукційний - // - 120...150,
 інфрачервоний - // - 100...200.

Таблиця 19.1 - Питома потужність для електропрогріву бетонних конструкцій, кВт/м³

Температура повітря, °С	Температура прогріву, °С	
	40	80
0	7,7...9,3/15,6...18	8,3...10,4/16,2...19,2
-5 -30	8,2...10,1/16,1...18,9	8,7...11,2/16,6...20
	8,6...10,9/16,5...19,7	9,1...12/15...25

Примітка. Перед рискою вказані межі питомої потужності при швидкості підвищення температури при нагріванні 10°С/год, після риски - 20°С/год.

19.2. Електропрогрів ґрунту

Електропрогрів ґрунтів застосовують в тих районах, в яких є вільна електрична потужність (наприклад, поблизу потужних гідроелектростанцій).

Існує кілька способів електропрогріву ґрунтів, з яких найбільш зручним, дешевим і безпечним є електродний спосіб з безпосереднім підключенням установок електропрогріву до існуючих електромереж напругою до 380 В.

Електродний спосіб полягає в тому, що через ґрунт пропускається електричний струм напругою 220 або 380 В. Електропровідність ґрунту залежить від ступеня його вологості, стану й температури, наявності в ґрунті розчинів солей, кислот, від будови ґрунту та ін. Складність структури ґрунту і теплових фізичних процесі у ньому, значно впливають на його електричний опір.

Поверхню ділянки ґрунту, що прогривається, засипають на 15-25 см шаром тирси, змоченої водяним розчином солі (повареної, хлористого кальцію) або соляної кислоти, що мають призначення проводити струм і утеплювати ґрунт; навіть при нарузі 380 В струм практично не проходить через мерзлий ґрунт.

При електропрогріві ґрунту горизонтальними електродами (рис. 19.2,*а*) тепло передається ґрунту головним чином від шару тирси, що нагрівається, а участь самого ґрунту в колі струму відносно невелика. Тільки незначний верхній шар ґрунту, що прилягає до електродів, включається до електрокола і є опором, в якому виділяється тепло.

Горизонтальні електроди застосовують при відігріванні ґрунту на невелику (до 0,5-0,7 м) глибину, а також в тих випадках, коли вертикальні електроди не застосовують внаслідок малої електропровідності ґрунту або неможливості забивання їх у ґрунт, змішаний, наприклад, з щебенем.

Відігрівання вертикальними електродами (рис. 19.2,*б*) більш ефективно і застосовується при глибині мерзлого ґрунту більше 0,7 м, а також при малому контакті між горизонтальними електродами і ґрунтом. У жорсткі ґрунти (гли-

ності і піщані з вологістю більше 15-20%) електроди забивають на глибину 20-25 см, а потім вони осаджуються в міру відтавання ґрунту. При відтаванні на глибину 1,5 м рекомендується мати два комплекти електродів - коротких і довгих. У міру відтавання ґрунту короткі електроди замінюють довгими. Відігрівання ґрунту на глибину 2 м і більше слід виконувати ступенями з періодичним видаленням відталих шарів (при виключеному струмі).

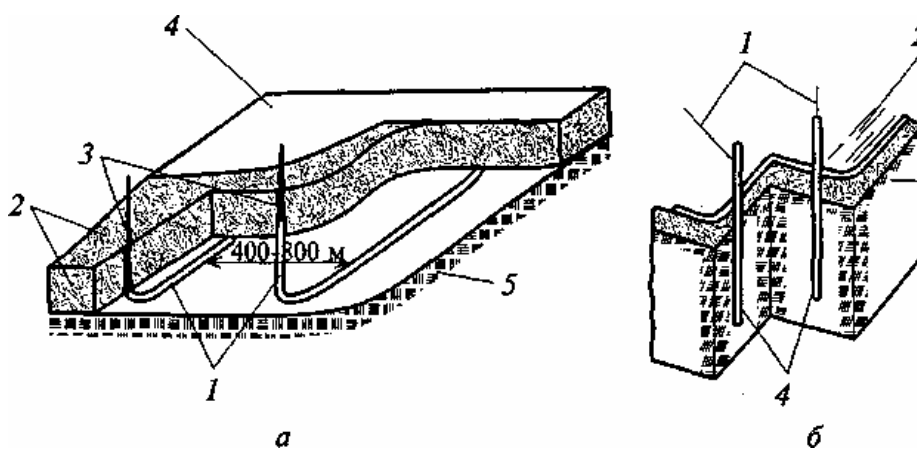


Рис. 19.2 - Електропрогрів ґрунту:

- а** - горизонтальними електродами: 1 - електроди; 2 - тирса, змочена розчином солі; 3- підведення електроенергії; 4 - верхнє утеплення (толь, мати та ін.); 5 - ґрунт;
б - вертикальними електродами: 1 - підведення електроенергії; 2 - тирса з утеплювачем; 3 - ґрунт; 4 - електроди

При вертикальних електродах ґрунт засипають тирсою, яка спочатку служить збудником для прогріву верхнього шару ґрунту. В міру відтавання шари ґрунту включаються до кола, після чого тирса тільки зменшує тепловтрати ґрунту, що відтає. Замість тирси збудником можуть служити канавки, пробиті зубилом між всіма електродами на глибину 6 см і залиті розчином солі. При покритті поверхні ґрунту, що відігривається, шаром сухої тирси, як показує практика, влаштування канавок дає дуже гарні результати.

З метою економії електроенергії і максимального використання потужності середня позитивна температура ґрунту, що прогривається, не повинна перевищувати 2-5°C, в окремих точках – 15-20°C; прогрів необхідно вести ділянками з перервами в живленні їх струмом. Необхідна потужність і витрати енергії при температурі ґрунту 15°C в середньому на кожний кубічний метр становлять 3,5 кВт при витраті електроенергії 30 кВт·год. В останні роки розроблене і впроваджене у виробництво в північних районах відігрівання ґрунту електроенергією напругою до 10 кВ.

У порівнянні з напругою 380 В застосування для електропрогріву мерзлого ґрунту електродів з напругою 10 кВ дозволяє прискорити проведення робіт і скорочує їхню вартість. Потрібна кількість електродів зменшується, а відстань між ними збільшується. Скорочується обсяг підготовчих робіт із занурення електродів у ґрунт. Основна кількість тепла виділяється біля електродів, інша частина ґрунту прогривається до негативної температури, близької до 0°C за ра-

хунок теплової енергії, акумульованої біля електродів. Грунт прогрівається знизу вгору, за рахунок чого зменшуються втрати тепла до атмосфери. Прогрів мерзлого ґрунту до температури $-1,5...-0,5^{\circ}\text{C}$ створює сприятливі умови для його розробки землерийними механізмами, оскільки при повному відтаванні ґрунт примерзає до ковша екскаватора або відвалу бульдозера. Крім того, зволожений ґрунт, вилучений у відвал, змерзається, що викликає додаткові витрати при його навантаженні в транспортні засоби або при зворотному засипанні.

19.3. Техніка безпеки при електропрогріві

Техніка безпеки при електропрогріві мерзлого ґрунту при напрузі до 10 кВ полягає в повному виключенні потрапляння людей і тварин у зону небезпечних крокових напруг. Багаторазовими вимірами встановлені величини крокових напруг у ґрунтах при робочій напрузі на електродах 10 кВ; безпечна крокова напруга 40 В спостерігалася, як правило, на відстані 9...10 м від електродів, які беруть участь у прогріві ґрунту. Напруги вимірялися між вертикальними контрольними електродами, зануреними в ґрунт на 1,5 м і на 5-7 м.

Огородження небезпечної зони електропрогріву передбачає розташування на відстані 15 м від крайніх робочих електродів багатоярусного м'якого мотузкового бар'єра, укріпленого на інвентарних дерев'яних опорах. Кінці мотузок кріпляться до важелів кінцевих вимикачів, встановлюваних на опорах. Кінцеві вимикачі спрацьовують при натягу кожної з горизонтальних мотузкових перешкод, що викликає відключення напруги, яка подається до установки електропрогріву ґрунту.

Контрольні запитання з теми 19

1. Якими методами здійснюється електротермообробка бетону?
2. Які електроди застосовують при прогріві бетону?
3. Які трансформатори застосовують для електропрогріву бетону?
4. Як здійснюється прогрів бетону електричними печами опору?
5. У чому особливості технології електропропарювання бетону?
6. У чому особливості електропрогріву інфрачервоними променями?
7. Як здійснюється електропрогрів ґрунту горизонтальними електродами?
8. Як здійснюється електропрогрів ґрунту вертикальними електродами?
9. Які основні правила техніки безпеки при електропрогріві?

ТЕМА 20

ЕЛЕКТРООСВІТЛЮВАЛЬНІ УСТАНОВКИ

Ключові поняття: сила світла, світловий потік, освітленість, джерела світла, лампа розжарювання, газорозрядна лампа, люмінесцентна лампа, ртутна лампа, освітлювальна арматура, світильник, метод питомої потужності.

20.1. Загальні відомості

Правильна організація електричного освітлення на будівельному майданчику має істотне значення для успішного виконання будівельно-монтажних робіт, особливо в осінньо-зимовий період при скороченні світлого часу доби. Недостатня освітленість робочого місця знижує продуктивність праці, погіршує якість роботи і, крім того, часто є причиною травматизму.

Достатність освітлення і його якість оцінюють показниками, для визначення яких служать світлові величини й одиниці їхнього виміру.

У Міжнародній системі одиниць (SI) основною світловою величиною є **сила світла** (позначається латинською буквою J); одиниця її виміру - *кандела* (скорочено - кд).

Друга, не менш важлива світлова величина - **світловий потік** (позначається латинською буквою F); одиниця його виміру - *люмен* (скорочено - лм).

Достатність освітлення на тій або іншій площині або в тій або іншій точці визначається величиною **освітленості** (позначається латинською буквою E); одиниця виміру освітленості - *люкс* (лк).

Для виконання точних робіт в механічних майстернях за нормами потрібна освітленість в 100-150 лк, для читання - порядку 75 лк.

Будівельними нормами і правилами встановлені мінімальні величини освітленості, необхідні для тих або інших виробничих, службових і побутових приміщень. На їхній основі розроблені норми електричного освітлення будівельних і монтажних робіт (табл. 20.1).

Освітлення може бути загальним, місцевим і комбінованим. При цьому загальне освітлення підрозділяється на рівномірне і локалізоване.

При загальному рівномірному освітленні освітлюється все приміщення або зовнішня площадка, світильники встановлюють рівномірно. При загальному локалізованому освітленні на окремих ділянках приміщення або зовнішньої території створюється більша освітленість. На таких ділянках встановлюють додаткові світильники або їх розміщують більш часто. При місцевому освітленні освітлюють тільки робочі поверхні, при комбінованому - застосовують і загальне і місцеве освітлення.

В умовах будівництва застосовують як загальне (рівномірне й локалізоване), так і комбіноване освітлення місць роботи (останнє в ремонтних заводах, майстернях та інших подібних приміщеннях).

Таблиця 20.1 - Норми освітленості будівельних і монтажних робіт

Найменування ділянок території і робочих операцій	Освітленість E , лк	Площина, у якій нормується освітленість	Примітка
Територія будівельного майданчика в районі провадження робіт	2	Горизонтальна на рівні землі	Освітлення повинне бути багатобічним
Автодороги на території будівництва з інтенсивним рухом	3	Те ж	—
Залізничні колії на території будівництва	0,5	—	—
Грабарства, вироблені земле- рийними механізмами	5-10	Горизонтальна, вертикальна	—
Монтаж будівельних конструкцій	25	Горизонтальна, вертикальна	—
Бетонування	25	На поверхні бетону	—
Опоряджувальні роботи	50	На робочій поверхні	—
Кранові і такелажні роботи	10	Горизонтальна	—
Збірка і монтаж будівельних механізмів	50	Те ж	Необхідні додаткові переносні освітлювальні засоби
Монтаж обладнання	50	На робочих поверхнях	Те ж

Крім звичайного (робочого) освітлення, влаштовують аварійне освітлення, що забезпечує мінімальну освітленість. Для аварійного освітлення влаштовують окреме живлення.

20.2. Джерела світла і освітлювальна арматура

20.2.1. Джерела світла. Як джерела світла у будівництві і у промисловості застосовують лампи розжарювання і газорозрядні лампи, які, в свою чергу, підрозділяються на ртутні лампи низького тиску - люмінесцентні і ртутні лампи високого тиску - лампи ДРЛ.

У лампах розжарювання світлова енергія виходить за рахунок нагрівання тонкої вольфрамової нитки електричним струмом, що проходить по ній. Нитка вміщена у скляну колбу, заповнену інертним газом; є також конструкції ламп розжарювання, в яких нитка вміщена у вакуум - з колби відкачане повітря. Розпечена (при температурі порядку 3000°C) нитка яскраво світиться. Колба лампи укріплена на металевому різьбовому цоколі, за допомогою якого лампа ввертається у патрон, який служить для її приєднання до проводів електричної мережі. Лампи розжарювання випускають на напруги 220, 127, 36 і 12 В. На будівельних майданчиках, як правило, застосовують лампи на 220 В. Їх випускають потужністю від 15 до 1500 Вт. Лампи розжарювання для напруг 36 і 12 В випускають потужністю від 11 до 100 Вт.

При зниженні напруги проти номінальної світловий потік і світловіддача ламп розжарювання різко знижуються. Підвищення напруги понад 105% номінальної значно зменшує термін служби лампи.

Дія газорозрядних ламп заснована на електричному розряді в середовищі розрідженого газу. В порівнянні з лампами розжарювання вони характеризуються меншим споживанням електричної енергії.

Люмінесцентна лампа (рис. 20.1,а) являє собою довгу (порядку 450-1500 мм) скляну трубку з двома цоколями на кінцях, заповнену розрідженим газом - аргоном і невеликою кількістю парів ртуті. На внутрішню поверхню трубки нанесений шар спеціального складу - люмінофора. У цоколі лампи впаєні вольфрамові електроди. При включенні лампи до електричної мережі між її електродами в парах ртуті в трубці виникає газовий розряд і невидиме ультрафіолетове випромінювання, під впливом якого люмінофор починає світитися - дає яскраве видиме світло.

Люмінесцентні лампи включають до мережі за допомогою спеціальних пускорегулюючих пристроїв (ПРП).

Люмінесцентні лампи випускають потужністю у 15, 20, 30, 40 і 80 Вт, п'яти типів за кольоровістю (фарбуванням) випромінюваного світла: ЛДЦ - денного світла, призначені для правильної світлопередачі; ЛД - денного світла; ЛХБ - холодного білого світла; ЛТБ - теплого білого світла і ЛБ - білого світла.

