

МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ І НАУКИ, МОЛОДІ ТА СПОРТУ УКРАЇНИ  
ХАРКІВСЬКА НАЦІОНАЛЬНА АКАДЕМІЯ МІСЬКОГО ГОСПОДАРСТВА

**В. М. Охріменко, Т. Б. Воронкова**

**КОНСПЕКТ ЛЕКЦІЙ**

**3 КУРСУ**

# ***ЕЛЕКТРОТЕХНІКА У БУДІВНИЦТВІ***

*(для студентів 2 курсу та слухачів другої вищої освіти ФПО та ЗН  
напрямку підготовки 6.060101 – Будівництво,  
спеціальностей "ПЦБ", "МБГ" і "ТГПіВ")*

**Харків-ХНАМГ-2012**

**Охріменко В. М.** Конспект лекцій з курсу "Електротехніка у будівництві" (для студентів 2 курсу та слухачів другої вищої освіти ФПО та ЗН напрямку підготовки 6.060101 "Будівництво", спеціальностей "ПЦБ", "МБГ", ТГПіВ) / В. М. Охріменко, Т. Б. Воронкова; Харк. нац. акад. міськ. госп-ва – Х.: ХНАМГ, 2012. – 210 с.

Автори: доц. В. М. Охріменко,  
ст. викладач Т. Б. Воронкова

Рецензент: доц., канд. техн. наук М.В. Чернявська

Рекомендовано кафедрою "Інформаційні системи і технології в міському господарстві", протокол № 59 від 25.09 2009 р.

## ЗМІСТ

<b>Передмова .....</b>	<b>8</b>
<b>ЗМ 1. ЕЛЕКТРИЧНІ КОЛА .....</b>	<b>9</b>
<b>Тема 1. Основні терміни й поняття .....</b>	<b>9</b>
1.1. Електричне коло і його елементи .....	9
1.2. Класифікація електричних струмів, ЕРС і напруг .....	9
1.3. Елементи електричних кіл і їхні графічні зображення .....	10
1.4. Загальні правила виконання електричних схем .....	15
Контрольні запитання з теми 1 .....	16
<b>Тема 2. Фізичні процеси в колах постійного струму .....</b>	<b>17</b>
2.1. Закон Ома.....	17
2.2. Режим роботи джерела постійного струму .....	17
2.3. Робота й потужність постійного струму .....	19
2.4. Схеми з'єднання елементів кола .....	21
2.5. Закони Кірхгофа....	25
Контрольні запитання з теми 2 .....	28
<b>Тема 3. Методи розрахунку складних кіл постійного струму .....</b>	<b>29</b>
3.1. Застосування законів Кірхгофа для аналізу складних кіл .....	29
3.2. Метод вузлових потенціалів .....	31
3.3. Метод контурних струмів.....	33
3.4. Принцип суперпозиції (метод накладання) .....	34
3.5. Принцип взаємності .....	35
Контрольні запитання з теми 3 .....	37
<b>Тема 4. Фізичні процеси в колах змінного струму .....</b>	<b>37</b>
4.1. Основні відомості про змінний струм.....	37
4.2. Елементи схем заміщення із змінними струмами.....	38
4.3. Діючі й середні значення періодичних напруг і струмів .....	40
4.4. Комплексна форма подання синусоїдальних напруг і струмів .....	41
4.5. Діючі й середні значення синусоїдальних напруг і струмів.....	43
4.6. Комплексна форма запису законів Кірхгофа.....	43

Контрольні запитання з теми 4 .....	44
<b>Тема 5. Електричні кола однофазного змінного струму .....</b>	<b>45</b>
5.1. Електричне коло з резистивним елементом .....	45
5.2. Електричне коло з ідеальною індуктивною котушкою.....	47
5.3. Електричне коло з ідеальним конденсатором.....	50
5.4. Електричне коло з реальною індуктивною котушкою.....	53
5.5. Потужність індуктивної котушки.....	55
5.6. Послідовне з'єднання резистора і ідеального конденсатора.....	57
5.7. Послідовне з'єднання індуктивної котушки і конденсатора.....	60
5.8. Коло змінного струму з паралельно з'єднаними приймачами.....	62
5.9. Активні й реактивні складові провідності й струму.....	63
5.10. Підвищення коефіцієнта потужності в колах змінного струму .....	66
Контрольні запитання з теми 5.....	67
<b>Тема 6. Трифазні кола електричного струму.....</b>	<b>68</b>
6.1. Основні поняття і визначення .....	68
6.2. Схеми з'єднання обмоток трифазного генератора... ..	69
6.3. З'єднання трифазних споживачів «зіркою» .....	70
6.4. З'єднання трифазних споживачів «трикутником» ... ..	72
6.5. Трифазні чотирипровідні електричні кола.....	74
6.6. Активна, реактивна і повна потужність трифазного електричного кола	76
6.7. Порівняння умов роботи приймача при з'єднанні його фаз «трикутником» і «зіркою».....	77
Контрольні запитання з теми 6.....	78
<b>Тема 7. Електровимірювальні прилади.....</b>	<b>79</b>
7.1. Основні поняття.....	79
7.2. Класифікація електровимірювальних приладів... ..	80
7.3. Загальні характеристики електровимірювальних приладів.....	81
7.4. Вимірювальні перетворювачі.....	83
7.5. Електронні електровимірювальні прилади.....	83
Контрольні запитання з теми 7.....	84

<b>Тема 8. Методи електричних вимірювань.....</b>	<b>84</b>
8.1. Похибки і помилки вимірювань.....	84
8.2. Класифікація методів електричних вимірювань.....	86
8.3. Вимірювання струму і напруги.....	86
8.4. Вимірювання потужності і електричної енергії.....	87
8.5. Вимірювання неелектричних величин.....	90
Контрольні запитання з теми 8.....	91
<b>ЗМ 2. ТРАНСФОРМАТОРИ І ЕЛЕКТРИЧНІ МАШИНИ.....</b>	<b>92</b>
<b>Тема 9. Трансформатори.....</b>	<b>92</b>
9.1. Загальні відомості про трансформатори.....	92
9.2. Однофазний трансформатор .....	93
9.3. Паспортні дані й зовнішня характеристика трансформатора.....	96
9.4. Трифазні трансформатори.....	98
9.5. Автотрансформатори .....	99
9.6. Вимірювальні трансформатори .....	100
Контрольні запитання з теми 9....	101
<b>Тема 10. Електричні машини постійного струму. ....</b>	<b>101</b>
10.1. Будова машини постійного струму .....	101
10.2. Принцип дії генератора постійного струму.....	101
10.3. Втрати енергії і ККД. ....	102
10.4. Схеми включення обмоток збудження .....	103
10.5. Номінальні параметри і характеристики машин постійного струму .....	104
10.6. Електродвигуни постійного струму... ..	104
Контрольні запитання з теми 10....	109
<b>Тема 11. Асинхронні електричні машини .....</b>	<b>110</b>
11.1. Будова і принцип дії трифазної асинхронної машини .....	110
11.2. ЕРС статора і ротора. ....	111
11.3. Рівняння електричної рівноваги статора і ротора.....	113
11.4. Схема заміщення асинхронного двигуна.....	114
11.5. Втрати і ККД асинхронного двигуна .....	115

11.6. Обертний момент асинхронного двигуна...	116
11.7. Робочі характеристики асинхронних двигунів .....	119
11.8. Пуск асинхронних двигунів...	120
11.9. Механічні характеристики асинхронного двигуна в гальмових режимах	121
Контрольні запитання з теми 11 .....	124
<b>ЗМ 3. ОСНОВИ ЕЛЕКТРОНІКИ, ЕЛЕКТРОПРИВОД ТА</b>	
<b>ЕЛЕКТРООБЛАДНАННЯ ДЛЯ БУДІВНИЦТВА .....</b>	<b>125</b>
<b>Тема 13. Основи промислової електроніки.....</b>	<b>125</b>
13.1. Елементи напівпровідникової техніки .....	125
13.2. Напівпровідникові випрямлячі. ....	134
13.3. Згладжуючі фільтри .....	144
13.4. Підсилювачі... ..	146
Контрольні запитання з теми 13 .....	149
<b>Тема 14. Загальні відомості про електропривод .....</b>	<b>149</b>
14.1. Основні поняття.....	159
14.2. Механіка електроприводу. ....	151
14.3. Рівняння руху електроприводу. ....	153
14.4. Механічні характеристики виробничих механізмів і електродвигунів	155
14.5. Вибір електродвигуна.....	158
Контрольні запитання з теми 14.....	162
<b>Тема 15. Регулювання швидкості електроприводів.....</b>	<b>163</b>
15.1. Основні показники регулювання кутової швидкості електроприводів	163
15.2. Регулювання кутової швидкості двигуна постійного струму з незалежним збудженням.....	164
15.3. Регулювання кутової швидкості асинхронних двигунів.....	167
Контрольні запитання з теми 15 .....	169
<b>Тема 16. Електрообладнання зварювальних установок .....</b>	<b>170</b>
16.1. Види електричного зварювання.....	170
16.2. Основні вимоги до джерел живлення зварювальної дуги.....	171
16.3. Зварювальні перетворювачі постійного струму .....	172

16.4. Зварювальні апарати змінного струму .....	174
Контрольні запитання з теми 16.....	177
<b>Тема 17. Електрообладнання вантажопідйомних машин.....</b>	<b>178</b>
17.1. Загальні відомості про вантажопідйомні машини .....	178
17.2. Електродвигуни вантажопідйомних машин.....	179
17.3. Елементи апаратури керування.....	181
Контрольні запитання з теми 17.....	185
<b>Тема 18. Електропрогрів бетону і ґрунту. ....</b>	<b>185</b>
18.1. Електропрогрів бетону.....	185
18.2. Електропрогрів ґрунту .....	189
18.3. Техніка безпеки при електропрогріві.....	191
Контрольні запитання з теми 18... ..	191
<b>Тема 19. Електроосвітлювальні установки.....</b>	<b>192</b>
19.1. Загальні відомості.....	192
19.2. Джерела світла і освітлювальна арматура .....	193
19.3. Обладнання електричного освітлення на будівельних майданчках. ...	196
19.4. Норми освітленості, спрощені способи розрахунку освітлювальних установок .....	198
Контрольні запитання з теми 19.....	200
<b>Тема 20. Електробезпека в будівництві .....</b>	<b>200</b>
20.1. Загальні відомості.....	200
20.2. Дія електричного струму на організм людини.....	200
20.3. Класифікація умов роботи за ступенем електробезпеки.....	202
20.4. Заходи щодо забезпечення безпечного ведення робіт з електроустановками .....	203
20.5. Захисне заземлення і занулення.....	204
Контрольні запитання з теми 20. ....	207
<b>Список джерел.....</b>	<b>208</b>

## ПЕРЕДМОВА

Вивчення дисципліни "Електротехніка у будівництві" передбачено навчальними планами підготовки бакалавра і перепідготовки спеціаліста за напрямком 6.060101 "Будівництво" для студентів будівельних спеціальностей "Промислове і цивільне будівництво", "Міське будівництво і господарство", "Теплогазопостачання і вентиляція".

Статус дисципліни – нормативна, вона базується на знаннях вищої математики, фізики, хімії і теоретичної механіки.

Головні завдання дисципліни "Електротехніка у будівництві":

вивчення теоретичних і практичних засад розрахунків електричних кіл постійного і змінного струму;

освоєння принципів роботи електричного обладнання будівельних майданчиків і підприємств будівельної індустрії;

набуття практичних навичок виконання електричних розрахунків в обсязі програми курсу.

Метою вивчення дисципліни є формування у студентів системи теоретичних і практичних знань з теорії електричних кіл, трансформаторів і електричних машин, основ промислової електроніки і електропривода.

Предметом вивчення дисципліни є елементи систем електроспоживання будівельних майданчиків, будівель і споруд.

Необхідним умовою успішного засвоєння навчального матеріалу дисципліни є самостійна робота студентів з літературою, стандартами і нормативними документами.



## ЗМ 1. ЕЛЕКТРИЧНІ КОЛА

### ТЕМА 1 ОСНОВНІ ТЕРМІНИ Й ПОНЯТТЯ

#### 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**. Частина 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**.

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

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

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

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

В Міжнародній системі (SI) одиницею сили струму є ампер (А).

Домінуюче значення серед змінних струмів мають періодичні струми. **Періодичним** називають такий струм, миттєві значення якого повторюються через рівні проміжки часу. Найменший проміжок часу, після закінчення якого миттєві значення струму повторюються, називають **періодом** і позначають літерою  $T$ . Число періодів в одну секунду називають **частотою** періодичного струму  $f$ . Частоту вимірюють у Герцах (Гц). Частота й період зв'язані співвідношенням

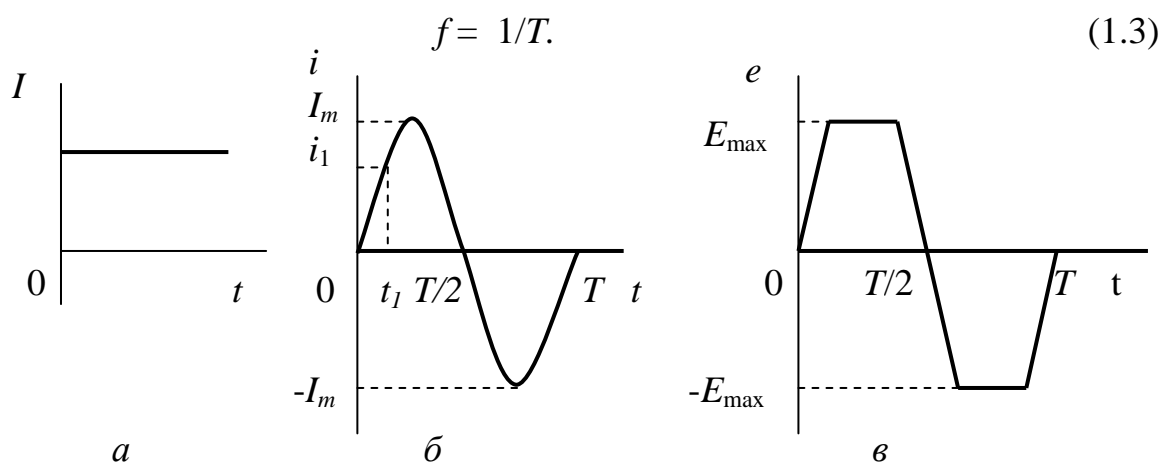


Рис. 1.1 - Форми кривих постійних і періодичних струмів (а і б) і ЕРС (в)

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  $I_m$ .

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**».

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 б 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.

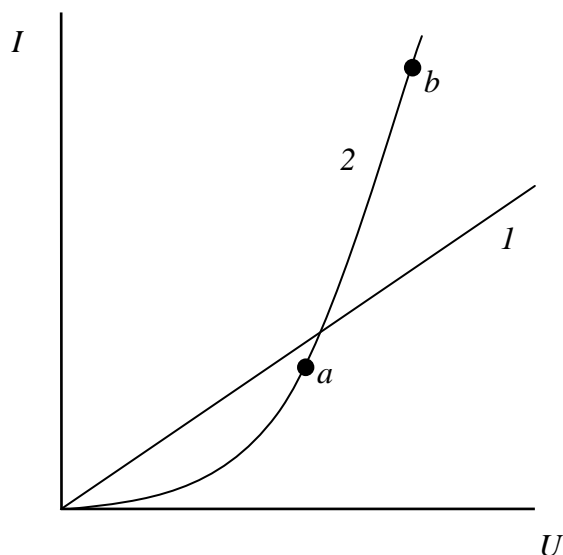


Рис.1.2 - Характеристики елементів кола: 1 – лінійна, 2 -нелінійна

**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 ( $\psi$ ,  $\psi_i$ ) даного пристрою:  $\psi = L \cdot I$  або  $\psi_i = L \cdot i$ . 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  $\psi_{21}$  другого елемента (перший індекс), що обумовлене струмом  $i_1$  першого елемента (другий індекс), називають **потокозчепленням взаєміндукції** 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  $\psi_{21t} = M \cdot i_1$ .

**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**  $R$ . 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).

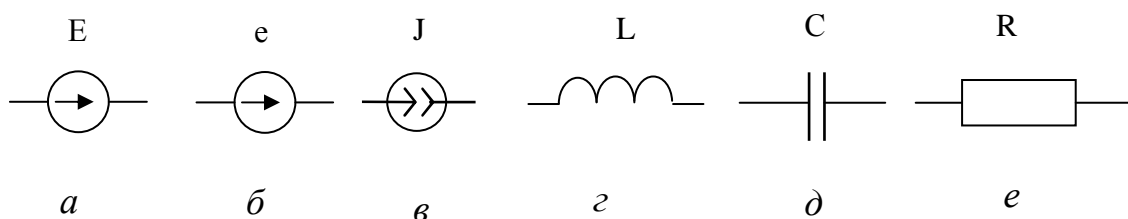


Рис. 1.3 - Графічні позначення ідеальних елементів: джерело ЕРС постійного струму (а), джерело ЕРС змінного струму (б), джерело струму (в), індуктивність (г), ємність (д), резистор (е)

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  $U(I)$ .

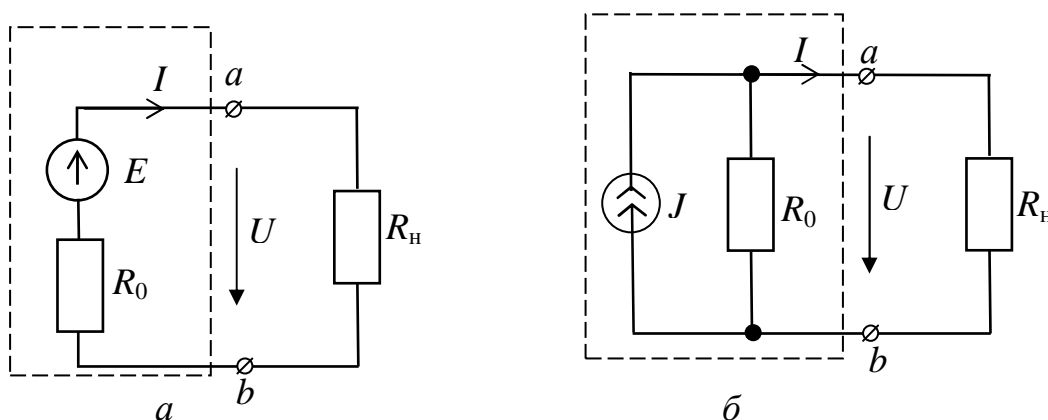


Рис.1.4 - Схеми заміщення джерел ЕРС (а) і струму (б)

Якщо в схемі кола внутрішній опір джерела електричної енергії  $R_0$  малий у порівнянні з опором навантаження  $R_H$ , то справедлива нерівність  $R_0 I \ll E$ . У цьо-

му 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  $I = E/(R_0 + R_n) \approx \approx E/R_0 = J = \text{const}$  не залежить від опору навантаження і джерело називається **джерелом струму**.

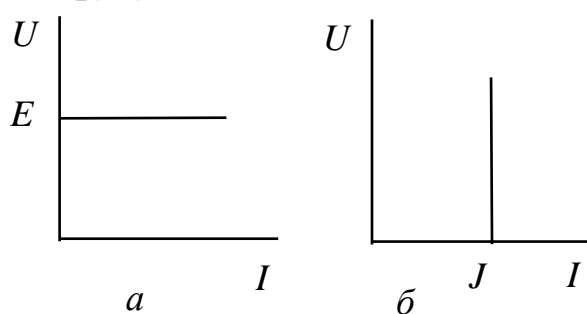


Рис.1.5 - Зовнішні характеристики:

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.

Графічне зображення кола, в якому замість реальних представлено 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.

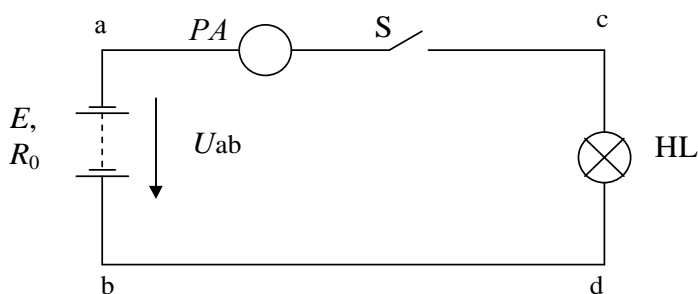


Рис.1.6 - Схема найпростішого електричного кола

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 урахують 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**.

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.

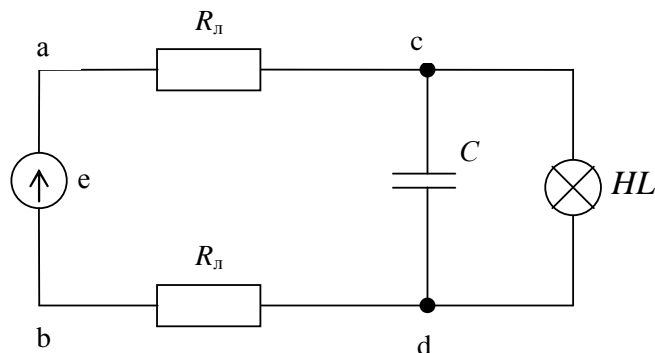


Рис.1.7 - Схема кола змінного струму

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, 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 вимоги 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 ДЕРЖСТАНДАРТОМ 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.

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 відрізнятися 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).

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		

Перша буква коду (обов'язкова)	Група видів елементів	Приклади видів елементів	Двобуквенний код
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. У чому відмінність нелінійного електричного кола від лінійного?
8. Дайте визначення такого параметра електричного кола як опір. В яких одиницях вимірюють опір?
9. Дайте визначення такого параметра електричного кола як індуктивність. В яких одиницях вимірюють індуктивність?
10. Дайте визначення такого параметра електричного кола як взаємодіючі індуктивність.
11. Дайте визначення такого параметра електричного кола як ємність. В яких одиницях вимірюють ємність?
12. Поясніть розходження між активними й пасивними елементами електричного кола.
13. Що розуміють під ідеальним елементом електричного кола? Приведіть приклади?
14. Що розуміють під контуром електричного кола?
15. Які напрямки струмів і ЕРС прийняті за позитивні?



## ТЕМА 2

### ФІЗИЧНІ ПРОЦЕСИ В КОЛАХ ПОСТІЙНОГО СТРУМУ

#### 2.1. Закон Ома

**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;  $R_{\Pi}$  - повний опір кола, Ом.

Повний опір кола  $R_{\Pi}$  являє собою суму опорів навантаження  $R_H$  (зовнішній опір кола), опору лінії  $R_L$  (опір сполучних проводів) і внутрішнього опору джерела  $R_0$  :

$$R_{\Pi} = R_H + R_L + R_0 . \quad (2.2)$$

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. Режим 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  $R_H$  (рис. 2.1).

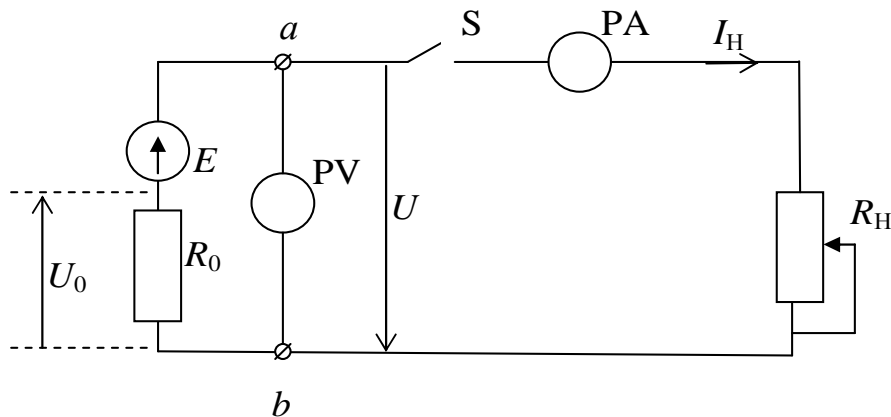


Рис.2.1 - Найпростіше коло постійного струму

Внаслідок того що ЕРС джерела (рис. 2.1) дорівнює сумі падінь напруги на зовнішньому  $R_H$  і внутрішньому  $R_0$  опорах ділянки кола  $E = U + U_0$ , можемо записати

$$U = E - U_0 . \quad (2.4)$$

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

$$U_0 = I_H \cdot R_0 . \quad (2.5)$$

Після підстановки (2.6) у (2.5) матимемо

$$U = E - I_H \cdot R_0 . \quad (2.6)$$

Вираз (2.6) 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:

$$I_H = \frac{E}{R_H + R_0} = \frac{E}{\infty + R_0} = 0 \quad (2.7)$$

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

$$U_{xx} = E - 0 \cdot R_0 = E, \quad (2.8)$$

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, а струм у колі досягає максимального значення, називаного *струмом короткого замикання*:

$$I_{KЗ} = \frac{E}{0 + R_0} = \frac{E}{R_0}. \quad (2.9)$$

При цьому напруга на затискачах джерела дорівнюватиме нулю:

$$U = I \cdot R_H = I \cdot 0 = 0, \quad (2.10)$$

а падіння напруги усередині джерела дорівнюватиме його ЕРС:

$$E = U + U_0 = 0 + U_0 = U_0. \quad (2.11)$$

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:

$$I_H = \frac{E}{R_H + R_0}. \quad (2.12)$$

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

Із співвідношення (2.6) 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:  $I = I_{KЗ}$ ,  $U = 0$ ,  $U_0 = E$ .