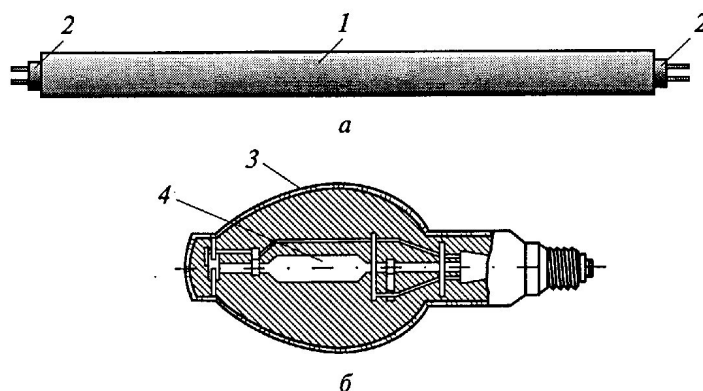


Рис. 20.1 - Газорозрядні лампи:

а - люмінесцентна; б - ртутна;

1 - трубка; 2 - цоколь; 3 - балон лампи; 4 - пальник з кварцового скла

За світловіддачею на 1 Вт потужності всі люмінесцентні лампи значно (в 2,5...4 рази) перевершують лампи розжарювання. Найбільшу світловіддачу мають лампи білого світла (ЛБ), вони рекомендуються для освітлення всіх виробничих приміщень, крім тих, де потрібне правильне розрізнення колірних відтінків.

Ртутна лампа високого тиску типу ДРЛ за зовнішнім виглядом схожа на велику лампу розжарювання. Її будова показана на рис. 20.1,б.

На відміну від люмінесцентної лампи в лампі ДРЛ електричний розряд в ртутних парах відбувається не у всій колбі, а в маленькій трубці («пальнику») з кварцового скла, прозорого для ультрафіолетових променів (рис. 20.1,б). Під впливом ультрафіолетового випромінювання пальника спеціальний люмінофор, нанесений на внутрішню поверхню колби, дає яскраве, злегка зеленувате світло (близьке до білого).

Лампи ДРЛ мають різьбовий цоколь і вгвинчуються до тих же патронів, що й лампи розжарювання. Але до мережі вони включаються так само, як і лю-

мінесцентні, за особливою схемою за допомогою спеціальних пускорегулюючих апаратів (ПРА), що містять дросель, конденсатори, розрядники та ін.

Випускають лампи ДРЛ потужністю 250, 500, 750 і 1000 Вт. Вони є високоекономічними джерелами світла.

20.2.2. Освітлювальна арматура. Правильно організоване освітлення, насамперед, повинне створювати достатню освітленість для того, щоб око людини могло легко, не стомлюючись, розрізняти всі деталі, необхідні при даній роботі. Крім того, освітлення повинне бути якомога рівномірним, без різких тіней; джерело світла не повинне бути видимим безпосередньо оком (для того щоб не було сліпучої дії).

Для створення необхідних умов освітлення, що задовольняють вказаним вимогам, служить *освітлювальна арматура*.

Освітлювальна арматура разом з вміщеною до неї лампою називається *світильником*. Основні типи світильників, застосовуваних в умовах будівництва, з лампами розжарювання, люмінесцентними і ДРЛ, представлені на рис. 20.2 - рис.20.5.

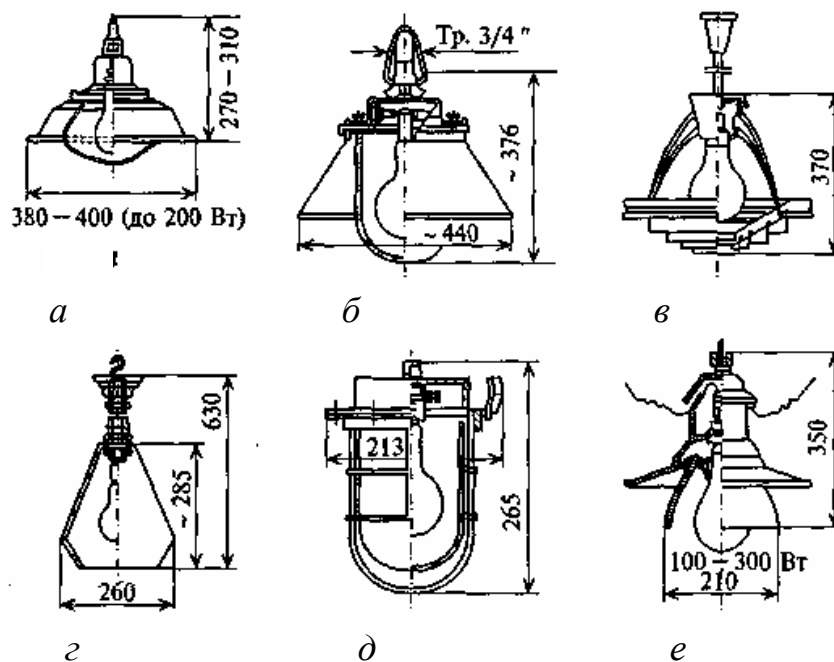


Рис. 20.2 - Світильники з лампами розжарювання:

- а – "Універсаль"; б - промисловий ущільнений (ПУ);
- в - кільцевий типу ПМ-1; г – "Люцетта"; д – рудничний нормальний (РН-100);
- е - зовнішнього освітлення типу СПО

Світильники служать для освітлення предметів, розташованих на відносно невеликих відстанях. Як освітлювальні прилади далекої дії застосовують прожектори різних типів. Для освітлення будівельних майданчиків служать прожектори заливаючого світла, які працюють із звичайними лампами розжарювання потужністю від 200 до 1000 Вт (рис.20.5).

20.3. Обладнання електричного освітлення на будівельних майданчиках

Зовнішнє освітлення території будівельних майданчиків здійснюється переважно прожекторами заливаючого світла. Прожектори (головним чином, типу ПЗС-35) встановлюють групами по 3-4 і більше на щоглах, висота яких залежить від сили світла й потужності прожекторів: чим більше сила світла прожектора, тим вище він повинен бути встановлений.

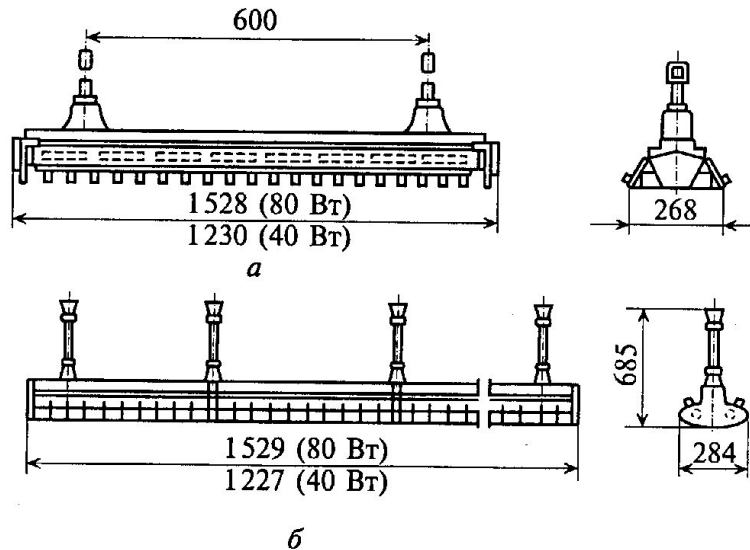


Рис.20.3 - Світильники з люмінесцентними лампами:
а - типу ОДР і ОДОР з двома лампами по 40 або 80 Вт;
б- типу ШЛД з двома лампами по 40 або 80 Вт.

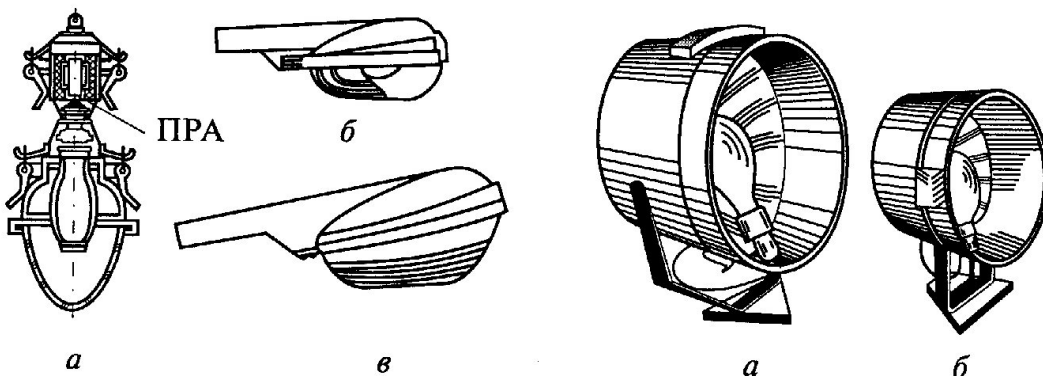


Рис.20.4 - Світильники для ртутних ламп типу ДРЛ:
а – підвісного типу;
б, в– консольного типу

Рис.20.5 - Прожектори заливаючого світла:
а – типу ПЗС-45 з лампою 1000 Вт;
б – типу ПЗС-35 з лампою 500 Вт

При цьому оптична вісь прожектора встановлюється майже горизонтально - під кутом 8-15° униз по горизонталі. Практично приймається наступна мінімальна висота установки прожекторів над рівнем землі: ПЗС-45 з лампою 1000 Вт - 21 м, ПЗС-35 з лампою 500 Вт - 13 м.

Доцільно застосовувати інвентарні переносні прожекторні щогли. Одна з конструкцій таких щогл подана на рис. 20.6.

Відстань між прожекторними щоглами вибирають звичайно від 80-100 до 200-250 м (менші цифри відносяться до прожекторів меншої потужності).

Для додаткового освітлення робочих зон застосовуються інвентарні переносні стояки з прожекторами малої потужності (з лампами 200 Вт) або із світильниками. На рис. 20.7 представлені такі інвентарні стояки. Крім того, на екскаваторах та інших великих будівельних машинах також встановлюють прожектори малої потужності, які додатково освітлюють зону роботи.

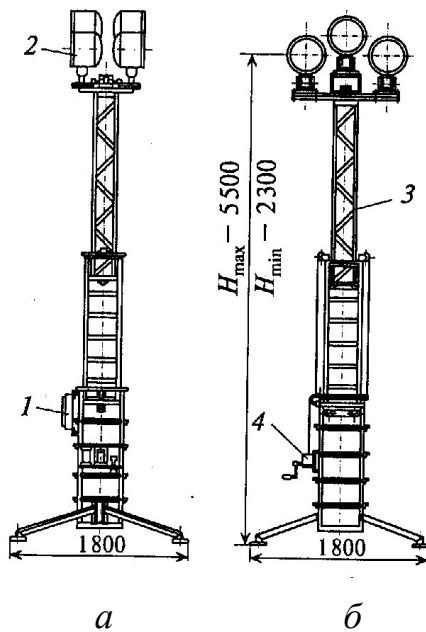


Рис. 20.6 - Інвентарна телескопічна прожекторна щогла типу ТПМ-6:
а - вигляд збоку; **б** - вигляд спереду;
1 - розподільний щиток; **2** - прожектори;
3 - металоконструкція; **4** - ручна лебідка

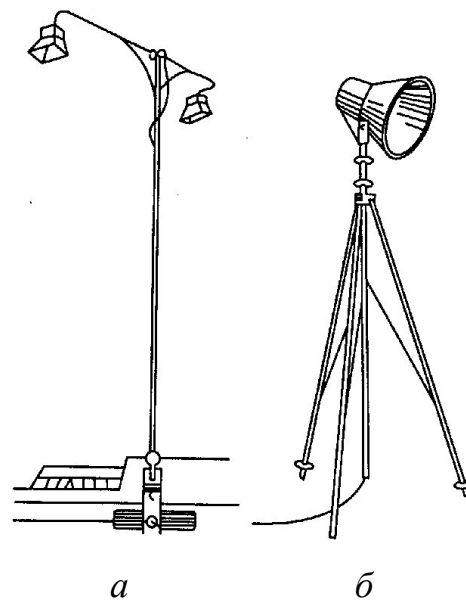


Рис. 20.7 - Інвентарні стояки із світильниками:
а - стояк телескопічний типу ПСК-2 з двома світильниками для освітлення робіт з цегельної кладки; **б** — стояк типу ПТС-2 з одним світильником для місцевого освітлення робочих зон

Освітлення доріг, які не попадають до зони, освітленої прожекторами, здійснюється світильниками з арматурами зовнішнього освітлення СПО або «Універсаль» з лампами потужністю 200-300 Вт. Світильники підвішують на кронштейнах до опор (стовпів) їхньої живильної повітряної лінії на висоті близько 6 м від землі й на відстані 25-35 м один від одного. Для цієї ж мети, а також і для освітлення окремих майданчиків території будівництва з успіхом можуть застосовуватися світильники з більш економічними ртутними лампами типу ДРЛ.

Загальне освітлення виробничих підприємств будівництва здійснюється або лампами розжарювання, або люмінесцентними лампами за допомогою світильників (рис. 20.2 і 20.3).

Для сухих виробничих приміщень застосовують світильники «Універсаль», кільцеві ПМ-1 з лампами розжарювання або світильники типів ОД і ОДР з люмінесцентними лампами. Сирі і пильні приміщення освітлюють ущільненими світильниками типу ПУ або РН з лампами розжарювання; можуть застосовуватися також світильники «Універсаль». Світильники підвішують звичайно на висоті 2,5-3,5 м над робочими поверхнями, відстань між ними приймають приблизно рівною подвоєній висоті підвісу. Місцеве освітлення робочих місць у майстернях виконують за допомогою світильників, що випускаються для цих цілей, АМО-60 і іншими з лампами розжарювання. Для тимчасового освітлення споруджуваних будинків використовують ті ж перелічені вище світильники з лампами розжарювання. На додаток до загального освітлення застосовують, як правило, місцеве освітлення робочих зон, для чого використовують інвентарні переносні стояки й підвісні пристрої із світильниками. За вимогами техніки безпеки тимчасове освітлення будинків рекомендується влаштовувати на зниженій напрузі (36 В), одержуваній від понижувальних трансформаторів. Якщо ж тимчасове освітлення має напругу 220 і 127 В, світильники, відповідно до правил, повинні бути підвішені на висоті не менше 2,5 м від підлоги або настилу; при цьому необхідно звернути особливу увагу на стан ізоляції проводів тимчасової проводки, цілісність ізолюючої оболонки патронів та ін.

20.4. Норми освітленості, спрощені способи розрахунку освітлювальних установок

В умовах будівництва в ряді випадків (при відсутності проекту електричного освітлення) може трапитися необхідність визначення кількості й потужності освітлювальних приладів - прожекторів або світильників - для створення необхідної за нормами освітленості на тому або іншому майданчику території будівництва або в будь-якому приміщенні. Для цих цілей найбільш зручний простий метод розрахунку, що називається *методом питомої потужності*.

Розглянемо порядок розрахунку за цим методом. Дані за нормами освітленості, якими необхідно керуватися при розрахунку, наведені в табл. 20.2.