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:

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

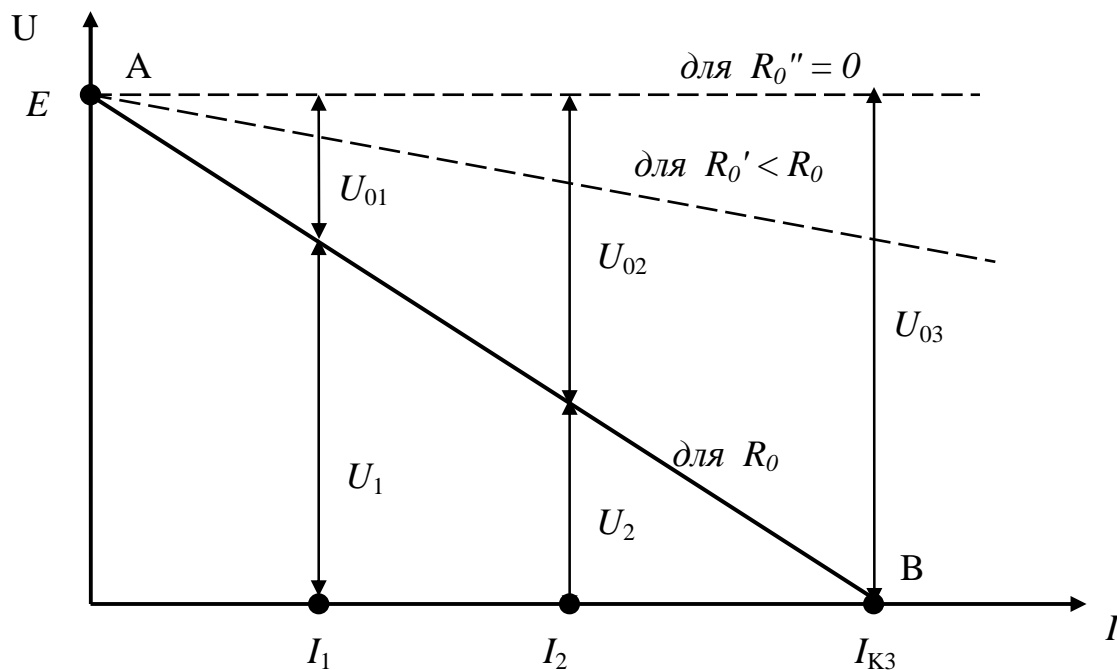


Рис. 2.2 - Залежність напруги джерела від струму навантаження

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:

$$A = U \cdot I \cdot t. \quad (2.13)$$

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

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

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.*

$$P = \frac{A}{t} . \quad (2.14)$$

З виразу (2.16) можемо записати

$$P = U \cdot I, \quad (2.15)$$

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

Одиницею виміру потужності є **ват**: 1 Вт = 1 В 1 А.

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

$$P_{\Pi} = E \cdot I_H. \quad (2.16)$$

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

$$P_{\Pi} = (U + U_0) I_H = U \cdot I_H + U_0 \cdot I_H . \quad (2.17)$$

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

$$P_H = U \cdot I_H. \quad (2.18)$$

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

$$P_{ВТР} = U_0 \cdot I_H . \quad (2.19)$$

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

$$P_{\Pi} = P_H + P_{ВТР} . \quad (2.20)$$

**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  $\eta$ , що визначають як відношення корисної потужності до повної потужності:

$$\eta = \frac{P_H}{P_{\Pi}} , \text{ або у відсотках } \eta = \frac{P_H}{P_{\Pi}} 100\% . \quad (2.21)$$

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

$$\eta = \frac{P_H}{P_{\Pi}} = \frac{U \cdot I_H}{E \cdot I_H} = \frac{U}{E} , \quad (2.22)$$

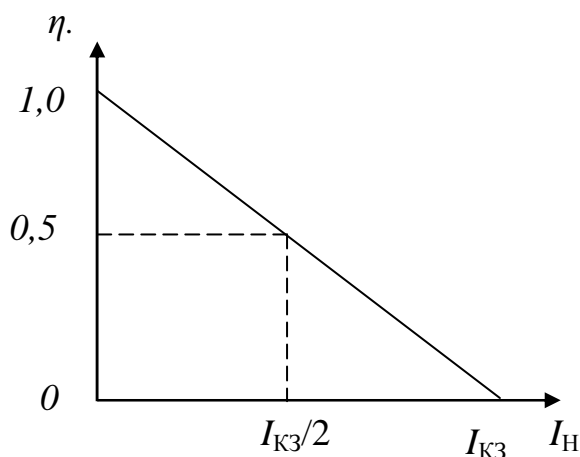
або

$$\eta = \frac{P_H}{P_H + P_0} = \frac{I_H^2 \cdot R_H}{I_H^2 \cdot R_H + I_H^2 \cdot R_0} = \frac{R_H}{R_H + R_0} , \quad (2.23)$$

або 
$$\eta = \frac{U}{E} = \frac{E - U_0}{E} = 1 - \frac{U_0}{E} = 1 - \frac{I_H \cdot R_0}{I_{K3} \cdot R_0} = 1 - \frac{I_H}{I_{K3}}. \quad (2.24)$$

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.

Таким чином, при наближенні режиму роботи джерела до режиму холостого ходу його ККД прагне до одиниці. Це має місце тоді, коли опір навантаження багаторазово перевищує внутрішній опір джерела. Втрати енергії усередині джерела в цьому випадку значно менші за корисну потужність.



#### 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:

Рис.2.3 - Залежність  $\eta = f(I_H)$

$$Q = A = U I t \text{ або } Q = I^2 \cdot R t. \quad (2.25)$$

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:

$$Q = 0,24 \cdot I^2 \cdot R \cdot t. \quad (2.26)$$

Співвідношення (2.26) 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. Схеми з'єднання елементів кола

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

**2.4.1. 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. 2.4,а) і ек-

вівальної (рис. 2.4,б) схем будуть однаковими. Тому для них можна написати рівняння

$$U_1 + U_2 + \dots + U_n = U, \text{ або } R_1 I + R_2 I + \dots + R_n I = R_{\text{ЕКВ}} I$$

а
б

Рис.2.4 - Схема кола з послідовним з'єднанням активних опорів (а) і її еквівалентний опір (б)

і визначити з нього еквівалентний опір:

$$R_{\text{ЕКВ}} = R_1 + R_2 + \dots + R_n \quad (2.27)$$

**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

$$I = U/R_{\text{ЕКВ}} ; \quad (2.28)$$

для напруги  $n$ -го елемента

$$U_n = R_n \cdot U/R_{\text{ЕКВ}} ; \quad (2.29)$$

для потужності споживання енергії  $n$ -м елементом

$$P_n = R_n \cdot I^2 = R_n \cdot U^2/R_{\text{ЕКВ}}^2. \quad (2.30)$$

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

1. З рівнянь (2.28) і (2.29) видно, що між напругою на вході схеми, струмом і напругою її окремих елементів є лінійна залежність. 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 нижчі за напругу мережі.** Якщо, наприклад, приймачі мають номінальні напруги 110 В, а напруга мережі 220 В, їх можна з'єд-

нати послідовно і включити на напругу мережі. Однак при цьому треба мати на увазі, що *опір приймача зворотно пропорційний його номінальній потужності*  $R = U_n^2 / P_n$ . Тому приймач великої потужності буде працювати з недовантаженням, а приймач малої потужності - з перевантаженням. **Послідовно з'єднані приймачі з однаковими номінальними напругами будуть мати найкращі умови роботи при однакових номінальних потужностях.**

**2.4.2. Паралельне з'єднання елементів кола.** На рис. 2.5,а показано схему з  $n$  гілками, приєднаними 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  $G_n = 1/R_n$ :

$$\left. \begin{aligned} I_1 &= U/R_1 = G_1 \cdot U \\ I_n &= U/R_n = G_n \cdot U. \end{aligned} \right\} \quad (2.31)$$

Та обставина, що **паралельне з'єднання забезпечує однакову напругу на всіх включених приймачах і їхні незалежні один від одного режими 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. 2.5,б), буде дорівнювати струму  $I$  у нерозгалуженій частині кола або сумі струмів окремих паралельних гілок:

$$I_{\text{екв}} = I = I_1 + I_2 + \dots + I_n. \quad (2.32)$$

Підставимо в це рівняння значення струмів з (2.41) 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:

$$G_{\text{екв}} = G_1 + G_2 + \dots + G_n = \sum G_k \quad (2.33)$$

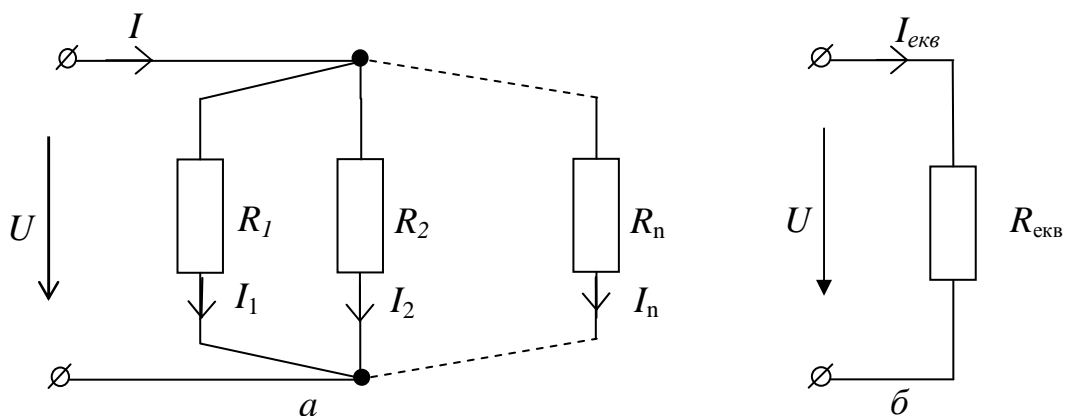


Рис. 2.5 - Схема кола з паралельним з'єднанням резистивних елементів (а) і її еквівалентна схема (б)

або формулу еквівалентного опору

$$1/R_{\text{екв}} = 1/R_1 + 1/R_2 + \dots + 1/R_n = \sum 1/R_k. \quad (2.34)$$

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:*

$$R_{\text{екв}} = 1/G_{\text{екв}}, \quad (2.35)$$

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 опорами  $R$ , 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:

$$P = U \cdot I = U \cdot (I_1 + I_2 + \dots + I_n), \text{ або } P = P_1 + P_2 + \dots + P_n.$$

*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:

$$R_{\text{екв}} = R_1 \cdot R_2 / (R_1 + R_2). \quad (2.36)$$

Струми гілок цього кола дорівнюють:

$$\left. \begin{aligned} I_1 &= U/R_1 = R_{\text{екв}} \cdot I / R_1 = R_2 \cdot I / (R_1 + R_2) \\ I_2 &= U/R_2 = R_{\text{екв}} \cdot I / R_2 = R_1 \cdot I / (R_1 + R_2) \end{aligned} \right\}. \quad (2.37)$$

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.

**2.4.3. 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. (рис.2.6), 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».

За умови еквівалентності перетворень можна визначити опори резисторів променів еквівалентної «зірки»  $R_1, R_2, R_3$ :

$$R_1 = \frac{R_{12} \cdot R_{31}}{R_{12} + R_{23} + R_{31}}; \quad (2.38)$$

$$R_2 = \frac{R_{23} \cdot R_{12}}{R_{12} + R_{23} + R_{31}}; \quad (2.39)$$



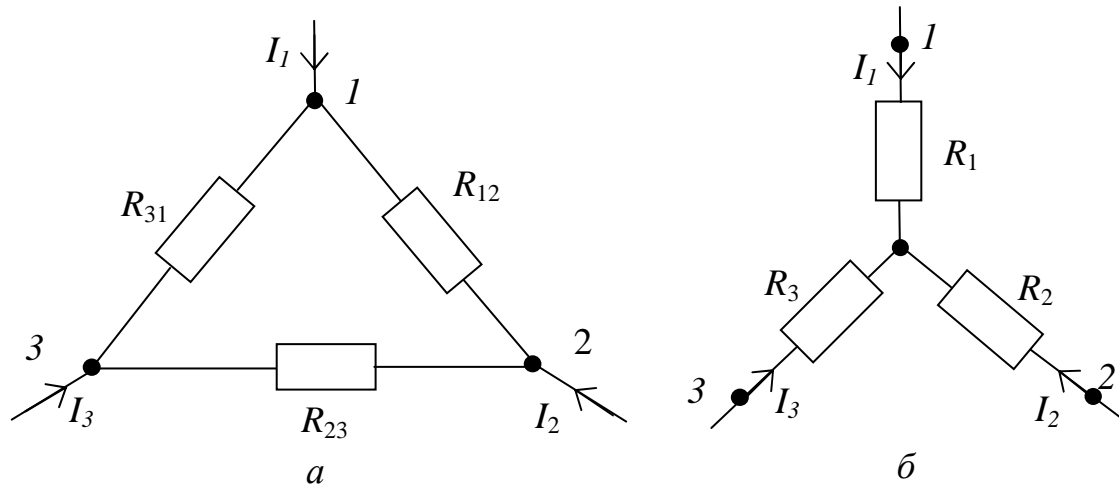


Рис. 2.6 - Еквівалентні з'єднання резисторів  
«трикутником» (а) і «зіркою» (б)

$$R_3 = \frac{R_{31} \cdot R_{23}}{R_{12} + R_{23} + R_{31}}. \quad (2.40)$$

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 формулами

$$\left. \begin{aligned} R_{12} &= R_1 + R_2 + \frac{R_1 \cdot R_2}{R_3} \\ R_{23} &= R_2 + R_3 + \frac{R_2 \cdot R_3}{R_1} \\ R_{31} &= R_3 + R_1 + \frac{R_3 \cdot R_1}{R_2} \end{aligned} \right\} \quad (2.41)$$

Звідки 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».*

## 2.5. 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.

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

$$\sum_{k=1}^n I_k = 0. \quad (2.42)$$

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*.

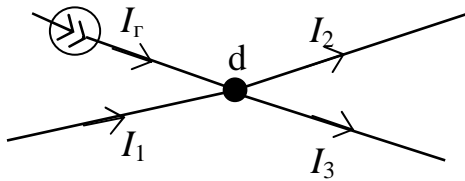
Перший закон Кірхгофа є наслідком *закону збереження кількості електрики*, відповідно до якого ні в якій точці заряди не можуть безмежно накопичуватися: *кількість електрики, що притікає до даної точки за певний проміжок часу, повинна дорівнювати кількості електрики, що відтікає від неї за той же час*.

Прийmemo для схеми на рис. 2.7 струми, що входять до вузла d, позитивними ( $I_r$  і  $I_1$ ), а струми, що виходять з вузла – негативними ( $I_2$  і  $I_3$ ). Тоді можемо записати наступне рівняння за першим законом Кірхгофа

$$I_r + I_1 - I_2 - I_3 = 0, \quad (2.43)$$

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

$$I_r + I_1 = I_2 + I_3, \quad (2.44)$$



що відповідає 2-му формулюванню першого закону Кірхгофа, або легко отримується шляхом перетворення співвідношення (2.43).

Рис.2.7 - Схема ділянки мережі

**2.5.2. 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  $m$  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):

$$\sum U_{mn} = 0. \quad (2.45)$$

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 еле-*

ментах замкнутого контуру дорівнює алгебраїчній сумі ЕРС, що входять у цей контур (друге формулювання)

$$\sum I \cdot R = \sum E. \quad (2.46)$$

**2.5.3. Порядок аналізу кіл.** При дослідженні повинні бути відомі ЕРС і опори усіх елементів схеми й потрібно знайти значення струмів і потужностей у гілках. Порядок розрахунку розглянемо на прикладі схеми кола, що показано на рис. 2.8.

**Алгоритм розрахунку:**

1. На вихідній схемі довільно наносимо напрямки струмів у гілках (на рис. 2.8,б струми  $I_1$ ,  $I_2$  і  $I_3$ ). Якщо в гілці є ЕРС, то напрямок струму краще задати співпадаючим з напрямком цієї ЕРС. Наносимо позначення вузлів (вузли 1 і 2 на рис. 2.9,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. 2.9,б контури I і II, напрямок обходу за годинниковою стрілкою). 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.

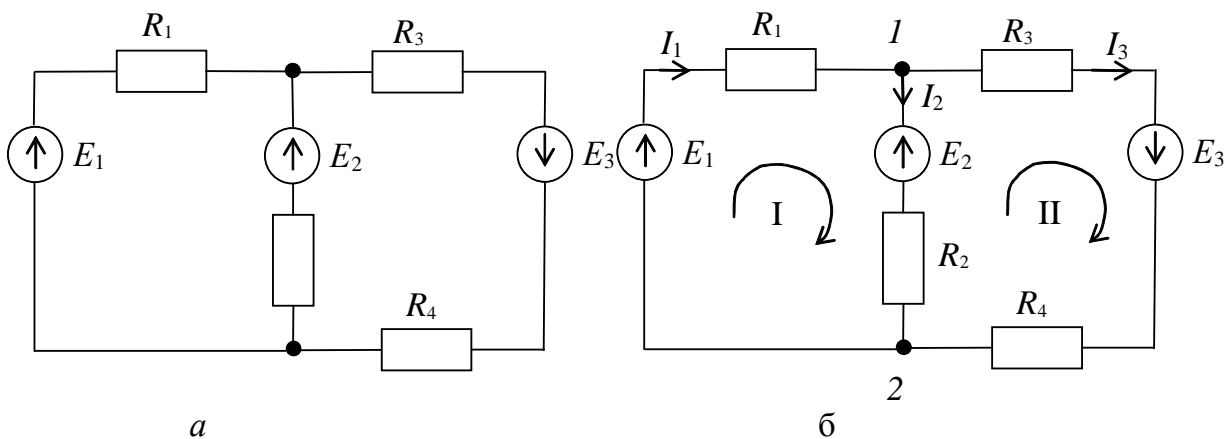


Рис. 2.8 - Схема електричного кола: а - вихідна; б - з нанесеними позначеннями вузлів, струмів і напрямків обходу контурів

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 відносно невідомих струмів у гілках.

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

$$\sum E \cdot I = \sum I^2 \cdot R, \quad (2.47)$$

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. 2.8,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  $I$ :

$$I_1 - I_2 - I_3 = 0. \quad (2.48)$$

За другим законом Кірхгофа необхідно скласти два рівняння для двох незалежних контурів (на схемі рис. 2.9,б контури I і II). З урахуванням прийнятих напрямків обходу контурів ці рівняння мають вигляд: для контура  $I$

$$R_1 \cdot I_1 + R_2 \cdot I_2 = E_1 - E_2; \quad (2.49)$$

для контура  $II$

$$-R_2 \cdot I_2 + (R_3 + R_4) \cdot I_3 = E_2 + E_3. \quad (2.50)$$

При складанні рівнянь (2.49), (2.50) із знаком плюс записуємо ті доданки, у яких струм і ЕРС мають напрямки, що збігаються з напрямком обходу контура.

Розв'язуючи систему рівнянь (2.48), (2.49) і (2.50), 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.2.8,б.

Складемо рівняння балансу потужностей і виконуємо перевірку рішення. Для нашого випадку (рис.2.8,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. Як розраховують потужність (роботу) електричного струму?
4. Дайте визначення повної і корисної потужності, потужності втрат.
5. Запишіть основні співвідношення для визначення ККД електричного кола.
6. Поясніть загальні властивості послідовного з'єднання елементів кола.
7. Поясніть загальні властивості паралельного з'єднання елементів кола.
8. У чому суть методу еквівалентного перетворення?

9. Запишіть формули еквівалентного перетворення «зірки» до «трикутника», «трикутника» до «зірки».
10. Поясніть фізичний зміст першого (другого) закону Кірхгофа.
11. Скільки незалежних рівнянь можна скласти за першим законом Кірхгофа для схеми довільної конфігурації?
12. Скільки незалежних рівнянь можна скласти за другим законом Кірхгофа для схеми довільної конфігурації?
13. Поясніть алгоритм знаходження невідомих струмів для схеми довільної конфігурації за першим і другим законами Кірхгофа.

### ТЕМА 3

## МЕТОДИ РОЗРАХУНКУ СКЛАДНИХ КІЛ ПОСТІЙНОГО СТРУМУ

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.

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 чило 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.

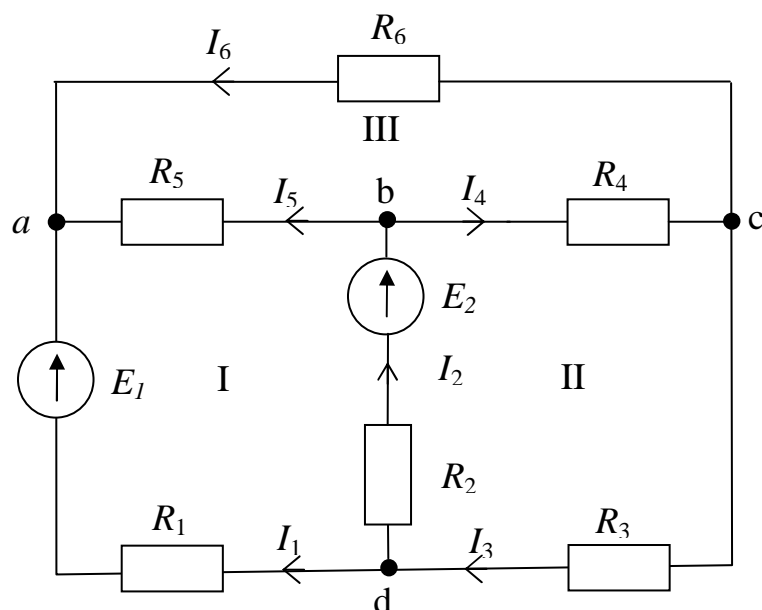


Рис.3.1 - Схема складного кола для визначення струмів гілок за законами Кірхгофа

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

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

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

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

розв'язання якої дає значення струмів у гілках схеми.

Розглянемо вирішення задачі з розрахунку режиму кола в загальному випадку, коли схема заміщення 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.

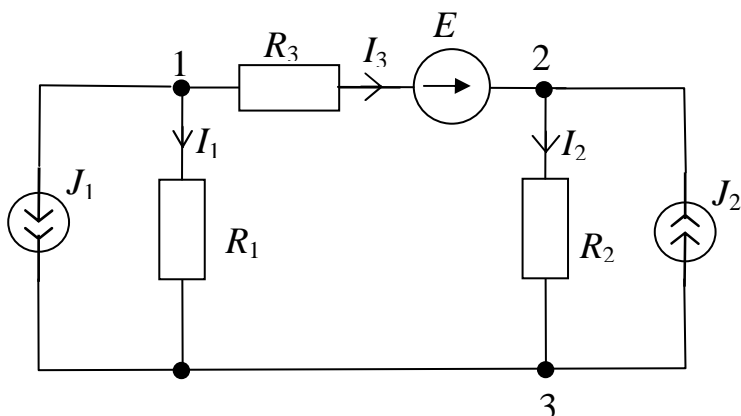


Рис.3.2 - Розрахункова схема

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

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

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

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

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

Метод вузових 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 вузових потенціалів називають методом вузових напруг, а його окремий випадок для двох вузлів – методом вузової 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, напрямки 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:

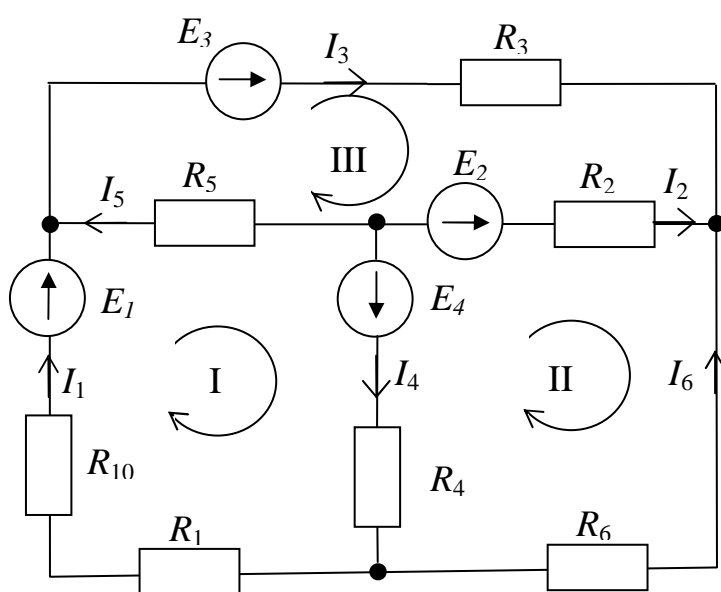


Рис. 3.3 - Схема складного кола для визначення струмів за методом контурних струмів

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

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:

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

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

Необхідно звернути увагу на те, що метод накладання не можна застосовувати 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.