Зовнішнє прожекторне освітлення. Число прожекторів, необхідне для освітлення заданої площі, за методом питомої потужності визначають за формулою

$$N = \omega \cdot E \cdot S / P_{\lambda}, \quad (20.1)$$

де ω - питома потужність ламп прожекторів, що доводиться на 1 м² освітлюваної площі й 1 лк освітленості (її слід приймати: для прожекторів ПЗС-35 - рівною 0,25÷0,4 Вт/(м²·лк), а для прожекторів ПЗС-45 - рівною 0,2÷0,3 Вт/(м²·лк)); E - освітленість, лк (див. табл. 20.1); S - площа, що підлягає освітленню, м²; P_{λ} - потужність лампи прожектора, Вт.

Приклад 1. Необхідно освітити прожекторами будівельний майданчик розміром 205 x 100 м.

За даними табл. 20.1 слід прийняти освітленість (E) майданчика на рівні землі рівною 2 лк.

Тип прожекторів приймаємо ПЗС-35 з лампою 500 Вт.

Знаходимо освітлювану площу: $S = 205 \times 100 = 20500 \text{ м}^2$.

Питому потужність прожекторів (ω) приймаємо рівною 0,30 Вт/(м²·лк).

Визначаємо число прожекторів за формулою (20.1): $n = 24,6$ шт.

Треба встановити 24 прожектори на шести щоглах висотою порядку 13 м, розмістивши щогли по контуру майданчика.

Внутрішнє освітлення. Розрахунок загального освітлення усередині виробничих, адміністративно-управлінських та інших будинків, а також у приміщеннях споруджуваних будинків виконують аналогічним методом питомої потужності.

Дані, необхідні для проведення найпростіших розрахунків, наведені в табл. 20.2.

Таблиця 20.2 - Питома потужність загального рівномірного освітлення світильником "Універсаль" без затінювача з лампами розжарювання

Розрахункова висота, м	Площа приміщення, м ²	Питома потужність ω' (Вт/м ²) при мінімальній освітленості (лк), рівній					
		20	30	50	75	100	150
2-3	25-50	6,4	8,6	13,8	19,5	24,5	35
	50-150	5,3	7,2	11,4	16,3	21	29
	150-300	4,7	6,4	10,2	14,3	18,5	26
3-4	30-50	6,4	8,9	14,5	20,5	25	35
	50-120	5,5	7,6	12	17	21,5	29,5
	120-300	4,7	6,6	10,2	14	18	25

Наведемо хід розрахунку з використанням цих таблиць. Визначають за табл. 20.1 величину освітленості, що відповідає заданим умовам. Вибирають для даного приміщення тип світильника, намічають (відповідно до розмірів приміщення) розрахункову висоту підвісу світильників. Потім з табл. 20.2 знаходять для даного типу світильника, розрахункової висоти підвісу, площі приміщень і необхідної освітленості величину питомої потужності у Вт/м². Розрахунковою висотою підвісу (позначається h_p) називається висота підвісу світильника над освітлюваною робочою поверхнею (верстата, стола).

Знайдене значення питомої потужності помножують на площу приміщення, обчислюють загальну потужність ламп світильників, необхідну для даного приміщення:

$$P_{\text{заг}} = \omega' \cdot S, \quad (20.2)$$

де ω' - питома потужність ламп світильників, Вт/м²; S - площа приміщення, м².

Після цього, знаючи стандартні потужності ламп, придатні для даного світильника, вибирають кількість світильників і потужність ламп.

Приклад 2. Необхідно освітити монтажну майстерню площею 190 м^2 . Висота підвісу світильників над підлогою не повинна бути нижче за $3,5 \text{ м}$.

Для освітлення виберемо лампи розжарювання. Вибираємо для освітлення майстерні світильник "Універсаль"; висота підвісу над підлогою $3,5 \text{ м}$. Приймаючи висоту освітлюваних поверхонь (верстатів) над підлогою у $0,8 \text{ м}$, знаходимо розрахункову висоту підвісу світильника h_p , рівну $3,5 - 0,8 = 2,7 \text{ м}$.

З табл. 20.1 знаходимо для майстерні мінімальну освітленість - 50 лк (норма для групи «монтаж обладнання»).

З табл. 20.2 знаходимо для заданих умов величину питомої потужності - $10,2 \text{ Вт/м}^2$. Загальну потужність ламп для освітлення майстерні визначаємо за формулою (20.2):

$$P_{\text{заг}} = 10,2 \cdot 190 = 1938 \approx 2000 \text{ Вт.}$$

Необхідно встановити 10 світильників з лампами 200 Вт (2 ряди по 5 світильників).

З більш точними методами розрахунків, характеристиками джерел світла і освітлювальної арматури можна ознайомитися в [2.23].

Контрольні запитання з теми 20

1. В яких одиницях вимірюють силу світла, світловий потік і освітленість?
2. Які види освітлення робочих місць застосовують в умовах будівництва?
3. Які джерела світла застосовують на будівельних майданчиках і підприємствах будівельної індустрії?
4. У чому полягають особливості люмінесцентних ламп?
5. Які види світильників застосовують на практиці?
6. В яких випадках застосовують прожектори?

ТЕМА 21

ЕЛЕКТРООБЛАДНАННЯ ІНЖЕНЕРНИХ СИСТЕМ БУДІВЕЛЬ

Ключові поняття: система кондиціонування повітря, спліт-система, ліфт, електрореконвектор.

21.1. Загальні відомості

Сучасні житлові, громадські і промислові будинки характеризуються насиченими інженерними системами, що забезпечують ефективне керування експлуатацією будинків. Значну роль в них виконують різні електроустановки: кондиціонування і вентиляції повітря, опалення будинків, зволожувачі й очисники повітря, ліфтові й піднімальні установки, установки електричного опалення та ін.

Все більше розповсюдження отримують висотні будинки й торгово-розважальні комплекси, що уявляють собою складну конструктивну систему з великою кількістю інженерних комунікацій, з розміщенням на одному об'єкті різних систем інженерно-технічного життєзабезпечення підвищеної складності. Багато висотних будівель є багатофункціональними й містять або один основний функціональний елемент (житловий, адміністративно-офісний, готельний), або два основних функціональних елементи (офісний і житловий, офісний і готельний, житловий і готельний). Крім цього у висотних будинках є допоміжні функціональні елементи, призначені для обслуговування людей, які знаходяться в них, такі як автостоянки, технічні приміщення, басейни, тренажерні зали, зали для гри в боулінг, лазні-сауни; амбулаторні й медичні кабінети та ін. У висотних будинках також можуть розташовуватися об'єкти загальноміського призначення: магазини, ресторани, кафе, буфети, фінансові й банківські установи, різні офіси та ін.

Основними компонентами інженерних систем будинків є: електро- тепло- і водопостачання, водопідготовка, каналізація, вентиляція, кліматичне обладнання, кондиціонування, електрообігрівання, охоронно-пожежні системи, очистка стоків, іонізатори й очисники повітря, освітлення та деякі інші.

Важливу роль в інженерних системах будівель відіграє **силове електрообладнання**, до складу якого входять *електродвигуни й пускорегулююча апаратура, технологічне, санітарно-технічне, протипожежне устаткування, підйомно-транспортні установки, збиральні механізми*, а також силові електроприймачі теплового, лабораторного, лікувального обладнання та інші аналогічні апарати і прилади електромережі з усім комплексом провідників, розподільних пристроїв і електромонтажних виробів.

В останні роки ефективно працюють спеціалізовані організації, які здійснюють монтаж, обслуговування і ремонт технологічного обладнання інженерних систем будівель (установок кондиціонування повітря, ліфтів, протипожежних установок та ін.), що часто буває дуже доцільним як з технічних, так і з економічних міркувань. Поряд з цим у великих громадських будівлях організуються

інженерні служби, працівники яких здійснюють експлуатацію і обслуговування цих електротехнічних установок.

Нижче розглянуті деякі групи електрообладнання інженерних систем будівель.

21.2. Системи вентиляції і кондиціонування

Завдання систем кондиціонування і вентиляції повітря - створення, регулювання й автоматична підтримка комфортного мікроклімату в закритих приміщеннях: температури, вологості, чистоти, швидкості руху повітря та ін.

Кондиціонування здійснюється комплексом технічних засобів, що називається системою кондиціонування повітря (СКП). *До складу СКП входять: технічні засоби забору повітря, підготовки його параметрів (фільтри, теплообмінники, зволожувачі або осушувачі), переміщення (вентилятори) і його розподілу, а також засоби автоматики, дистанційного керування і контролю.* СКП великих громадських, адміністративних і виробничих будівель обслуговуються, як правило, комплексними автоматизованими системами керування.

Центральні СКП. Центральні СКП застосовують для багатопверхових, функціональних будівель, приміщення в яких об'єднані єдиними завданнями (поліклініки, офісні будівлі, виробничі приміщення, архіви, склади та ін.). Такі системи забезпечуються теплом, що доставляється гарячою водою, паром або електрикою, або холодом, що доставляється холодною водою або холодоагентом, і електрикою для забезпечення роботи вентиляторів, насосів і т.д. Центральні СКП дозволяють ефективно підтримувати задану температуру й відносну вологість повітря; забезпечують ефективне шумо- й віброгасіння, що важливо для приміщень з підвищеними вимогами до акустики (радіо-, телестудії, студії запису та ін.).

Локальні СКП. Локальні СКП звичайно засновані на базі автономних і неавтономних кондиціонерів, встановлюваних безпосередньо у приміщеннях, що обслуговуються. Серед переваг таких систем - простота установа і монтажу, можливість установки у вже побудованих жилих і адміністративних будинках, в окремих кімнатах споруджуваних будівель, наприклад, якщо режим споживання холоду/тепла в них різко відрізняється від більшості інших приміщень. Крім поліпшення параметрів (рециркуляції) повітря, що уже є в приміщенні, також існують *спліт-системи, що забезпечують забір і подачу очищеного повітря ззовні.*

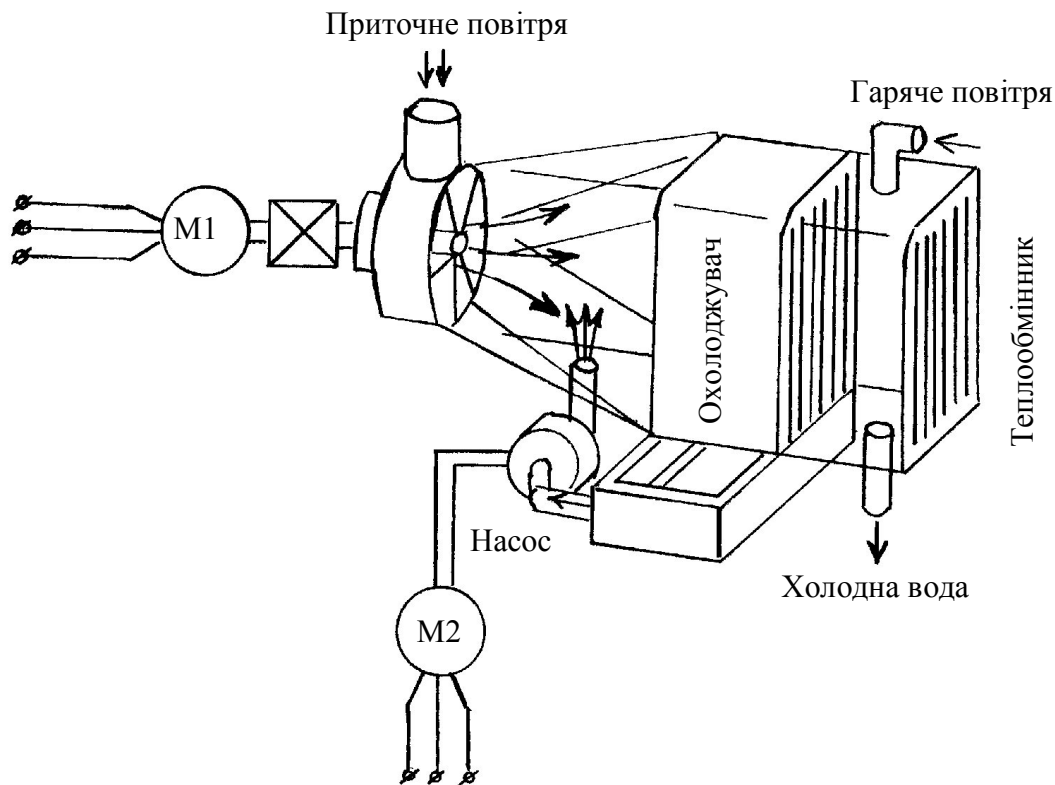


Рис.21.1 - Елементи конструкції кондиціонера

На рис 21.1 показаний приклад конструкції кондиціонера, в якому АД М1 використовується для привода вентилятора, що подає приточне повітря до охолоджувача, а АД М2 - для привода насоса циркуляції холодоагенту.

21.3. Ліфти і ескалатори

Ліфт являє собою стаціонарну вантажопідйомну машину періодичної дії, призначену для підйому й спуску люде або вантажів. Перевезення пасажирів здійснюється окремими групами через певний час, при цьому рух чергується із зупинками для посадки й висадки людей. Ліфт є найпоширенішим підйомником періодичної дії.

До пасажирських підйомно-транспортних машин належать й фунікулери. Ці машини використовують звичайно на крутих підйомах. Так у м. Ялта фунікулер використовується для підйому на гору Ай-Петрі, у Києві - для підйому на Володимирську гірку.

До підйомно-транспортних машин безперервної дії належать й ескалатори. Посадка й висадка пасажирів з таких машин відбувається без зупинки останніх у процесі роботи. При значних і інтенсивних пасажиропотоках, характерних для більшості громадських будівель, у метрополітенах, портах, вокзалах і універмагах широке розповсюдження отримали саме ескалатори.

Разом з тим там, де пасажиропотік порівняно невеликий і непостійний (житлові будинки, адміністративні будинки), встановлюють ліфти. За призначенням ліфти можуть бути пасажирські, вантажні, вантажопасажирські, лікарняні й спеціальні. За швидкістю ліфти підрозділяють на тихохідні - до 1 м/с,

швидкохідні - від 1 до 2,5 м/с і швидкісні - від 2,5 м/с до 9,2 м/с.

Спрощено пасажирський ліфт з електроприводом являє собою кабінку, підвішену на сталевих канатах у вертикальній шахті. Встановлена в машинному приміщенні лебідка намотує канати на барабан. Кабіна рухається по напрямних, що укріплені на стінах шахти. Сучасні ліфти - це досить складні системи з вантажопідйомністю від 50 кГ (100, 150 і 250 кГ – маловантажні) до 5000 кГ. Вони оснащуються складними системами автоматичних пристроїв, що запобігають аварійним ситуаціям.