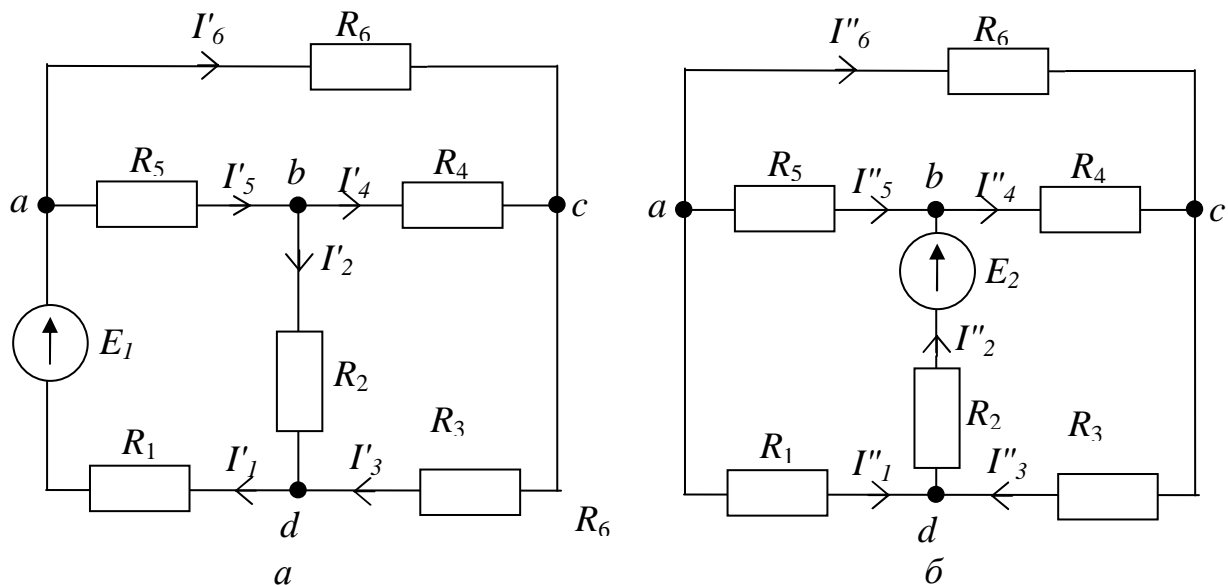


Рис. 3.4 - Схеми кола для визначення струмів за методом накладання від ЕРС  $E_1$  (а) і  $E_2$  (б)

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:

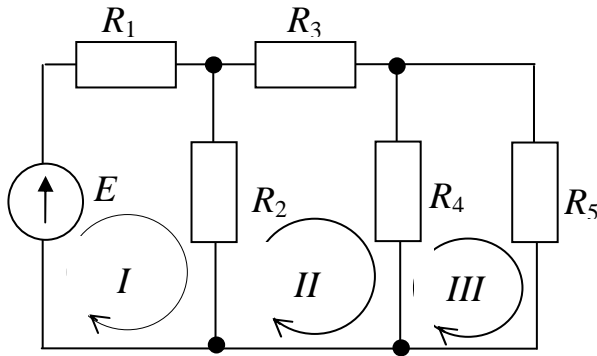
$$E_{II} = 0, \quad R_{22} = R_2 + R_3 + R_4, \quad R_{21} = R_2, \quad R_{23} = R_4.$$

Для контуру III:

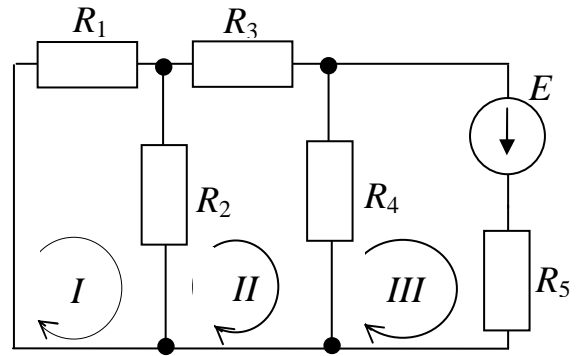
$$E_{III} = 0, \quad R_{33} = R_4 + R_5, \quad R_{32} = R_4, \quad R_{31} = 0.$$

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

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



а



б

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  $\Delta$ , 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  $\Delta$  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

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

Мінор  $M_{31}$  одержуємо з визначника  $\Delta$  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)  $I_I = I_{III} = I_5$ .

### **Контрольні запитання з теми 3**

1. Як визначити 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. Який струм 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 та принципу взаємності.
11. Поясніть суть методу еквівалентного генератора. В яких випадках його краще застосовувати?

## **ТЕМА 4**

### **ФІЗИЧНІ ПРОЦЕСИ В КОЛАХ ЗМІННОГО СТРУМУ**

#### **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. Розрізняють однофазні й багатofазні, лінійні й нелінійні кола змінного струму, кола із зосередженими й розподіленими параметрами; з взаємодуктивностями й без взаємодуктивностей.

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  $i$  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  $p = u \cdot i$  та джерела  $p = e \cdot i$  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.

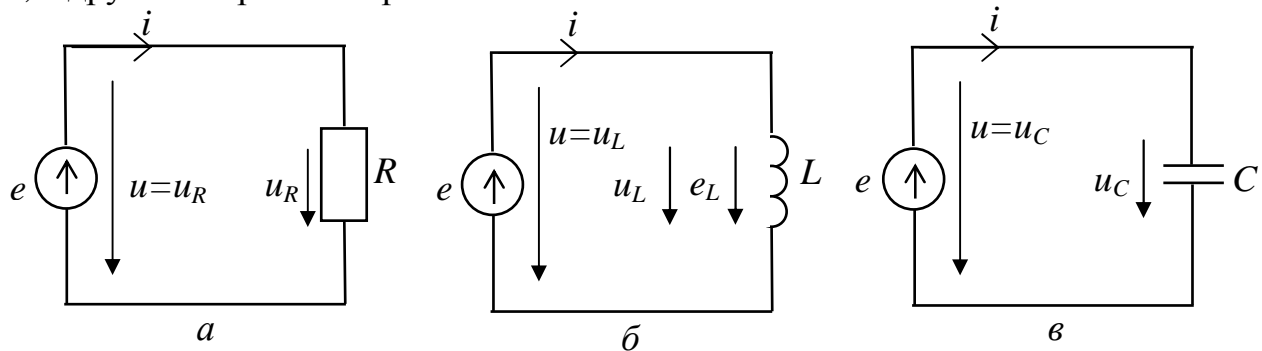


Рис. 4.1 - Позитивні напрямки ЕРС, струму й напруги ідеальних резистивного (а), індуктивного (б) і ємнісного (в) елементів

## 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 швид-

кості зміни магнітного потоку  $\Phi$ , що пронизує цей контур

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

Знак мінус, відповідно до закону Ленца, 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  $\Psi_L$  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  $\Psi_L$  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 убутанні 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 ( $i > 0$ ) убиває ( $di/dt < 0$ ) значення напруги й миттєвої потужності негативні ( $u < 0, p < 0$ ). Енергія з магнітного поля повертається назад у джерело. Таким чином, у процесі зростання і убутання 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  $\psi$ , проведемо на комплексній площині (рис. 4.2) з початку координат під кутом  $\psi$  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

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

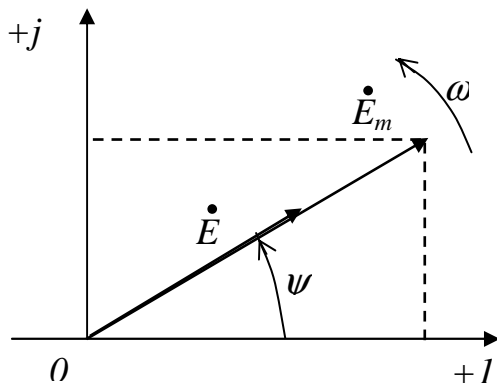


Рис. 4.2 - Зображення синусоїдальної ЕРС обертовим вектором на комплексній площині

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,

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

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.

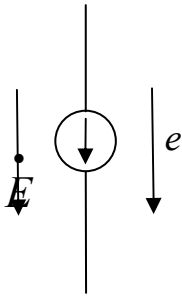


Рис.4.3 - Вибір позитивного напрямку синусоїдальної ЕРС

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.

#### 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 падіннь 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.

#### **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**  
**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:

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

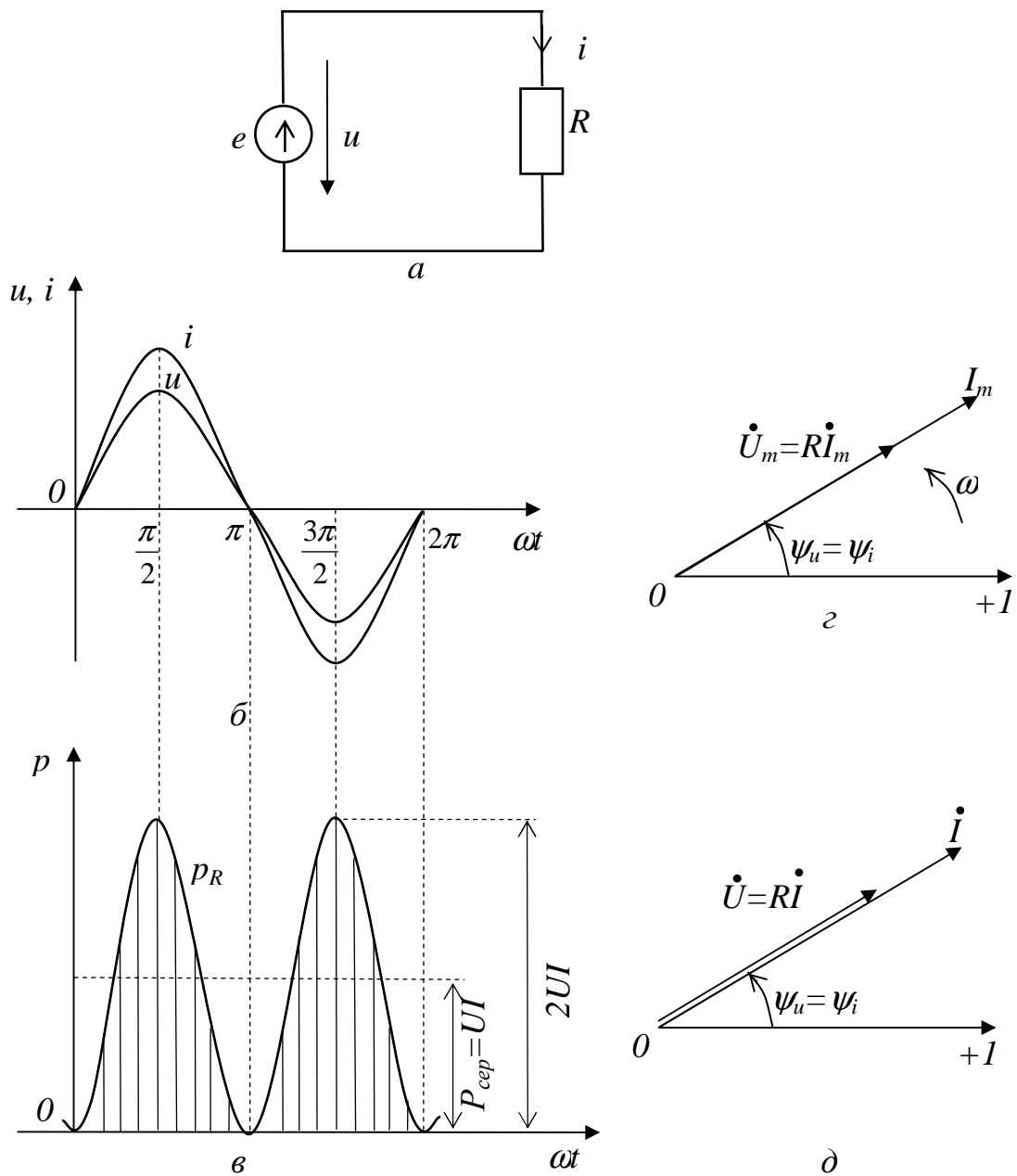


Рис. 5.1 - Коло з резистивним елементом:

**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

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

$$P = I \cdot U.$$

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  $2P = 2U I$ , залишаючись весь час додатною. Це означає, що **при будь-якому напрямку 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 що визначає закон Ома в комплексній формі для кола з резистивним елементом.

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

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

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

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

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

Амплітуда синусоїди напруги на котушці

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

Діюче значення цієї напруги

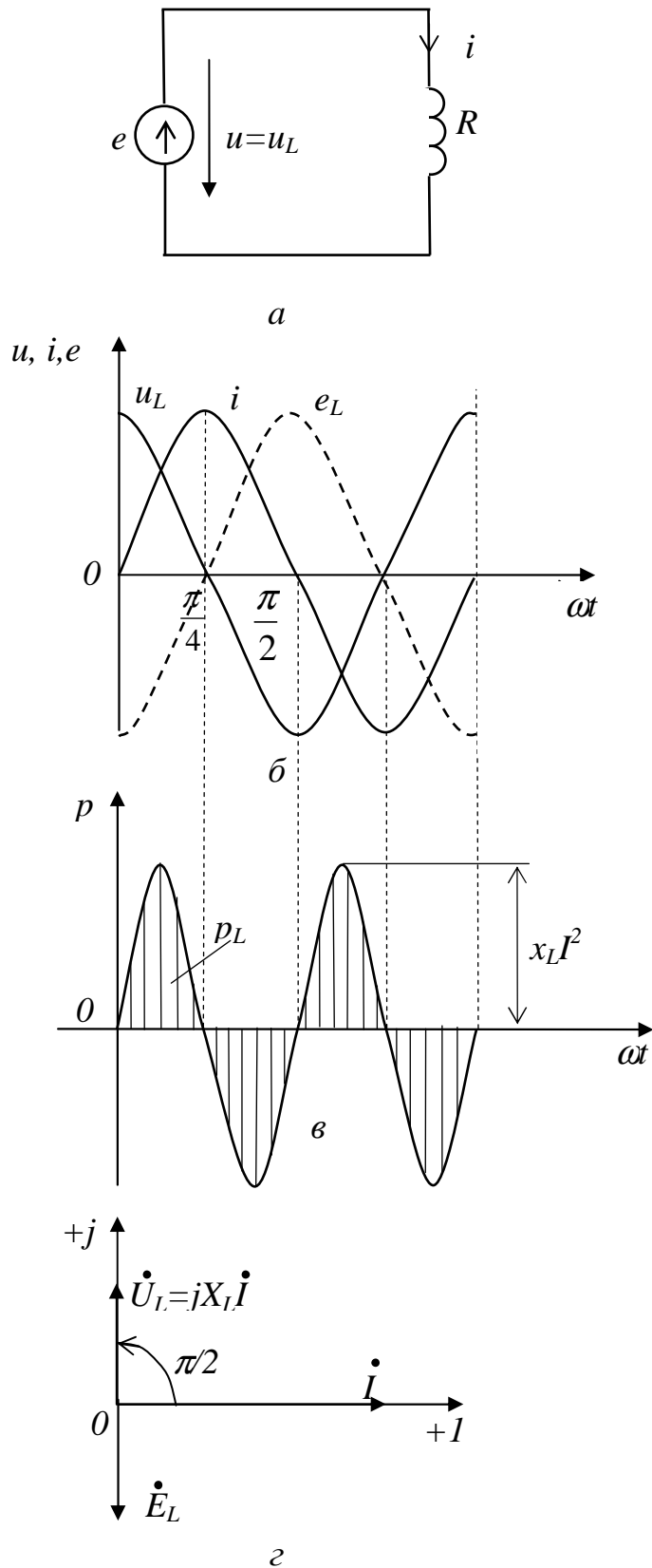


Рис.5.2 - Схема (а), графіки миттєвих значень (б, в) і векторна діаграма (г) кола з ідеальною котушкою

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

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  $\omega L$  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:

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

Величину  $j\omega L = jX_L$  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 максима-

льну 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 за формулою (4.7)

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

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

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:

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

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  $\pi/2$ .**

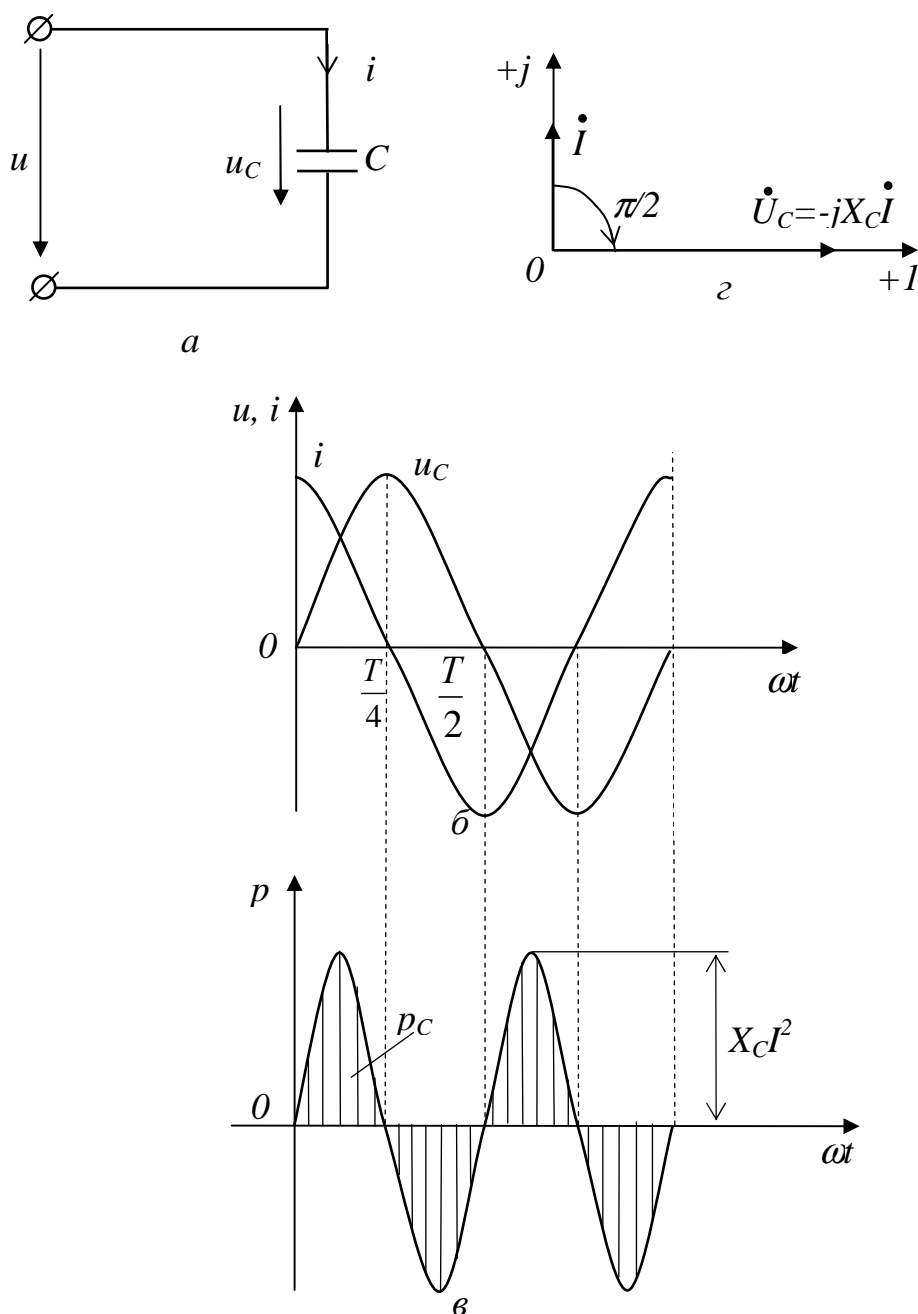


Рис. 5.3 - Схема (а), графіки миттєвих значень (б, в) і векторна діаграма цього кола (г) кола з ідеальним конденсатором

За рівняннями (5.21) і (5.22) на рис. 5.3,б побудовані графіки  $i$ ,  $u_C$ , а на рис. 5.3, в - 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.

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,г 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 запасається 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 запасає 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

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

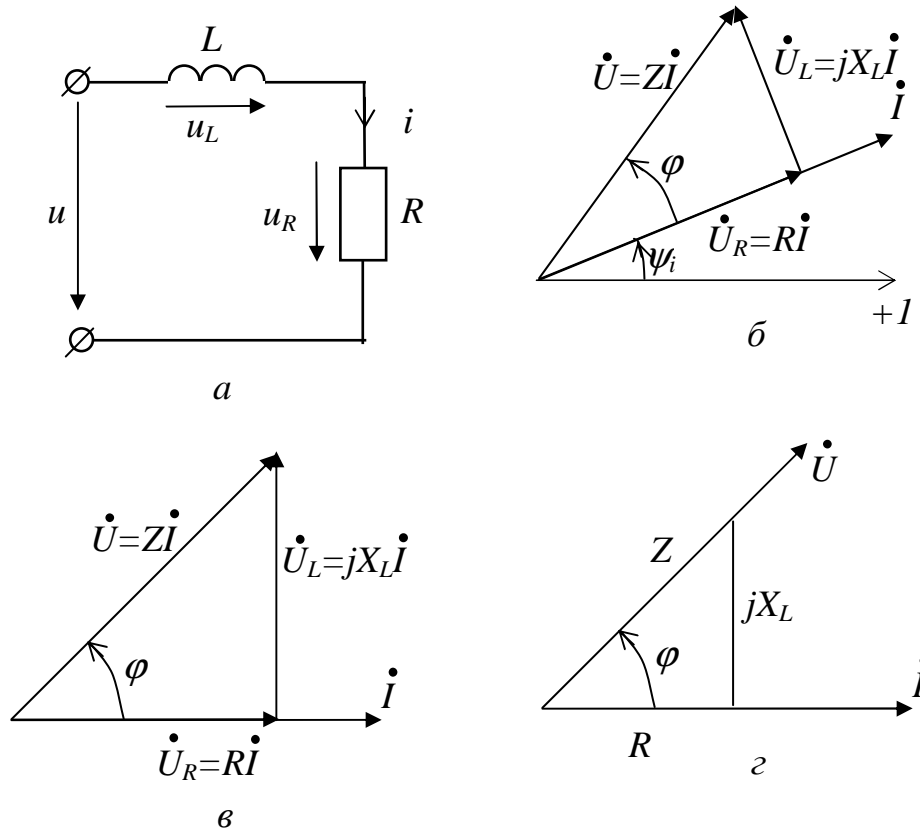


Рис. 5.4 - Схема (а), «трикутники» напруг і опорів котушки з активним опором і індуктивністю (б, в, г)

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

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

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**. Дій-

сною 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  $\psi_u$  позитивна, тому в рівнянні (5.32) вона повинна бути взята із знаком "плюс".

Оскільки значення  $U$  і  $\psi_u$  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  $\psi_i$  до осі +1. Вектор напруги на резисторі  $\dot{U} = R \cdot \dot{I}$  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  $\psi_i$  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.

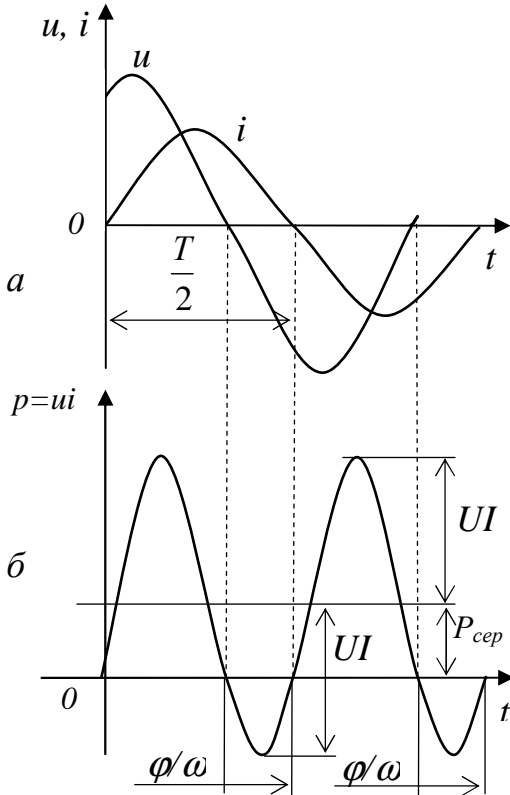


Рис.5.5 - Графіки миттєвих значень напруги, струму й потужності для схеми рис.5.4,а

Миттєве значення потужності дорівнює добутку миттєвих значень напруги й струму:

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

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 ту саму розмірність, для їхнього розрізнення введені одиниці різних найменувань: для

активної потужності - вати (Вт), для реактивної потужності - вольт-ампери реактивні (Var), 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 потужності:

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

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 запасається в магнітному полі котушки. До кінця першої чверті періоду магнітне поле запасає максимальну енергію  $L \cdot I_m^2 / 2$ . У другу чверть періоду струм убиває. Убиває 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  $p_R$ . 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 теплова 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.

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:

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



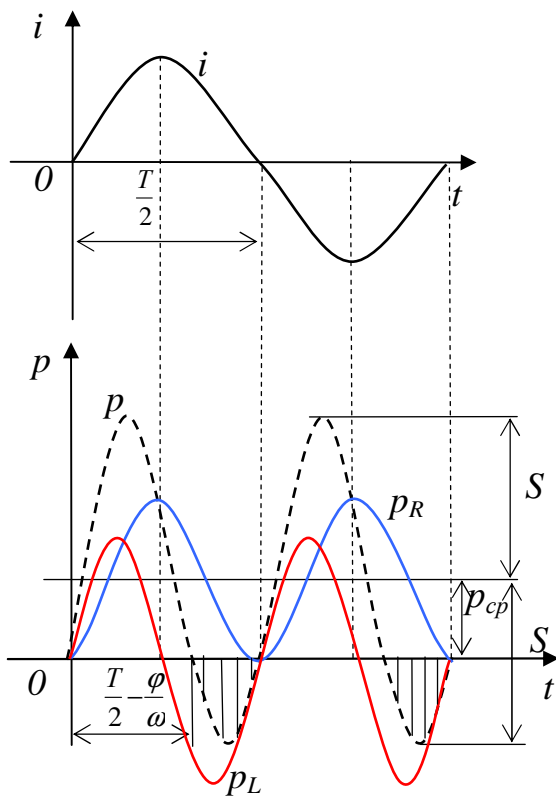


Рис.5.6 - Графіки миттєвих значень струму, потужностей ділянок  $p_L$ ,  $p_R$  і повної потужності  $p$  схеми рис. 5.4,а

Коефіцієнт потужності залежить від співвідношення між активним і індуктивним опорами. 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 катушки.

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)  $\dot{I}^* = Ie^{-j\psi_i}$  і помножити його на комплекс напруги  $\dot{U}$ :

$$\dot{U} \cdot \dot{I}^* = Ue^{j\psi_u} \cdot Ie^{-j\psi_i} = U \cdot Ie^{j(\psi_u - \psi_i)} = Se^{j\varphi_L}.$$

Цей добуток позначають буквою  $S$  і називають комплексом повної потужності

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

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:

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

Тоді комплекси активної і ємнісної напруг

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

Комплекс напруги на вході кола

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

Комплекс повного опору ємнісного кола

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

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).