У ділових центрах, банках та інших громадських будівлях склалася практика встановлювати ліфти, що дозволяють обслуговувати великі пасажиропотоки в періоди приходу й відходу співробітників. При цьому зовсім не обов'язково збільшувати кількість ліфтів або їхні вантажопідйомності. Сьогодні подібні завдання можуть бути вирішені за допомогою спеціального програмного забезпечення, яким оснащені деякі моделі ліфтів провідних виробників. Так, існують спеціальні програми для скорочення часу очікування приходу ліфта.

Торговельні й виставочні комплекси часто оснащуються панорамними ліфтами. Панорамний ліфт, призначений для огляду, може мати різну конфігурацію. Для створення максимального огляду часто застосовуються скляні панелі від підлоги до стелі.

Конкуренція на ліфтовому ринку змушує підприємства постійно підвищувати якість своєї продукції. Цьому сприяє модернізація виробництва, установка сучасного високотехнологічного обладнання, розробка нових конструкцій ліфтів. Розширення номенклатури підприємств-виробників забезпечує замовникам великий вибір ліфтового обладнання. Так, поряд з типовими й серійними проектами заводи виготовляють ліфти за індивідуальними замовленнями. Наприклад, у зв'язку із запровадженням в дію нових будівельних норм багато виробників випускають ліфти для перевезення пожежних підрозділів. До того ж системи керування ліфтами можуть бути виконані на різній елементній базі, що забезпечує необхідний режим роботи ліфта залежно від типу будівлі, в якій він встановлений.

21.3.1. Електрообладнання ліфтів за складом і призначенням аналогічне електроустаткуванню вантажопідйомних машин (розд. 17.3). Напруга від джерела живлення подається до машинного приміщення ліфта через увідний пристрій, що повинен відключати живлення приводного електродвигуна, кіл керування, сигналізації й освітлення кабіни ліфта. Для живлення кіл сигналізації й ремонтного освітлення використовуються понижувальні трансформатори напруги з номінальною напругою первинних обмоток 220 і 380 В, вторинних обмоток - 24 і 36 В. Потужності понижувальних трансформаторів 250 - 1500 ВА.

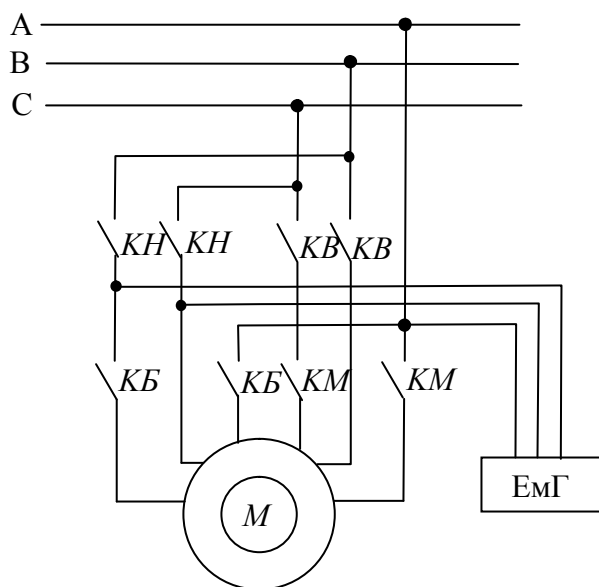


Рис.21.2 - Силові кола вантажного ліфта

тактора "нагору", *KB* – силові контакти контактора "велика швидкість", *KM* – силові контакти контактора – "мала швидкість"

Для захисту електродвигунів від перевантажень і коротких замикань використовують автоматичні вимикачі з тепловими й електромагнітними розчеплювачами.

Для включення силових кіл електродвигунів і гальмових електромагнітів застосовують контактори постійного і змінного струму.

На рис. 21.2. як приклад показаний фрагмент схеми силових кіл вантажного ліфта. На схемі показані: *M* – двошвидкісний АД, *EMГ* – електромагнітне гальмо, *KH* – силові контакти контактора "униз", *KB* – силові контакти кон-

21.4. Електрообладнання систем водопостачання

До електрообладнання систем водопостачання належать електродвигуни господарських насосів, насосів систем гарячого водопостачання й мереж протипожежного водопроводу. В більшості випадків у мережах водопостачання встановлюють два насоси (іноді три або чотири) з асинхронними електродвигунами: один робочий, другий - резервний. Режим роботи електродвигуна обумовлюється призначенням насосів. Так, у системах гарячого водопостачання температура й тиск води підтримуються автоматично за допомогою різних датчиків, що забезпечують автоматичне включення насосів. І, залежно від умов навколишнього середовища, режим роботи електродвигунів може бути тривалий або повторно-короткочасний. Електродвигуни протипожежних систем включаються в аварійних ситуаціях і працюють до ліквідації пожежі (тривалий режим).

На рис. 21.3 як приклад наведено схему керування двома господарськими насосами, які встановлюються в центральних теплових пунктах і обслуговують групу житлових будинків та інших будівель мікрорайону. Насоси включаються по черзі, завдяки чому забезпечується рівномірне зношування обох агрегатів. Схема працює в такий спосіб. При замиканні контакту мінімального тиску *SP1* спрацьовує реле *1K*, що замикає свої контакти *1K6* і подає напругу на котушку пускача *1KM*. Останній включає до роботи насос. Одночасно реле *1K* контактом *1K3* подає напругу на котушку реле *3K*, що самоблокується і підготує коло реле *2K*. При повторному замиканні контакту *SP1* спрацьовує реле *2K*, що тепер включає до роботи другий насос і знеструмлює реле *3K*. Таким чином, при кожному замиканні контакту *SP1* по черзі спрацьовують реле *K1* і *K2*, і, як наслідок, по черзі включаються електродвигун першого насоса *M1* і другого

насоса М2. Відключення працюючого насоса здійснюється за допомогою реле 4К, що спрацьовує при замиканні контакту максимального тиску SP2.

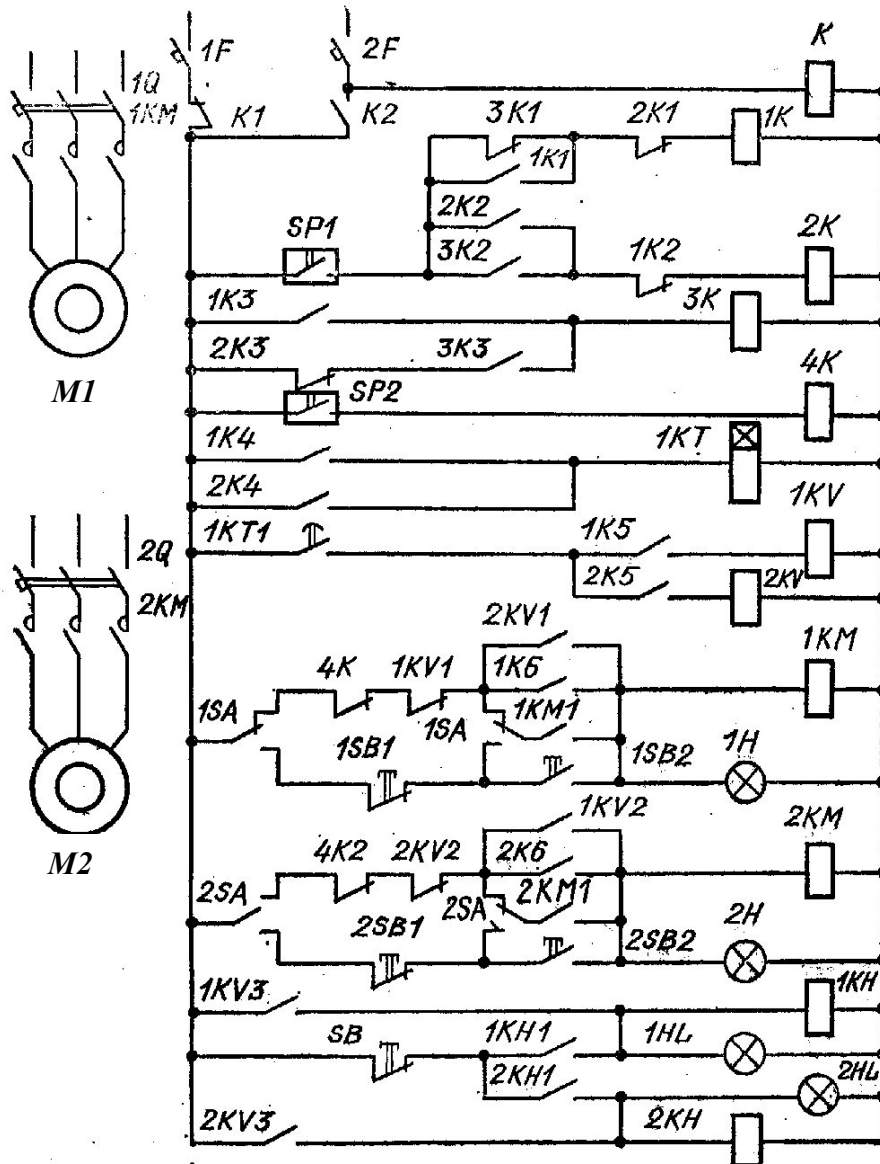


Рис.21.3 - Схема керування насосами водопідкачки

Якщо працюючий насос не піднімає тиск у мережі, то контакт SP1 не розмикається, тоді з невеликою витримкою часу, забезпечуваною реле 1KT, спрацьовує або реле 1KV або реле 2KV, що відключає несправний насос і включає резервний.

Робота насосів сигналізується зеленими лампочками 1H і 2H, а аварія насосів - червоними лампочками 1HL і 2HL.

Реле К служить для автоматичного переключення живлення кіл керування при зникненні напруги в силових колах одного з електродвигунів.

Для виконання налагоджувальних і ремонтних робіт передбачене керування насосами за допомогою місцевих кнопок 1SB1, 2SB2. Переведення на місцеве керування здійснюється за допомогою перемикачів 1SA і 2SA.

21.5. Електричне опалення

Досить тривалий час електричне опалення вважалося дорогим, пожежо-небезпечним і екологічно шкідливим. Прогрес в області виробництва конвекторів і термостатів, поява нових типів електроопалювальних приладів, а саме кабельного обігріву підлог і інфрачервоних стельових обігрівачів, докорінно змінили експлуатаційні характеристики сучасного електроопалювання. Обладнання, призначене для житлових приміщень, є екологічно чистим (температура нагрівальних елементів незначна, вони не змінюють вологість), пожежобезпечним, має відповідний клас захисту від ураження електричним струмом, працює безшумно, не виділяє ніяких шкідливих речовин. Електромагнітне поле цих приладів перебуває на фоновому рівні. У цілому сучасні системи електроопалення будівель відповідають самим жорстким вимогам з екології і безпеки.

Найширші можливості з'явилися в електроопаленні для економічного і раціонального використання електроенергії.

У кожне опалювальне приміщення встановлюють термостат, що дозволяє регулювати температуру в широкому діапазоні (5-30°C). Зазначимо, що зниження температури на 1°C зменшує витрати електроенергії на 4-5%. При гнучкій зміні температурних режимів у кожному окремому приміщенні економія може досягати 30-50%. Особливо істотна економія (до 80%) досягається для високих (вище 4,5 м) об'єктів при використанні інфрачервоних обігрівачів або "теплої підлоги". Є можливість запрограмувати будь-який графік зміни температур, можна відключити будь-яку кімнату, групу кімнат або цілий поверх. Після тимчасового відключення електроживлення опалення починає працювати без втручання людини.

У житлових будинках електроопалення дуже зручне як доповнення до вже існуючої системи центрального опалення. Це істотно при похолоданні у весняно-осінній період, коли центральне опалення відключене. У критичні періоди взимку при значному похолоданні, коли центральна система не забезпечує необхідний рівень комфорту, пряме стаціонарне електричне опалення автоматично забезпечує необхідний температурний режим, при цьому експлуатаційні витрати незначні. Важко оцінити значення додаткового резервного електроопалення при аваріях та інших позаштатних ситуаціях.

Особливі проблеми з опаленням виникають у приміщеннях з високими стелями (5-10 м) і незадовільною теплоізоляцією. Це заводські корпуси, склади, автобази, криті спортивні й концертні зали, виставочні і торговельні павільйони та ін. Для таких споруд найефективнішими опалювальними приладами вважаються інфрачервоні обігрівачі, економія електроенергії тут може досягати 80%.

Сучасні опалювальні системи проектують і монтують з використанням *електроконвекторів*. Назва «конвектор» відображає принцип розподілу гарячого повітря у приміщенні - природну конвекцію. Нагрівання повітря відбувається при проходженні його через нагрівальний елемент. Холодне повітря проходить через нагрівальний елемент, нагрівається і виходить через жалюзі, а його місце займає повітря з приміщення. Таким чином, тепле повітря циркулює у приміщенні, забезпечуючи швидке й комфортне тепло. Конвектор нагріває

приміщення, не використовуючи пристроїв для примусової циркуляції повітря, що робить його більш надійним і економічним приладом у порівнянні з обігрівачами з вбудованим вентилятором. При цьому на відміну від тепловентиляторів, конвектори, створюючи ефективний рух теплого повітря, не дають шуму при роботі.

Температуру повітря у приміщенні контролює вбудований термостат з датчиком. Користувач виставляє необхідну температуру на термостаті, а датчик повітря вимірює температуру повітря, що надходить, і при досягненні заданих параметрів виключає нагрів. При зменшенні температури в приміщенні знову включається нагрів. Таким чином, конвектор підтримує постійну задану температуру. Точність підтримки температури в приміщенні для деяких моделей конвекторів досягає 0,1 градуса.

У масляних радіаторів термостат контролює не температуру повітря, а температуру масла. Тому точність підтримки температури в них набагато менша й становить приблизно 3 - 5°C.

Сучасні конвектори (APPLIMO, SOLO, EURO PLUS та ін.), завдяки застосуванню новітніх і унікальних технологій, мають наступні переваги в порівнянні з традиційними обігрівачами (маслонаповненими радіаторами, тепловентиляторами) та іншими конвекторами.

ККД нагрівальних елементів досягає 95-99%.

Повна відсутність шуму при нагріві й остиганні нагрівального елемента. Масляний радіатор при роботі видає характерні клацання («булькіт»), які відбуваються при нагріві й остиганні масла всередині приладу.

Ефективний нагрів повітря, що не порушує його природної вологості й не спалює кисень.

Великий ресурс безперервної роботи (в деяких моделях до 25 років).

Висока швидкість виходу на робочу температуру (1 - 1,5 хв). В масляних радіаторів - до 15 хв.

Витрата електричної енергії залежить від тепловтрат опалювального приміщення. За середньостатистичними даними [<http://el-tic.com.ua>] при зовнішній температурі -20°C і температурі в приміщенні +18°C для опалення 1 м³ приміщення необхідно 40-45 Вт електричної енергії, що складає 120 Вт встановленої потужності на 1 м² при висоті стелі 250-270 см.