З виразу (5.50) випливає, що початкова фаза напруги  $\psi_u$  менша за початкову фазу струму  $\psi_i$  на кут зрушення фаз  $\varphi_C$ . Отже напруга на вході розглянутого ємнісного кола відстає за фазою від струму на кут зрушення фаз  $\varphi_C$ . Це можна проілюструвати «трикутником» напруг, що побудований на рис. 5.7,б для заданого ємнісного кола. Для спрощення побудови початкова фаза струму  $\psi_i$  прийнята рівною нулю. Вектор струму  $\dot{I}$  спрямований за віссю +1. 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  $\dot{U}_C$ . Результируючий вектор напруги  $\dot{U}$  на вході кола відстає за фазою від вектора струму на кут зрушення фаз  $\varphi_C$ . 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,**

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

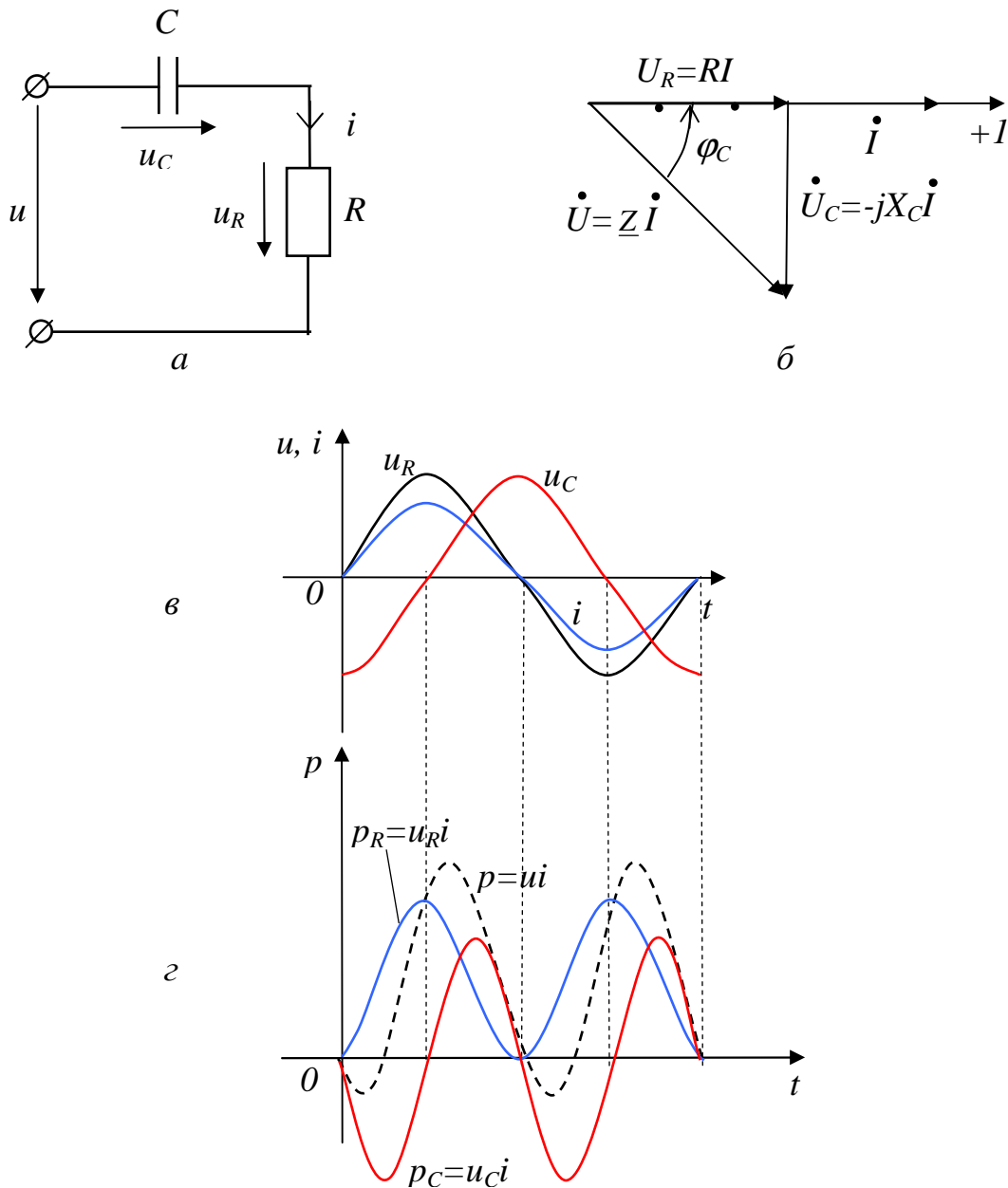


Рис. 5.7 - Схема (а), графіки миттєвих значень напруг, струми й потужності (в, г), векторна діаграма (б) кола послідовно з'єднаних резистора і ємності

Повна потужність

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

Комплекс повної потужності

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

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  $p_R = u_R \cdot i$ , реактивної (ємнісної)  $p_C = u_C \cdot i$  і повної  $p = u \cdot i$  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  $i = I_m \cdot \sin(\omega t + \varphi_i)$ , комплексне значення якого  $\dot{I} = I e^{j\varphi_i}$ , 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 опорами розглянутого кола його загальний реактивний опір  $X$  може бути: індуктивним ( $X_L > X_C$ ), ємнісним ( $X_L < X_C$ ) і чисто активним ( $X_L = X_C$ ).

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  $\varphi_i$  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  $\varphi$  між векторами напруги й струму

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

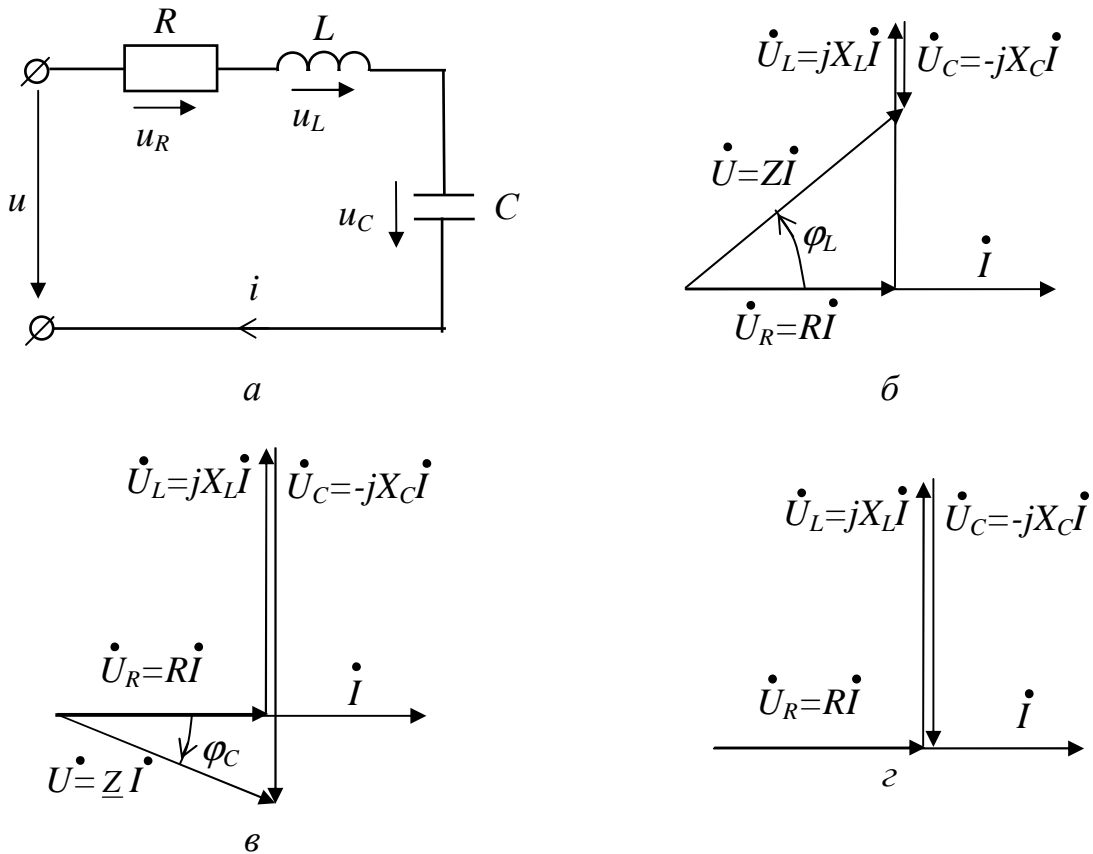


Рис. 5.8 - Схема (а) і векторні діаграми (б, в, г) кола, що складається з послідовно з'єднаних елементів  $R$ ,  $L$  і  $C$

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

$$\underline{S} = \dot{\underline{U}} \cdot \dot{I}^* = \underline{Z} \cdot \dot{I} \cdot \dot{I}^* = (R + jX_L - jX_C) \cdot I^2 = R \cdot I^2 + jX_L \cdot I^2 - jX_C \cdot I^2,$$

або

$$\underline{S} = P + jQ_L - jQ_C, \quad (5.60)$$

де  $Q_L = X_L \cdot I^2$  - реактивна потужність, що зумовлена наявністю в колі індуктивності;  $Q_C = X_C \cdot I^2$  - реактивна потужність, що зумовлена 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  $+j$ . Приймемо  $\dot{U} = U$ , що відповідає напрямку вектора  $\dot{U}$  за віссю  $+1$ .

Задані параметри гілок дозволяють записати їхні комплекси повних опорів:

$$\begin{aligned} \underline{Z}_1 &= R_1 + j\omega L_1 = Z_1 e^{j\varphi_1} \\ \underline{Z}_2 &= R_2 - j\frac{1}{\omega C_2} = Z_2 e^{-j\varphi_2} \end{aligned} \quad .$$

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:

$$\dot{I} = \dot{I}_1 + \dot{I}_2. \quad (5.62)$$

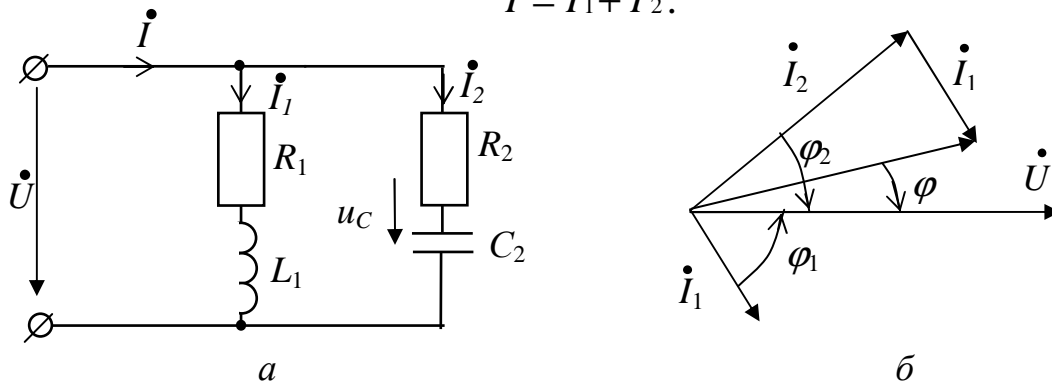


Рис. 5.9 - Схема (а) і векторна діаграма (б) кола, що складається з двох паралельних гілок

Складемо баланс потужності кола, за яким комплекс повної потужності джерела

$$\underline{S}_{дж} = \dot{\underline{U}} \cdot \dot{I}^* \quad (5.63)$$

повинен дорівнювати сумі комплексів повних потужностей його окремих гілок:

$$\underline{S}_1 + \underline{S}_2 = \dot{\underline{U}} \dot{I}_1^* + \dot{\underline{U}} \dot{I}_2^* . \quad (5.64)$$

Потужності гілок можуть бути підраховані й за іншими формулами:

$$\begin{aligned} \underline{S}_1 &= \underline{Z}_1 \cdot I_1^2 = R_1 \cdot I_1^2 + jX_1 \cdot I_1^2 = P_1 + jQ_{L1}; \\ \underline{S}_2 &= \underline{Z}_2 \cdot I_2^2 = R_2 \cdot I_2^2 - jX_2 \cdot I_2^2 = P_2 - jQ_{C2}. \end{aligned}$$

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  $\dot{\underline{U}}$  й опори  $\underline{Z}$ ,  $\underline{Z}_1$  і  $\underline{Z}_2$ :

$$\frac{\dot{\underline{U}}}{\underline{Z}} = \frac{\dot{\underline{U}}}{\underline{Z}_1} + \frac{\dot{\underline{U}}}{\underline{Z}_2} .$$

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  $\varphi_1$ , а вектор струму  $\dot{I}_2$  випереджає за фазою вектор напруги на кут  $\varphi_2$ . Вектор струму  $\dot{I}$  нерозгалуженої ділянки дорівнює геометричній сумі векторів струмів гілок і випереджає за фазою вектор напруги на кут  $\varphi$ .

### 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  $\underline{Y}$ :

$$\underline{Y} = \frac{1}{\underline{Z}} . \quad (5.67)$$

Дійсну частину комплексу провідності позначають буквою  $G$  і називають **активною провідністю**, уявну частину, позначувану буквою  $B$  називають **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 активну  $G$  і реактивну  $B_L$  провідності визначають 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.