Контрольні запитання з теми 21

1. Назвіть основні компоненти інженерних систем будівель.
2. Які елементи утворюють силове електрообладнання інженерних систем будівель?
3. Які елементи входять до складу системи кондиціонування повітря?
4. Назвіть основні елементи електрообладнання ліфтів?
5. Поясніть роботу схеми керування насосами водопідкачки.
6. У чому переваги сучасних систем електроопалювання будівель?

ТЕМА 22 ЕЛЕКТРОБЕЗПЕКА В БУДІВНИЦТВІ

Ключові поняття: електричний удар, електричний опік, електричний знак, металізація шкіри, електроофтальмія, наряд, розпорядження, захисні засоби, захисне заземлення, занулення.

22.1. Загальні відомості

У загальному випадку під електробезпекою розуміють систему організаційних і технічних заходів і засобів, спрямованих на захист людей від шкідливого впливу електричного струму, електричної дуги, електромагнітного поля й статичної електрики. У рамках даного посібника мова йдеться про захист персоналу, який працює з електрифікованим інструментом, на електротехнологічних установках і устаткуванні підприємств будівельної індустрії й будівельних майданчиків. Необхідність вирішення цього завдання викликана тим, що у випадку потрапляння під напругу через тіло людини проходить електричний струм, від величини якого залежить ступінь ураження.

Важливість цього питання обумовлена тим, що в сучасних умовах продуктивність праці в будівництві, як і в інших галузях людської діяльності, в значній мірі визначається електроозброєністю праці. При постійному її зростанні все більшу увагу доводиться приділяти питанням електробезпеки.

Для вирішення цього завдання проводять організаційні заходи й застосовують окремо або в сполученні один з одним різні технічні способи й засоби (захисне заземлення, занулення, вирівнювання потенціалів, ізоляція струмоведучих частин, попереджуюча сигналізація, блокування, знаки безпеки; засоби захисту та ін.).

Система вимог і правил викладена в «ГОСТ 12.1.013-78 ССБТ. Строительство. Электробезопасность. Общие сведения».

22.2. Дія електричного струму на організм людини

Електричний струм, що діє на організм людини, може привести до наступних видів ураження: електричному удару, опіку, металізації шкіри, електричному знаку, механічному пошкодженню, електроофтальмії. При проходженні електричного струму через організм людини в першу чергу ушкоджується центральна нервова система, в результаті чого порушується робота серцевого м'яза й органів дихання. Ступінь ураження залежить від сили і частоти струму, а також від шляху проходження струму через організм людини (див. табл. 22.1).

Електричний удар приводить до збудження живих тканин. Розрізняють кілька ступенів тяжкості електротравм при електричному ударі:

- 1) електротравма I ступеня - судорожне скорочення м'язів без втрати свідомості;
- 2) електротравма II ступеня - судорожне скорочення м'язів з втратою свідомості;
- 3) електротравма III ступеня - втрата свідомості і порушення функцій серцевої діяльності або дихання (не виключене і те й інше);
- 4) електротравма IV ступеня - клінічна смерть.

Ступінь важкості електричного ураження залежить від багатьох факторів: опору організму, величини, тривалості дії, роду й частоти струму, шляху його в організмі, умов зовнішнього середовища. Результат впливу електричного струму за-

лежить також від фізичного стану людини. Якщо вона хвора, стомлена або перебуває у стані сп'яніння, душевної пригніченості, то дія струму особливо небезпечна. Безпечними для людини вважають змінний струм до 10 мА і постійний - до 50 мА.

Таблиця 22.1 - Ступінь впливу електричного струму на людину

Сила струму, мА	Змінний струм частотою 50-60 Гц	Постійний струм
0,6 – 1,5	Початок відчуття – слабка сверблячка, пощипування шкіри	Не відчувається
2 – 3	Відчуття струму поширюється на зап'ястя руки, злегка зводить руку	Не відчувається
5 – 7	Болючі відчуття, судороги в руках	Сверблячка. Відчуття нагрівання
8 – 10	Руки важко відриваються від електродів. Сильні болі в руках і судороги.	Посилення нагрівання
20 – 25	Руки миттєво паралізуються, відірвати їх від електродів неможливо. Дуже сильні болі в руках і грудях. Утрудняється подих.	Ще більше посилення нагрівання, незначне скорочення м'язів рук.
50 – 80	Подих паралізується. Початок тріпотіння шлуночків серця.	Сильне відчуття нагрівання. Скорочення м'язів рук. Судороги. Утруднення подиху.
90 - 100	Параліч подиху і фібриляція через 1-3 с.	Параліч подиху.

Електричний опік є наслідком коротких замикань в електроустановках і перебування тіла (як правило, рук) у сфері світлового (ультрафіолетового) і теплового (інфрачервоного) випромінювання електричної дуги. Приводить до опіків III і IV ступеня з важким результатом - при зіткненні людини (безпосередньо або через електричну дугу) із струмоведучими частинами напругою понад 1000 В.

Електричний знак – це специфічне ураження, викликане механічними, хімічними або їхніми спільними діями струму. Вражена ділянка шкіри практично безболісна, довкола неї відсутні запальні процеси. Згодом вона зажорсткує, і поверхневі тканини відмирають. Електрознаки звичайно швидко виліковують.

Металізація шкіри – це просочування шкіри дрібними пароподібними або розплавленими частками металу під впливом механічного або хімічного впливу струму. Вражена ділянка шкіри здобуває жорстку поверхню й своєрідне фарбування. У більшості випадків металізація виліковується, не залишаючи на шкірі слідів.

Ураження очей ультрафіолетовими променями, джерелом яких є електрична дуга, називається **електроофтальмією**. У результаті електроофтальмії через кілька годин настає запальний процес.

Відповідно до закону Ома величина струму визначається напругою і опором кола. Значний електричний опір має тільки поверхневий шар шкіри людини. Цей опір залежить від багатьох причин (вологості шкіри, ступеня розширення шкірних капілярів та ін.) і коливається в широких межах - від 800 до 100000 Ом. Опір різко знижується, наприклад, при вживанні алкоголю. Якщо прийняти опір тіла людини рівним 1000 Ом, то небезпечним буде струм при напрузі $U = I \cdot R_{\text{люд}} = 0,05 \cdot 1000 = 50$ В, при цьому джерело повинно віддавати потужність $P = U \cdot I = 50 \cdot 0,05 = 2,5$ Вт.

Якщо потужність джерела значно менша зазначеної цифри, високі напруги не призводять до загального ураження організму людини, але викликають неприємні відчуття.

При несправності ізоляції електротехнічних установок неізольовані металеві конструкції можуть опинитися під напругою. Якщо людина торкнеться такої металевої конструкції, вона опиниться під напругою, яка називається **напругою дотику** $U_{\text{дот}}$.

Відповідно до Правил технічної експлуатації електроустановок і Правил техніки безпеки [2.13, 2.14], небезпечними для людини вважаються наступні напруги дотику: в сухому приміщенні $U_{\text{дот}} = 65 \text{ В}$; у сирих приміщеннях з відносною вологістю 75 % і струмопровідними підлогами $U_{\text{дот}} = 36 \text{ В}$; в особливо небезпечних приміщеннях (металеві kabіни, казани, приміщення з відносною вологістю 100%) $U_{\text{дот}} = 12 \text{ В}$.

22.3. Класифікація умов робіт за ступенем електробезпеки

Роботи, здійснені в діючих електроустановках, щодо заходів безпеки підрозділяють на такі категорії: при повному знятті напруги; з частковим зняттям напруги; без зняття напруги поблизу і на струмоведучих частинах; без зняття напруги вдалині від струмоведучих частин, що перебувають під напругою.

За ступенем електробезпеки розрізняють такі умови роботи.

Особливо небезпечні умови ураження людей електричним струмом:

наявність вогкості (дощ, сніг, часте обприскування й покриття вологою стелі, стін, предметів, що перебувають усередині приміщень);

наявність хімічно активного середовища;

наявність одночасно двох або більше умов підвищеної небезпеки.

Умови з підвищеною небезпекою ураження людей електричним струмом:

наявність вологості (пару або вологи, що конденсується, виділяється у вигляді дрібних крапель, і відносної вологості більшої за 75%);

наявність провідного пилу (технологічний або інший пил, що осів на проводах, проникаючи всередину машин і апаратів і відкладаючись на електроустановках, погіршує умови охолодження ізоляції, але не викликає небезпеки пожежі або вибуху);

наявність струмопровідних основ (металевих, земляних, залізобетонних, цегельних);

наявність підвищеної температури незалежно від пори року й різних теплових випромінювань (температура перевищує 35°C, короткочасно 40°C);

наявність можливостей одночасного дотику людини до металоконструкцій будівель, що мають з'єднання з землею, технологічних апаратів з однієї сторони й до металевих корпусів електрообладнання - з іншої.

Умови без підвищеної небезпеки ураження людей електричним струмом:

відсутність умов, що створюють підвищену або особливу небезпеку.

22.4. Заходи щодо забезпечення безпечного ведення робіт з електроустановками

22.4.1. Організаційні заходи. Робота в електроустановках здійснюється за нарядом, розпорядженням, у порядку поточної експлуатації.

Наряд - письмове завдання, викладене на бланку встановленої форми, що визначає місце, час початку і закінчення робіт, умови безпечного ведення робіт, склад бригади й осіб, відповідальних за безпеку робіт. За нарядом повинні виконуватися роботи: з повним зняттям напруги; з частковим зняттям напруги; без зняття напруги поблизу і на струмоведучих частинах, що перебувають під напругою.

Розпорядження - завдання на роботу в електроустановках, записане в оперативному журналі. Розпорядження має разовий характер, видається на одну роботу й діє на одну зміну або протягом години залежно від характеру роботи. За розпорядженням можуть здійснюватися роботи: без зняття напруги вдалині від струмоведучих частин, що перебувають під напругою, тривалістю не більше однієї зміни, позапланові короточасні і невеликі за обсягом роботи (тривалістю до 1 години), викликані виробничою необхідністю, з повним або частковим зняттям напруги, а також без зняття напруги поблизу й на струмоведучих частинах, що перебувають під напругою; деякі види робіт з повним або частковим зняттям напруги в електроустановках напругою до 1000 В тривалістю не більше однієї зміни.

До робіт, виконуваних за розпорядженням, без зняття напруги вдалині від струмоведучих частин, належать: прибирання коридорів і службових приміщень відкритих і закритих розподільчих пунктів; ремонт освітлювальної апаратури, заміна ламп (поза камерами й комірками, при знятті напруги з ділянки освітлювальної мережі, на якій здійснюються роботи); догляд за щітками, кільцями й колекторами електричних машин; поновлення написів на кожухах та ін.

До робіт, виконуваних за розпорядженням у разі виробничої необхідності, без зняття напруги поблизу й на струмоведучих частинах, що перебувають під напругою, належать: роботи на кожухах електрообладнання; виміри струмовимірювальними кліщами; зміна запобіжників до 1000 В; перевірка нагрівання контактів штангою; визначення вібрації шин штангою; фазировка; контроль ізоляції штангою. Ці роботи виконують короточасно (до 1 години) і не менш ніж двома працюючими.

До робіт в електроустановках до 1000 В з повним або частковим зняттям напруги, виконуваних за розпорядженням, належать: ремонт магнітних пускачів, пускових кнопок, автоматичних вимикачів, рубильників, реостатів, контакторів і аналогічної апаратури, встановленої поза щитами й зборками; ремонт окремих електроприймачів (електродвигунів, електрокалориферів); ремонт окремо розташованих магнітних станцій і блоків керування; зміна запобіжників; ремонт освітлювальної проводки. Роботи повинні виконуватися двома працюючими.

У порядку поточної експлуатації оперативним або оперативно-ремонтним персоналом здійснюються роботи на закріпленій ділянці протягом однієї зміни за спеціальним переліком з наступним записом в оперативному журналі.

22.4.2. Технічні заходи. Здійснення робіт з частковим або повним зняттям напруги в установках до 1000 В. Відключаються всі силові та інші трансформатори з боку вищої і нижчої напруги. Відключення може бути зроблено: комутаційним апаратом з ручним керуванням, контакти якого видні з лицьової сторони (якщо при цьому контакти не видні, то необхідно відкрити щитки, дверцята кожухів або зняти самі кожухи); контакторами з автоматичним приводом і дистанційним керуванням при знятті запобіжників оперативного струму від'єднанням кінців котушки, що включає. При відсутності переносного заземлення вживають додаткові заходи: знімають запобіжники, застосовують ізольовані накладки в рубильниках і автоматах, відключають кінці живильних ліній та ін.

Перевірку відсутності напруги треба здійснювати покажчиком напруги. Відсутність напруги повинна перевірятися на всіх фазах. Перевірка здійснюється в діелектричних рукавичках. Перевірка відсутності напруги в мережах до 1000 В здійснюється покажчиком напруги або переносним вольтметром. Застосування контрольних ламп допускається при лінійній нарузі до 220 В.

Заходи, що забезпечують безпеку робіт без зняття напруги. Робоче місце електрика повинне бути розташованим так, щоб струмоведучі частини, які перебувають під напругою, знаходилися перед ним або з однієї сторони. Необхідно користуватися захисними засобами. Спецодяг працюючих повинен бути глухий і мати опущені й застебнуті рукава, головний убір одягати обов'язково.

22.4.3. Захисні засоби. Захисними засобами називають прилади, апарати, переносні пристрої, що служать для захисту персоналу від ураження електричним струмом. Мінімальні норми комплектів захисних засобів електроустановок напругою до 1000 В при введенні їх в експлуатацію наступні: покажчик напруги - один; ізолюючі кліщі - одні; діелектричні рукавички, калоші - по дві пари; монтерський інструмент з ізолюючими ручками - не менше двох комплектів; переносні заземлення - не менше двох; попереджуючі плакати - не менш двох комплектів; діелектричні килимки - два; тимчасові огороження - не менш двох комплектів; захисні окуляри - одна пара; протигаз - один.

22.5. Захисне заземлення і занулення

Одним з найбільш важливих заходів, що значно підвищують електробезпеку працюючих на будівництві людей, є правильне влаштування захисного заземлення.

Захисне заземлення являє собою з'єднання металевих частин електрообладнання і установок за допомогою заземлюючого провідника із заземлювачем, який має малий опір з'єднання з землею. Воно забезпечує безпечну напругу дотику. Заземлювач і заземлюючі провідники називаються заземлюючим пристроєм.

Захисне заземлення використовують при незаземленій нейтралі.

Занулення являє собою з'єднання металевих частин, що нормально не перебувають під напругою, з багаторазово заземленим нульовим проводом. Занулення виконують в системах із заземленою нейтраллю, воно забезпечує надійне відключення установки при замиканні на корпус.

Умови роботи електроустановок на будівельних майданчиках під відкритим небом - вогкість, атмосферні опади, пересувні механізми з електроприво-

дом, тимчасові електромережі - створюють підвищену небезпеку ураження людей електричним струмом.

Причиною ураження людей електричним струмом може бути не тільки дотик до струмоведучих частин. При пошкодженні ізоляції корпуси електродвигунів або пускової апаратури й, саме головне, пов'язані з ними металеві частини будівельних машин і механізмів опиняються під напругою. Доторкнувшись до них, людина при відсутності захисних засобів уражається електричним струмом. Такі випадки особливо небезпечні тим, що робітники, які обслуговують машини, не очікуючи небезпеки, постійно стикаються з її металевими частинами. Захистом від ураження струмом при переході напруги на конструктивні металеві частини служить захисне заземлення. Заземленню підлягають металеві частини будівельних машин і механізмів з електроприводом, корпуси електроінструментів, корпуси електрообладнання і пускорегулюючих апаратів, конструкції, каркаси і кожухи електротехнічних пристроїв та інші металеві частини, які можуть опинитися під напругою при пошкодженні ізоляції.

Захисне заземлення виконують по-різному залежно від напруги й системи електропостачання.

Мережі напругою до 1000 В (мережі 380/220 В) на будівельних майданчиках споруджують за чотирипровідною системою - «зірка» з нулем. У таких мережах, відповідно до правил, в обов'язковому порядку заземлюють нейтраль (нульову точку) силових трансформаторів (система з глухозаземленою нейтраллю). Для цього в кожному трансформаторному пункті (ТП) влаштовують заземлюючий контур, до якого приєднують вивід нульової точки трансформатора, а отже, і нульовий провід мережі. Опір заземлюючого пристрою ТП, відповідно до правил, повинен бути не більше 4 Ом (для трансформаторів потужністю до 100 кВА ця норма підвищується до 10 Ом).

Нульовий провід повітряних ліній повторно заземлюють через кожні 250 м, а також на кінцях ліній і відгалужень, в тому числі обов'язково в зоні роботи будівельних механізмів - баштових кранів, екскаваторів та ін.

У мережах з глухозаземленою нейтраллю захисне заземлення виконують приєднанням частин установки, що заземлюється, до заземленого нульового проводу електромережі (рис. 22.1). Дія такого заземлення (воно ще називається зануленням) полягає в тому, що у разі пошкодження ізоляції й появи напруги на корпусі обладнання створюється коротке замикання в одній з фаз трансформатора через нульовий провід, в результаті чого пошкоджена частина установки автоматично відключається, оскільки під дією струму короткого замикання негайно перегоряє плавка вставка запобіжника або відключається автомат.

Заземлення корпусів будівельних машин здійснюється за допомогою заземлюючої жили шлангового кабелю, що живить електропривод машини. Один кінець заземлюючої жили приєднується до заземлюючого бовта на корпусі (або металоконструкціях) машини, а інший - до заземлюючого бовта на корпусі пускового ящика або підключального пункту, через який подається живлення до машини. Корпус пускового ящика приєднується до нульового проводу мережі.

Деякі особливості має заземлення баштових кранів. Крім заземлення металеві конструкції і корпусів електрообладнання крана, що роблять за допомо-

гою четвертої жили шлангового кабелю, обов'язково заземлюють підкранові рейкові шляхи.

При цьому перемички між всіма стиками рейок, а також між двома нитками рейок виконують зварюванням. Рейки приєднують (окремими провідниками) до повторного заземлення нульового проводу і до заземлюючого бовта підключального пункту крана.

В окремих випадках в електроустановках будівельних організацій можуть бути мережі трифазного струму напругою до 1000 В (трипровідні), що працюють з ізолюваною (незаземленою) нейтральною точкою силових трансформаторів. Такого роду мережі іноді будують на торфорозробках і в підземних виробітках. У таких мережах, а також у всіх електроустановках на напругу вище 1000 В (наприклад, в будівельних машинах з високовольтним електроприводом) захисне заземлення виконують спорудженням місцевого заземлюючого пристрою (окремого заземлюючого контура) з приєднанням до нього частин обладнання, що заземлюється, (рис. 22.2). Місцевий заземлюючий пристрій при цьому повинен мати малий опір. Відповідно до правил опір такого заземлюючого пристрою в установках на напругу до 1000 В не повинен перевищувати (так само, як у ТП) 4 Ом; в мережах напругою 6...10 кВ це значення визначається розрахунком, але не повинне перевищувати 10 Ом. Дія заземлення в цьому випадку полягає в тому, що воно знижує до безпечної величини напругу, яка може з'явитися на корпусі машини або апарата при пошкодженні ізоляції.

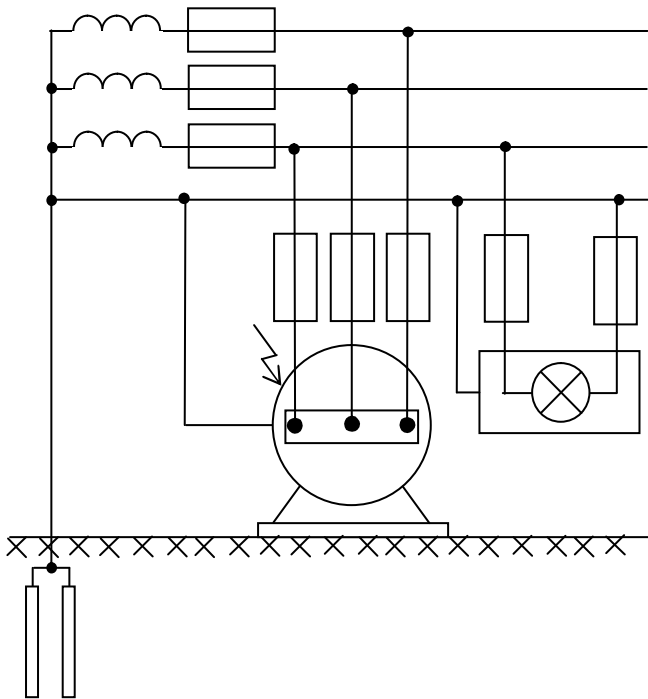


Рис. 22.1 - Схема захисного заземлення у чотирьохпровідній лінії

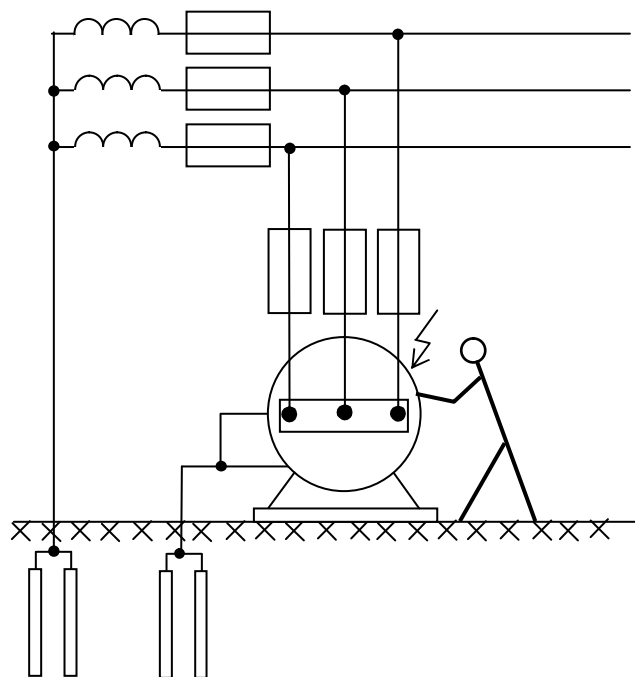


Рис. 22.2 - Захисне заземлення у трипровідній лінії

В якості штучних заземлювачів застосовують вертикально забиті в землю відрізки кутової сталі перерізом 50 x 50 мм, довжиною 2...2,5 м або сталеві стрижні з круглої сталі діаметром 12...14 мм, довжиною до 4...5 м (пруткові заземлювачі). Окремі заземлювачі зв'язують між собою в загальний заземлюючий контур сталевими смугами перерізом 40 x 4 мм; з'єднання виконують на зварю-

ванні. Заземлюючі провідники приєднують до заземлюючого контуру (до сталевий смуги) також зварюванням, а до корпусів апаратів і машин - бовтами. Необхідна кількість заземлювачів у контурі визначається розрахунком. Чим менше повинен бути електричний опір заземлюючого пристрою, тим більше потрібно заземлювачів. При цьому велике значення має характер ґрунту, в якому виконується заземлення. Більш сприятливі ґрунти глинисті, найменш сприятливі - піщані і скелясті.

При влаштуванні заземлень і під час експлуатації електрообладнання потрібне проведення ряду вимірів (перевірка відповідності заземлюючого пристрою нормам). Для цієї мети служать спеціальні прилади - вимірники заземлень. Такі виміри виконують фахівці-електрики відповідно до наявних інструктивних вказівок.

Контрольні запитання з теми 22

1. Яка сила струму вважається безумовно небезпечною для життя людини?
2. Що розуміють під електричним ударом? Які ступені важкості електротравм від електричного удару?
3. Що розуміють під електричним опіком? Ступені ураження при електричному опіку?
4. Що розуміють під металізацією шкіри? Ступені ураження при металізації шкіри?
5. Електроофтальмія і її вплив на людину.
6. Що розуміють під напругою дотику? Які величини напруги дотику вважаються небезпечними для життя людини?
7. Які бувають умови робіт за ступенем електробезпеки?
8. Які організаційні заходи щодо забезпечення електробезпеки робіт?
9. Які технічні заходи щодо забезпечення електробезпеки робіт на установках до 1000 В?
10. Які захисні засоби застосовують в електроустановках до 1000 В?
11. Що розуміють під захисним заземленням? Принцип дії.
12. Що розуміють під захисним зануленням? Принцип дії.
13. Основні причини ураження людей електричним струмом на будівельних майданчиках.
14. Як виконують заземлення корпусів будівельних машин?
15. У чому особливості заземлення будівельних кранів?
16. Як діє заземлення в електроустановках з ізольованою нейтраллю?

СПИСОК ЛІТЕРАТУРИ

1. Основна література

1. Березина Т. Ф., Гусев Н. Г., Масленников В. В. Задачник по общей электротехнике с основами электроники. - М.: Высш. школа, 1991. - 380 с.
2. Борисов Ю.М., Липатов Д.Н., Зорин Ю.Н. Электротехника: Учебник для вузов. - М.: Энергоатомиздат, 1985. - 552 с.
3. Данилов И.А., Иванов П.М. Общая электротехника с основами электроники: Учеб. пособие. - М.: Высш. школа, 2000. - 751 с.
4. Жаворонков М.А., Кузин А.В. Электротехника и электроника: Учеб. пособие. - М.: Изд. центр "Академия", 2005. - 400 с.
5. Зайцев В.Е., Нестерова Т.А. Электротехника. Электроснабжение, электротехнология и электрооборудование строительных площадок: Учеб. пособие. - М.: Издательский центр "Академия", 2004. - 128 с.
6. Иванов И.И., Лукин А.Ф., Соловьев Г.И. - Электротехника. Основные положения, примеры и задачи. - СПб.: Изд-во «Лань», 2002. - 192 с.
7. Касаткин А.С., Немцов М.В. Электротехника: Учебник. - М.: Изд. центр "Академия", 2008. - 544 с.
8. Китаев В.Е. Электротехника с основами промышленной электроники: Учебник. - М.: Высш. школа 1985. - 224 с.
9. Колонтаєвський Ю.П., Сосков А.Г. Промислова електроніка та мікросхемотехніка: теорія і практикум / За ред. А.Г. Соскова. - К.: Каравела, 2004. - 432 с.
10. Констатинов В.И., Мансуров Н.Н., Симонов А.Ф., Федоров-Королев А.А.. Сборник задач по теоретической электротехнике.- М.: Энергия, 1968.- 240 с.
11. Ломоносов В.Ю., Поливанов К.М., Михайлов О.П. Электротехника. - М.: Энергоатомиздат, 1990. - 400 с.
12. Лябук М.Н. Електротехніка: Навч. посібник. - Луцьк: ЛДТУ, 2005. - 683 с.
13. Матвіїв Д.І. Основи електротехніки і електроніки: Навч. посібник. - Дніпропетровськ: НГУ, 2005. - 133 с.
14. Міліх В.І. Електротехніка та електромеханіка: Навч. посібник. - К.: Каравела, 2005. - 375 с.
15. Морозов А.Г. Электротехника, электроника и импульсная техника: Учеб. пособие.- М.: Высш. школа, 1987. - 448 с.
16. Общая электротехника с основами электроники: Учебник/В.А. Гаврилюк, Б.С. Гершунский, А.В. Ковальчук и др. - К.: Выща школа, 1980. - 480 с.
17. Основы промышленной электроники: Учеб. пособие / В.Г. Герасимов, О.М. Князьков, Д.Е. Краснопольский; Под ред. В.Г. Герасимова. - М.: Высш. школа, 1986. - 336 с.
18. Паначевний Б. І., Свергун Ю.Ф. Загальна електротехніка: теорія і практикум: Підручник. - К.: Каравела, 2004. - 440 с.
19. Рекус Г.Г., Белоусов А.И.. Сборник задач по электротехнике и основами электроники: Учеб. пособие.- М: Высш. школа, 2001. - 416 с.
20. Рекус Г.Г., Чесноков В.Н. Лабораторный практикум по электротехнике и основам электроники: Учеб. пособие. - М: Высш. школа, 2001. - 255 с.

21. Сборник задач по общей электротехнике/Под ред. В.С. Пантюшина. - М.: Высш. школа, 1973. - 280 с.
22. Справочное пособие по электротехнике и основам электроники: Учеб. пособие/П.В. Ермуратский, А.А. Косякин, В.С. Листвин и др.; Под ред. А.В. Нетушила, 1986. – 248 с.
23. Тамм И.Е. Основы теории электричества: Учеб. пособие. – М.: ФИЗМАТЛИТ, 2003. – 615 с.
24. Титаренко М.В. Електротехніка: Навч. посібник. - К.: Кондор, 2004. – 240 с.
25. Трегуб А. П. Электротехника: Учеб. пособие/Под ред. Э.В. Кузнецова. - К.: Высш. школа, 1987. - 600 с.
26. Электротехника: Учеб. пособие/М.Ю. Анвельт, В.Г. Герасимов, В.П. Данильченко и др.; Под ред. В.С.Пантюшина.- М.: Высш. школа, 1976. - 560 с.
27. Электротехника: Учебник/Х.Э. Зейдель, В.В. Коген-Далин, В.В. Крымов и др.; Под ред. В.Г. Герасимова. - М.: Высш. школа, 1985. - 480 с.
28. Электротехника и электроника: Учеб. пособие/В.В. Кононенко, В.И. Мишкевич, В.В. Муханов и др. –Ростов н/Д: Феникс, 2004. - 747 с.

2. Додаткова література

1. Бессонов Л.А. Теоретические основы электротехники: В 2 т. - М., 1978. Т.1. - 528 с; Т.2. - 232 с.
2. Брускин Д.З., Зорохович А.Е., Хвостов В.С. Электрические машины: В 2 т. - М, 1979. Т.1. - 288 с; Т.2. - 304 с.
3. Вешеневский С.Н. Характеристики электродвигателей в электроприводе. – М.: Энергия, 1977. – 432 с.
4. Воробьев А.Д., Сегал В.Л. Справочник электромеханика по лифтам. – М.: Моск. рабочий, 1980. – 208 с.
5. Гоков А.М., Жидко Е.А. Основы электротехники и электроники. Элементы общей теории электротехники: Учеб. пособие. – Х.: ХНЕУ, 2006
6. Горбачев Г.Н., Чаплыгин Е.Е. Промышленная электроника: Учебник/Под ред. В.А. Лабунцова. – М.: Энергоатомиздат, 1988. – 320 с.
7. Добронравов С.С., Дронов В.Г. Строительные машины и основы автоматизации: Учебник. – М.: Высш. школа, 2001. – 575 с.
8. Иванов А.А. Справочник по электротехнике.-К.: Высш. школа, 1984. - 304 с.
9. Калашников С.Г. Электричество: Учеб. пособие. – М.: Наука, 1985. – 576 с.
10. Лотоцький К.В. Електричні машини і основи електропривода. – К.: Вища школа, 1970. – 475 с.
11. Нечаев В.В. Электрические машины. – М.: Высш. школа, 1967. – 219 с.
12. Панев Б.И. Электрические измерения: Справочник (в вопросах и ответах). – М.: Агропромиздат, 1987. – 224 с.
13. Правила техники безопасности при эксплуатации электроустановок. – М.: Энергия, 1980. – 158 с.
14. Правила устройства электроустановок: Справочник. – М.: Госэнергоиздат, 2000. – 812 с.

15. Сборник задач и упражнений по теоретическим основам электротехники. Под ред. П. А. Ионкина. – М.: Энергоиздат, 1982. - 768 с.
16. Сборник задач по теоретическим основам электротехники/Под ред. Л.А. Бессонова. - М.: Высш. школа, 2000. - 528 с.
17. Усатенко С.Т., Каченюк Т.К., Терехова М.В. Выполнение электрических схем по ЕСКД: Справочник. – М.: Изд-во стандартов, 1989. – 325 с.
18. Хмара Л.А., Колісник М.П., Голубченко О.І. Будівельні крани: Конструкції та експлуатація. – К.: Техніка, 2001. – 296 с.
19. Чиликин М.Г., Сандлер С.А. Общий курс электропривода: Учебник. – М.: Энергоатомиздат, 1981. – 576 с.
20. Шебес М. Р., Каблукова М.В. Задачник по теории линейных электрических цепей. - М.: Высш. школа, 1990. - 544 с.
21. Электрические измерения: Учебник для вузов/ Л.И. Байда, Н.С. Добровровский, Е.М. Душин и др.; Под ред А.В. Фремке и Е.М. Душина. – Л.: Энергия, 1980. – 392 с.
22. Электротехника. Терминология: Справочное пособие. – Вып. 3. – М.: Изд-во стандартов, 1989. - 343 с
23. Электротехнический справочник: В 3 т. Т.3. Кн.2. Использование электрической энергии/ Под общ. ред. профессоров МЭИ: И.Н.Орлова (гл. ред.) и др. - М., 1988. - 661 с.

3. Ресурси Інтернет

1. <http://www.tspu.tula.ru/res/fizika/Elektrotehnika/> - Воропаев Е.Г. Электротехника: Учеб. пособие.- Тула, 1999. - Електронний підручник
2. <http://www.eprivod.ru/publics.htm> - Ильинский Н.Ф. Основы электропривода: Учеб. пособие.
3. <http://www.induction.ru/books/book129/book129content.htm> - Кулик А.Ю. Электрические машины. – М.: Высшая школа, 1969.
4. http://www.ssga.ru/AllMetodMaterial/metod_mat_for_ioot/metodichki/matusko/index_m.html - Матуско В.Н. Общая электротехника: Учеб. пособие.- Новосибирск, 2003.
5. http://toe.stf.mrsu.ru/Demo_versia/book/ - Некрасова Н.Р., Коваленко О.Ю. Общая электротехника и электроника/Под общ. редакц. С.А. Панфилова. - Саранск, Мордовский ГУ, 2003. - Електронний підручник.
6. <http://www.ing-sistem.ru/> - Сайт «Інженерні системи».
7. <http://www.ielectro.ru/finder.html> - Інформаційна система “ielectro” – Усе про електротехніку.
8. <http://www.electrolibrary.narod.ru/> - Электронная электротехническая библиотека.
9. <http://www.elma.ho.ua/index.html> - Сайт «Електричні машини. Питання і відповіді».
10. <http://www.ost-gost.ru/podrazdel-14.html> - Сайт нормативно-технічної документації. Розділ «Електротехніка».
11. <http://www.stn.com.ua> - Сайт компанії «Сучасні технології нагрівання».

СПИСОК СКОРОЧЕНЬ

АД - асинхронний двигун

АЧХ - амплітудно-частотна характеристика

БНіП - будівельні норми і правила

ВАХ - вольт-амперна характеристика

ВПМ - вантажопідйомна машина

ЄСКД - єдина система конструкторської документації

к.з. - коротке замикання

ККД - коефіцієнт корисної дії

МПТ - машина постійного струму

ПРП - пускорегулюючий пристрій

ПБЕ - правила будови електроустановок

ПТЕ - правила технічної експлуатації

ПТБ - правила техніки безпеки

СГ - синхронний генератор

СД - синхронний двигун

СКП - система кондиціонування повітря

СМ - синхронна машина

ТП - трансформаторний пункт

ЕВП - електровимірювальний прилад

ЕРС - електрорушійна сила

ЕП - електропривод

ЕРМ - електрична ручна машина

ПРЕДМЕТНИЙ ПОКАЖЧИК

А

Автоматичний вимикач 16, 288,
297, 300, 307, 336, 343
Автотрансформатор 16, 121, 150,
205, 271, 319
Ампер 10
Амперметр 14, 16, 112, 115, 223
Амплітуда 58
 комплексна 58
Анод 213, 215
Апарат зварювальний:
 з вбудованим дроселем 285
 з окремим дроселем 283
 з рухомим магнітним шунтом 285

Б

База транзистора 21, 74

В

Ват 31, 103
Ватметр 117, 132
Вібратор 309, 311
Відносна тривалість включення 256
Вимірювання потужності 112, 117,
131
 активної потужності 112, 132
 електричної енергії 131, 135
 напруги 112, 115, 127
 неелектричних величин 136
 реактивної потужності 132, 134
 струму 112, 115, 127
Вимикач кінцевий 288, 299
Випрямляч
 двонапівперіодний 223
 керований 228
 напівпровідниковий 221
 однофазна мостова схема 225, 230
 однофазний 222, 228
 однофазний двонапівперіод-
 ний 222
 трифазна мостова схема 232
 трифазний з нульовою точ-
 кою 230

Вольт 11

Вольтметр 16, 112, 115, 122

Вузол 15

Г

Генератор 16, 97
 зварювальний 281
 постійного струму 156, 158
 синхронний 193, 195
Гілка 15

Д

Двигун
 асинхронний 170
 асинхронний однофазний 187
 вентильний 274
 постійного струму 161
 синхронний 193, 202
Двополюсник:
 активний, 15, 46
 пасивний, 15, 45
Джерела
 світла 324
 струму 13, 281
Діаграма векторна 59
Діаграма навантажувальна 253
Діапазон регулювання 262, 266, 270
Діод напівпровідниковий 213
Діюче значення 57, 60
Дослід
 короткого замикання 147
 холостого ходу 147, 196

Є

Ємність 12

ЄСКД 15

Е

Електрична ручна машина 309
Електричний:
 знак 341
 опік 341
 удар 340

Електричний привод 242
Електробезпека 340
Електровимірювальна установка 112
Електровимірювальний прилад 16,
112:
аналоговий 112, 122, 130
електродинамічний 117, 132
електромагнітної системи 116,
129
магнітоелектричної системи 114,
128
феродинамічний 117, 118, 132
цифровий 112, 123, 130
Електродвигун:
асинхронний 169, 207, 255, 269,
290
змішаного збудження 160, 165
крановий 289, 309
незалежного збудження 160, 161,
263
послідовного збудження 160, 164
постійного струму 156, 160, 161
синхронний 193, 202
Електрорушійна сила (ЕРС) 11, 13:
самоіндукції 55, 65, 234
статора і ротора 172
Електроконвектор 338
Електропрогрів бетону 316
Електропрогрів ґрунту 320
Елемент:
активний 13
ємнісний 13, 56
індуктивний 13, 16, 55
лінійний 11
нелінійний 11
пасивний 12
резистивний 13, 16, 55
Емітер транзистора 217
ЕРС 11, 13

Ж

Жорсткість механічної характе-
ристики 248, 263, 270

З

Заземлення захисне 344

Закон Джоуля-Ленца 23
Закон електромагнітної індукції 55,
141, 143, 158
Закон Ома, 18
узагальнений для ділянки кола 18
у комплексній формі для ділянки
кола 65, 68, 70
Закони Кірхгофа 31, 35, 60
Занулення захисне 344
Зварювання 279:
дугове 279,
контактне 280
під флюсом 280

І

Інвертор 234
Індуктивність 12
взаємна 12

К

Катод напівпровідникового діо-
да 213
Клас точності ЕВП 125, 129
Ковзання 171, 179
Коефіцієнт:
запасу 253
згладжування фільтра 236
корисної дії 22:
асинхронного двигуна 177
трансформатора 148
перевантажувальної здатнос-
ті 179
плавності регулювання 262
потужності $\cos\varphi$ 75
трансформації 143, 173
Колектор електричної машини 157
Колектор транзистора 217
Коло електричне 9:
лінійне 11
нелінійне 11
нерозгалужене 11
розгалужене 11, 15

Комплекс

повного опору 72, 79

повної потужності 76, 105
повної провідності 82
Конденсатор 13, 16, 56, 69
Кондиціонер 333
Контролер 288, 291
Кут:
зрушення фаз 66, 68, 69, 70, 79
керування 228

Л

Ліфт 334

М

Машина вантажопідйомна 288
Машина електрична 140
асинхронна 169
постійного струму 156
синхронна 193
Метод
безпосередньої оцінки 127
вузлових потенціалів 37
диференційний 127
еквівалентних величин 254
еквівалентних перетворень 25, 28
еквівалентного генератора 43
заміщення 127
контурних струмів 39
накладання 40
нульовий 127
питомої потужності 329
порівняння 127
середніх втрат 254
Міра:
міра зразкова 112
міра робоча 112
Момент:
активний опору 247
електромагнітний 161, 171, 197
обертовий 161, 178
опору (статичний) 246

Н

Нагрівостійкість 252, 289
Напруга 11
короткого замикання 146

лінійна 25, 97, 99
номінальна 21
фазна 97, 98
холостого ходу 19, 43

Нейтраль 98, 101
Нормуюче значення ЕВП 113

О

Обмотка збудження 156, 160
вторинна трансформатора 142
первинна трансформатора 142
Ом 12
Опалення електричне 338
Опір 12
активний 25, 55, 63
вхідний 45, 46, 113, 122
додатковий 115, 119, 180
еквівалентний 25
ємнісний 61
індуктивний 61, 67
комплексний 67, 69, 72, 76, 79
повний індуктивної котушки 72
реактивний 69
Освітленість 323

П

Перетворювач вимірювальний 112, 118, 120
Перетворювач випрямний 221
Період 11
Підсилювач 238
Плавність регулювання 262, 266, 269, 272
Потужність 21
активна 74, 75, 85, 104
втрат 22
електромагнітна 117, 198
індуктивної котушки 73
корисна 22, 148, 197
механічна 161, 177, 197, 245
миттєва 55, 64
номінальна 85, 160, 177
повна 22, 74, 75, 78, 85, 104
реактивна 69, 71, 74, 78, 104
реактивна ємнісна 71

реактивна індуктивна 69, 74, 75
Поріг чутливості 113
Послідовність фаз:
зворотна 96
пряма 96
Похибка 124:
абсолютна 124
відносна 124
випадкова 124
методична 124, 129
приведена 125
систематична 124
Принцип
взаємності 41
суперпозиції 40
Провідність 26
активна 82
повна 82, 103
реактивна 82

Р

Реакція якоря 200, 282
Режим
гальмовий 171, 184
генераторний 171
динамічного гальмування 185
двигуна 171
короткого замикання 19, 144
короткочасний 255
номінальний 21
перехідний 247
повторно-короткочасний 256
погоджений 24
протिवключення 171, 185
сталий 162, 179, 185
тривалий 255
холостого ходу 19, 144
Резистор 13, 16, 163, 289, 298
Резонанс
напруг 80
струму 84
Реле 16, 293
Робота електричного струму 21
Ротор 169:
короткозамкнений 169, 182

фазний 169, 183
неявно полюсний 193
явно полюсний 193

С

Світловий потік 323
Сила світла 323
Система:
вимірювальна інформаційна 111, 112
водопостачання 336
кондиціонування повітря 333
Скважність керуючих імпульсів 267
Смуга пропускання підсилювача 240
Споживач електроенергії:
несиметричний 99
симетричний 99
Статор 169
Стійкість статична 199, 250
Струм 10:
активна складова 61, 206
змінний 10, 11
контурний 39
короткого замикання 19
лінійний 98, 100, 105
номінальний 21
періодичний 10
постійний 10
реактивна складова 61, 206
синусоїдальний 11
фазний 101
холостого ходу 144
Схема заміщення 13
асинхронного двигуна 175
кола 14
трансформатора 144, 145

Т

Тиристор 215
Транзистор 217
Трансформатор 140, 142:
вимірювальний 118
вимірювальний напруги 120, 130
вимірювальний струму 120, 129
однофазний 142, 143

трифазний 142, 149
Трикутник:
комплексів опорів 73
напруг 73
Трифазна система 95:
несиметрична 99
симетрична 95

У

Установка електровимірювальна 112

Ф

Фаза 95
початкова 58
Фільтр:
ємнісний 237
згладжуючий 236
індуктивний 237

Х

Характеристика:
амплітудно-частотна 238
вольт-амперна 13, 212
електромеханічна 162
зовнішня генератора 160, 197
зовнішня трансформатора 148
кутова синхронної машини 198
механічна 161, 162, 180, 184
моментна 180
природна 163

реостатна 163
швидкісна 161, 180
холостого ходу 160, 196

Ц

Ціна поділки 113

Ч

Частота 11:
обертання 161, 243
Чутливість ЕВП 113
абсолютна чутливість 113
відносна чутливість 113
поріг чутливості 113

Ш

Швидкість обертання 158, 161, 180,
198, 202
Шунт 115, 119

Щ

Щітки 157, 171, 282, 310

Я

Якір 156, 195

ДОДАТКИ

Додаток 1

Літерні позначення основних електричних і магнітних величин

- A – потенціал магнітний, векторний.
 B – магнітна індукція.
 B, b – реактивна провідність.
 C – ємність.
 E – напруженість електричного поля.
 E, e – електрорушійна сила.
 F – магніторушійна сила.
 f – частота коливань.
 G, g – активна провідність.
 H – напруженість магнітного поля.
 I, i – струм.
 j – щільність струму.
 L – індуктивність власна.
 M – взаємна індуктивність.
 m – число фаз багатофазних систем.
 n – коефіцієнт трансформації.
 P – потужність активна.
 Q – потужність реактивна.
 R, r – опір електричний, опір активний.
 S – повна потужність.
 T – період коливань.
 U, u – напруга.
 W – електромагнітна енергія.
 w – кількість витків.
 X, x – реактивний опір.
 Y, y – повна провідність.
 Z, z – повний опір.
 γ – питома електрична провідність.
 δ – коефіцієнт затухання, кут втрат.
 ρ – питомий електричний опір.
 Φ – магнітний потік.
 ϕ – електричний потенціал, зсув фаз між струмом і напругою.
 ψ – потокозчеплення.
 Ω, ω – кругова частота коливань.

Одиниці Міжнародної системи (SI)

Найменування величини	Одиниця			
	Назва	Розмірність	Позначення	
			українське	міжнародне
Основні одиниці				
Довжина	метр	m	m	m
Маса	кілограм	kg	kg	kg
Час	секунда	s	s	s
Сила електричного струму	ампер	A	A	A
Температура	градус Кельвіна	K	K	K
Сила світла	кандела	cd	cd	cd
Похідні одиниці електричних величин				
Густина електричного струму	ампер на квадратний метр	A/m^2	A/m^2	A/m^2
Кількість електрики	кулон	$A \cdot s$	C	C
Електрична напруга, ЕРС	вольт	$\frac{kg \cdot m^2}{A \cdot s}$	V	V
Електрична ємність	фарада	$\frac{A^2 \cdot s^4}{kg \cdot m^2} = \frac{C}{Om}$	F	F
Електричний опір	ом	$\frac{kg \cdot m^2}{A^2 \cdot s^3} = \frac{B}{A}$	Om	Ω
Питомий електричний опір	ом на метр	$\frac{kg \cdot m^3}{A^2 \cdot s^3} = Om \cdot m$	$Om \cdot m$	$\Omega \cdot m$
Електрична провідність	сименс		S	S
Похідні одиниці магнітних величин				
Магнітний потік	вебер	$\frac{kg \cdot m^2}{A \cdot s^2}$	Wb	Wb
Магнітна індукція	тесла	$\frac{kg}{A \cdot s^2}$	T	
Напруженість магнітного поля	ампер на метр	$\frac{A}{m}$	$\frac{A}{m}$	$\frac{A}{m}$
Індуктивність	генрі	$\frac{kg \cdot m^2}{A^2 \cdot s^2} = Om \cdot s$	H	H
Магнітна проникність	генрі на метр	$\frac{H}{m}$	$\frac{H}{m}$	$\frac{H}{m}$
Магніторушійна сила	ампер	A	A	A
Електромагнітна енергія	джоуль		J	J
Активна потужність	ват	VA	W	W
Реактивна потужність	вар	VA	Var	Var
Повна потужність	вольт-ампер	VA	VA	VA

Двигуни постійного струму тривалого режиму типу ПН, 220 В,
захищені з регулюванням частоти обертання до 1:2

Тип	$P_{н}$, кВт	$n_{н}$, об/хв	$I_{я,н}$, А	Число активних дротів якоря, N	Число паралельних гілок якоря	Число пар полюсів, 2p	Опір			Витків на полюс		Номинальний струм паралельної обмотки, А	Номинальний потік полюса Ф, мВб	Момент інерції якоря J, кг м ²	Маса двигуна, кг
							Якір+додаткові полюси, $R_{я}+R_{дл}$, Ом	Стабілізуюча обмотка, $R_{пос}$, Ом	Паралельна обмотка, $R_{пар}$, Ом	Стабілізуюча обмотка, $W_{пос}$	Паралельна обмотка, $W_{пар}$				
ПН-45	2,5	1000-1950	14,1	1218	2	4	1,37	0,11	372	12	2400	0,48	4,8	0,07	107
	4,4	1500-2100	23,5	812	2	4	0,6	0,043	298	9	2300	0,6	5,0	0,07	107
	6,6	2200- 2400	35,0	522	2	4	0,26	0,043	298	9	2300	0,6	5,4	0,07	107
ПН-68	3,7	1000- 1750	21,0	1116	2	4	0,89	0,05	250	11	2200	0,71	5,2	0,125	135
	6,5	1550- 2000	35,0	744	2	4	0,364	0,012	250	6	2200	0,71	5,2	0,125	135
	10,0	2250- 2400	52,2	496	2	4	0,17	0,012	188	6	1900	0,95	5,6	0,125	135
ПН-85	5,6	1000-1750	30,0	744	2	4	0,48	0,04	228	8	1750	0,78	8,1	0,16	175
	9,0	1500- 2000	48,0	496	2	4	0,22	0,02	228	6	1750	0,78	8,3	0,16	175
ПН-100	5,8	780- 1500	34,0	1112	2	4	0,62	0,013	136	6	1800	1,3	7,0	0,4	290
	10,0	1090- 1900	55,0	834	2	4	0,33	0,009	136	6	1800	1,3	6,6	0,4	290
	15,0	1560- 2000	81,5	556	2	4	0,143	0,004	96	4	1500	1,8	7,1	0,4	175
ПН-145	8,5	780- 1500	46,5	834	2	4	0,36	0,014	166	8	1700	1,1	9,3	0,5	330
	13,5	1050- 1500	73,0	556	2	4	0,12	0,006	150	4	1700	1,2	10,5	0,5	330
	21,0	1500- 1900	110	420	2	4	0,09	0,004	150	4	1700	1,2	9,7	0,5	330
ПН-205	14,0	750- 1500	76	700	2	4	0,22	0,01	92	8	1500	1,9	11,5	1,0	480
	20,5	970- 1700	110	556	2	4	0,08	0,006	92	6	1500	1,9	11,4	1,0	480
	33,5	1580- 1900	174	350	2	4	0,054	0,002	92	3	1500	1,9	11,2	1,0	480
ПН-290	19,0	750- 1300	102	524	2	4	0,122	0,007	86	6	1400	2,1	15,6	1,2	530
	29,0	1000- 1600	151	396	2	4	0,070	0,002	57	3	1250	3,1	15,5	1,2	530
	46,5	1500- 1800	238	278	2	4	0,035	0,002	59	3	1250	3,0	15,0	1,2	530

Кранові асинхронні двигуни з фазним ротором типів МТ і МТВ, 380 В, 50 Гц, ПВ = 25%
(ізоляція класів Е, В)

Тип	P_n , кВт	n_n , об/хв	M_M/M_H	Статор						Ротор					Момент інерції ротора J , кг м ²	Маса двигуна, кг
				cosφ		$I_{с.н.}$, А	$I_{с.хх.}$, А	R_c , Ом	X_c , Ом	E_p , В	$I_{р.н.}$, А	R_p , Ом	X_p , Ом	Коефф. трансформації напруги k_e ($k_R = k_e^2$)		
				номінальний	холостого ходу											
МТ011-6	1,4	885	2,3	0,65	0,15	5,3	3,9	5,98	3,93	112	9,3	0,695	0,57	3,14	0,0212	51
МТ012-6	2,2	895	2,3	0,67	0,13	7,5	5,4	3,6	2,58	144	11,0	0,67	0,58	2,5	0,0288	58
МТ111-6	3,5	915	2,3	0,70	0,11	10,5	6,6	2,16	2,03	181	13,7	0,525	0,755	1,96	0,0488	76
МТ112-6	5,0	925	2,5	0,69	0,12	14,8	9,5	1,32	1,39	206	16,6	0,50	0,43	1,72	0,0675	88
МТ211-6	7,5	935	2,5	0,70	0,09	20,8	11,8	0,68	1,07	255	19,8	0,44	0,88	1,38	0,115	120
МТВ311-6	11,0	945	2,8	0,73	0,09	28,6	16,7	0,54	0,57	172	42,5	0,11	0,225	2,1	0,225	170
МТВ311-8	7,5	695	2,5	0,71	0,09	21,0	14,0	0,88	0,965	251	20,5	0,47	0,72	1,41	0,275	210
МТВ312-6	16	955	2,8	0,77	0,08	37,6	20,6	0,33	0,41	208	49,5	0,0099	0,25	1,75	0,313	210
МТВ312-8	11	710	2,8	0,66	0,10	33,0	22,1	0,53	0,56	182	41,0	0,13	0,23	1,96	0,387	210
МТВ411-6	22	965	2,8	0,71	0,07	55,0	33,2	0,19	0,31	225	61,0	0,066	0,23	1,6	0,5	280
МТВ411-8	16	715	2,8	0,65	0,08	45,7	30,2	0,285	0,43	207	49,5	0,103	0,25	1,73	0,538	280
МТВ412-6	30	970	2,8	0,73	0,06	70,5	42,0	0,125	0,23	259	72,0	0,055	0,225	1,4	0,675	345
МТВ412-8	22	720	2,8	0,69	0,07	58,0	37,1	0,207	0,32	234	59,0	0,09	0,24	1,53	0,75	345
МТВ511-6	30	720	2,8	0,68	0,06	77,0	46,0	0,123	0,245	280	67,5	0,082	0,28	1,28	1,025	410
МТВ512-8	40	730	2,8	0,69	0,06	101	60	0,08	0,17	322	76,5	0,072	0,24	1,12	1,4	500

Кранові асинхронні двигуни з короткозамкнутим ротором типів МТК і МТКВ, 380 В, 50 Гц, ПВ = 25%
(ізоляція класів Е, В)

Тип	P_n , кВт	n_n , об/хв	M_M/M_H	M_P/M_H	Статор							
					$I_{сп}/I_{сн}$	cosφ			$I_{с.н.}$, А	$I_{с.хх.}$, А	R_c , Ом	X_c , Ом
						пус-ковий	номінальний	холос-того ходу				
МТК011-6	1,4	870	2,8	2,8	3,0	0,86	0,69	0,15	4,8	3,2	5,98	3,93
МТК012-6	2,2	875	2,8	2,8	3,1	0,85	0,7	0,13	7,2	4,6	3,6	2,58
МТК111-6	3,5	870	2,8	2,8	3,5	0,85	0,74	0,11	10,1	6,1	2,16	2,03
МТК112-6	5,0	890	3,0	3,0	3,9	0,80	0,75	0,12	13,5	8,4	1,32	1,39
МТК211-6	7,5	905	2,9	2,8	4,3	0,72	0,79	0,09	18,4	11,0	0,68	1,07
МТКВ311-6	11,0	910	3,1	2,8	4,9	0,72	0,8	0,09	26	15,7	0,54	0,575
МТКВ311-8	7,5	680	3,1	2,9	4,4	0,76	0,74	0,09	20	13,2	0,88	0,965
МТКВ312-6	16	905	3,1	2,8	4,9	0,70	0,79	0,08	37,8	19,8	0,33	0,41
МТКВ312-8	11	690	3,1	3,1	4,6	0,77	0,71	0,10	30,4	21,3	0,53	0,56
МТКВ411-6	22	935	3,0	2,8	5,2	0,61	0,78	0,07	50	29,7	0,19	0,31
МТКВ411-8	16	695	3,3	3,0	4,8	0,66	0,73	0,08	41	28,2	0,285	0,43
МТКВ412-6	28	945	3,3	2,8	5,6	0,60	0,81	0,06	62	35,1	0,125	0,23
МТКВ412-8	22	695	3,3	3,0	5,0	0,65	0,76	0,07	53,2	35,8	0,207	0,32
МТКВ511-6	28	700	3,4	3,1	5,4	0,61	0,75	0,06	68	40	0,123	0,245
МТКВ512-8	37	705	3,6	3,3	5,8	0,61	0,72	0,06	91	55	0,08	0,17

Технічні параметри синхронних двигунів

Тип	U_H , кВ	S_H , кВА	P_H , кВт	n_c , об/хв	$\cos\varphi_H$, опережа- ючий	$I_{c.H.}$, А	$I_{p.H.}$ при $\cos\varphi_H$, А	$I_{p.H.XX}$, А	M_M/M_H
ДС3-2121-16	10	17000	14070	375	0,85	983	561	350	2,1
МС325-12/12	10	7000	5400	500	0,8	404	367	212	2,4
МС325-12/12	6	8000	6150	500	0,8	770	408	211	1,85
МС321-7/6	6	900	675	1000	0,8	86,5	278	139	2,0
МС323-14/8	3	3850	3300	750	0,9	740	466	295	2,25
МС321-6/6	3	850	640	1000	0,8	164	164	190	2,25

Продовження додатку 6

Тип	Асинхронний пуск				Момент інерції ротора J , $\text{т}\cdot\text{м}^2$	Маса двигуна, т	Число витків		Обмоточний коефіцієнт статора, $k_{об}$	Полюсний поділок τ , мм
	$I_{c.п}/I_{c.H.}$	$M_{п}/M_H$	$M_{вх}/M_H$	$\cos\varphi_H$			фази статора, w_c	Одного полюса ротора		
ДС3-2121-16	6,1	0,545	1,88	0,1	50	110	72	44,5	0,945	536
МС325-12/12	6,5	0,65	1,1	0,149	12,7	54	126	54,5	0,89	607
МС325-12/12	5,8	0,7	1,29	0,151	15,7	56	72	54,5	0,918	607
МС321-7/6	5,5	1	0,8	0,281	0,135	5,7	216	49,5	0,945	420
МС323-14/8	6	0,8	0,8	0,196	1,32	14	45	45,5	0,945	500
МС321-6/6	4,6	0,8	0,65	0,28	0,12	5,2	135	43,5	0,88	420

Навчальне видання

Електротехніка у будівництві: Навчальний посібник.

Автори: проф. Ачкасов Анатолій Єгорович,
проф. Лушкін Володимир Андрійович,
доц. Охріменко Вячеслав Миколайович,
доц. Кузнецов Анатолій Іванович,
доц. Чернявська Маргарита Василівна,
ст.викл. Воронкова Тетяна Борисівна

Відповідальний за випуск А.І. Кузнецов

Редактор: М.З. Аляб'єв

Верстка: Ю.П. Степась

План 2009, поз. 13 П

Підп. до друку 13.03.09	.Формат 60 x 84 1/16.	Папір офісний.
Друк на ризографі.	Умовн.-друк.арк. 21,4	Обл.-вид.арк. 21,8
Замовл.№	Тираж 500 прим.	

61002, Харків, ХНАМГ, вул. Революції,12

Сектор оперативної поліграфії ІОЦ ХНАМГ

61002, Харків, ХНАМГ, вул. Революції, 12