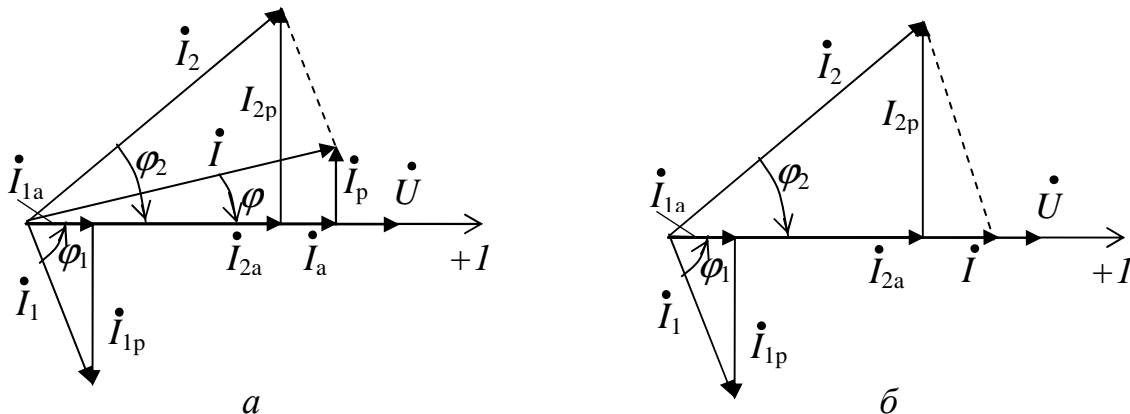


Рис. 5.10 - Розкладання загального вектора струму розгалуженого кола на активні й реактивні складові

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**.



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 
$$\underline{Y} = G_1 + G_2 - j(B_L - B_C) = G_{екв} \pm jB_{екв}.$$

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):

$$\underline{Y} = G_{екв} = G_1 + G_2.$$

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  $Q_L = U \cdot I_{Lp}$  і  $Q_C = U \cdot I_{Cp}$ , а коливання цих потужностей перебувають у протифазі.

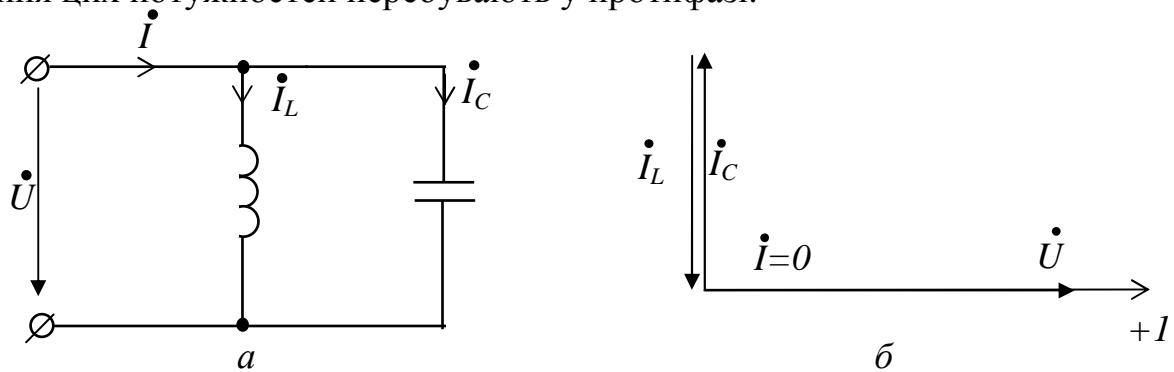


Рис. 5.11 - Еквівалентна схема паралельного з'єднання двох ідеальних індуктивного і ємнісного елементів (а) і її векторна діаграма (б)

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 протікає 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. 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. Напишіть вираз для миттєвого значення струму в колі, що складається з послідовно з'єднаних елементів  $R$  і  $L$ , чи якщо до затискачів кола прикладена напруга  $u = U_m \cdot \sin(\omega t + \psi_u)$ .

3. Напишіть вираз для миттєвого значення струму в колі, що складається з послідовно з'єднаних елементів  $R$  і  $C$ , якщо до затискачів кола прикладено напругу  $u = U_m \cdot \sin(\omega t + \psi_u)$ .

4. 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.

5. 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.

6. Які кути зрушення фаз між напругами  $R$ ,  $L$  і  $C$ -елементів, ввімкнених послідовно?

7. Які кути зрушення фаз між струмами  $R$ ,  $L$  і  $C$ -елементів, ввімкнених паралельно?

8. Визначте умови резонансу напруг в колі, накресліть для цього режиму векторну діаграму.

9. Напишіть закон Ома й закони Кірхгофа в комплексній формі.

10. 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.

11. 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.

12. Накресліть «трикутники» опорів і провідностей, виведіть формули переходу від опорів до провідностей (від провідностей до опорів).

13. Напишіть умову настання резонансу струмів, виражену через опори паралельних гілок.

14. 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.

15. Що характеризує миттєва потужність кола? Доведіть, що миттєва потужність може приймати як додатні так і від'ємні значення.

## ТЕМА 6

### ТРИФАЗНІ КОЛА ЕЛЕКТРИЧНОГО СТРУМУ

#### 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'єднувані 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 шостифазна система, наприклад у пристроях випрямлення змінного струму, а в деяких пристроях автоматики застосовують двофазну систему.

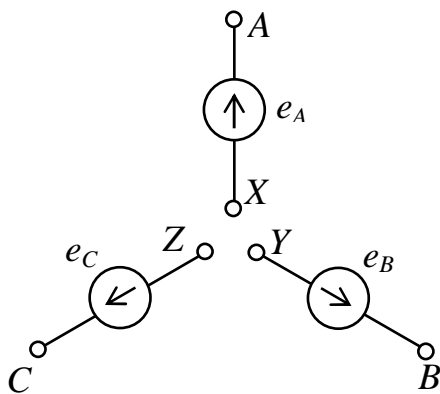


Рис.6.1 - Позначення трифазного генератора

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 показане 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  $120^\circ$  (рис. 6.2).

В аналітичній формі миттєві й діючі значення ЕРС, що наводяться у фазах, записують в наступному вигляді:

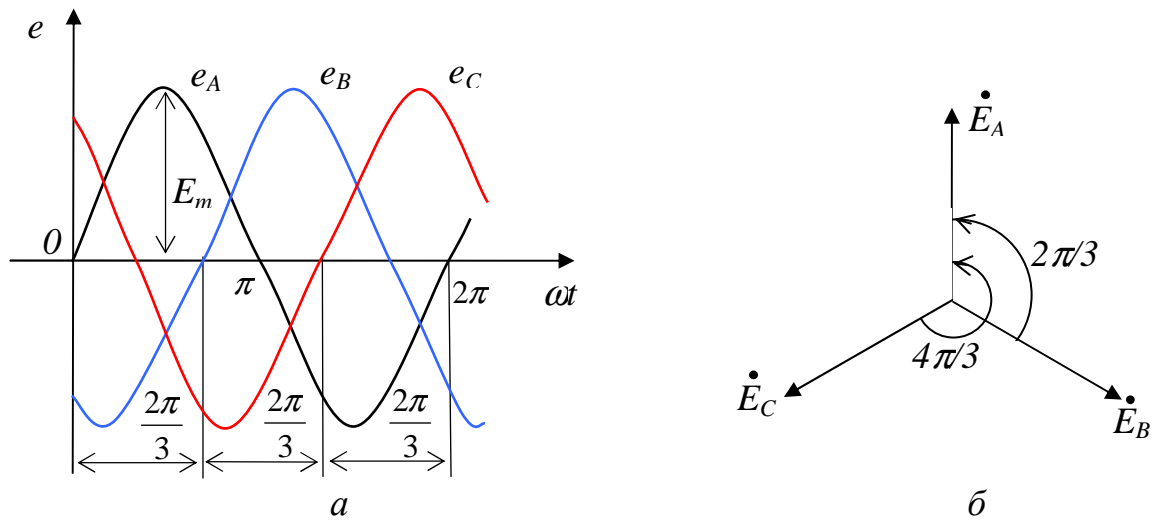


Рис.6.2 - Графічне (а) і векторне (б) подання трифазної симетричної системи ЕРС

$$\left. \begin{aligned} e_A &= E_{mA} \sin \omega t; & \dot{E}_A &= E; \\ e_B &= E_{mB} \sin(\omega t - \frac{2\pi}{3}); & \dot{E}_B &= E \cdot e^{-j2\pi/3}; \\ e_C &= E_{mC} \sin(\omega t - \frac{4\pi}{3}); & \dot{E}_C &= E \cdot e^{-j4\pi/3} = E \cdot e^{j2\pi/3}. \end{aligned} \right\} \quad (6.1)$$

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.

## 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 затисків *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:

$$\left. \begin{aligned} \dot{E}_{AB} &= \dot{E}_A - \dot{E}_B; \\ \dot{E}_{BC} &= \dot{E}_B - \dot{E}_C; \\ \dot{E}_{CA} &= \dot{E}_C - \dot{E}_A. \end{aligned} \right\} \quad (6.4)$$

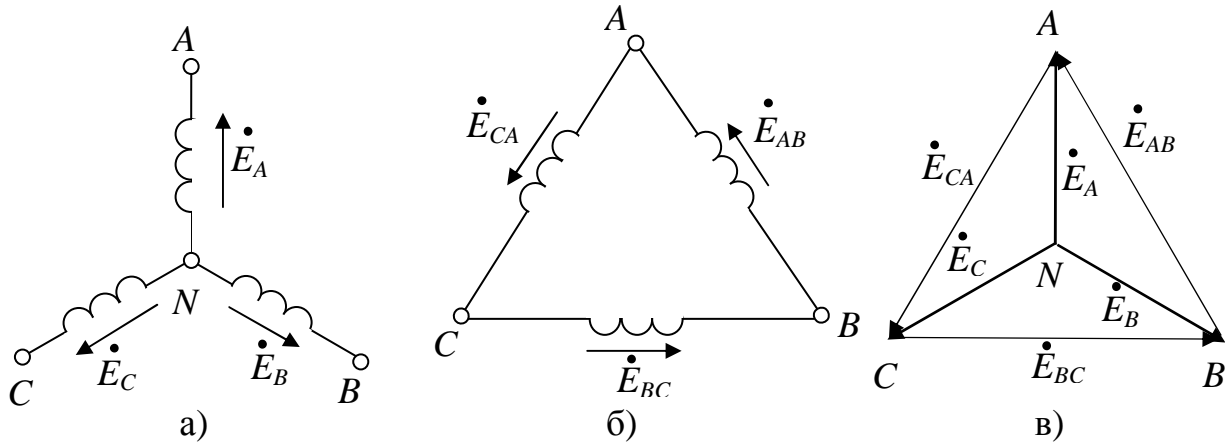


Рис.6.3 - Схеми з'єднання обмоток трифазного генератора: а – «зірка», б – «трикутник», в - векторна діаграма

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 рівними 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 несиметрична. У ній з'являються зрівнювальні струми, що небажано. Тому практично найчастіше 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  $X, B, Z$  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  $x, b, z$ , 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.

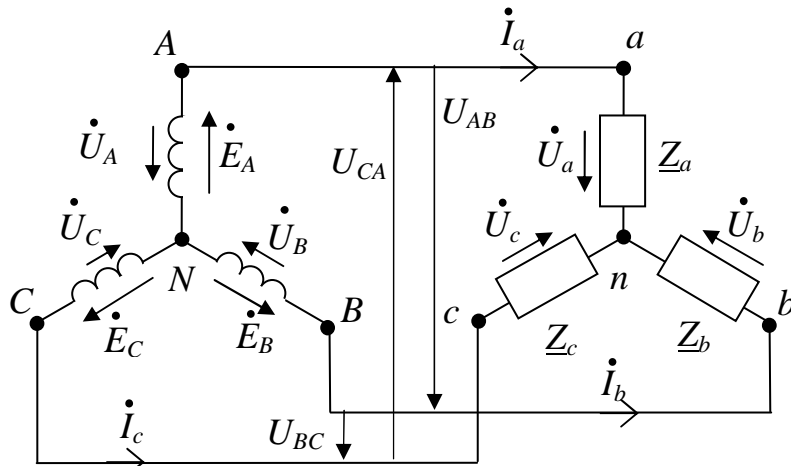


Рис.6.4 - З'єднання джерел і споживачів за схемою «зірка-зірка»

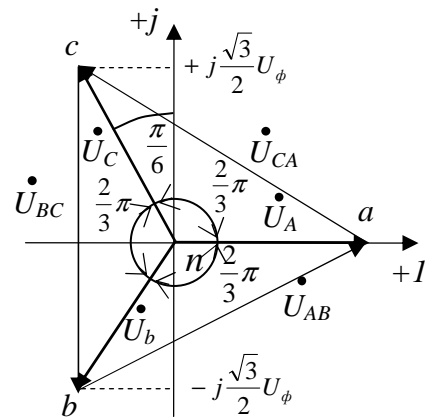


Рис.6.5 - Векторна діаграма фазних і лінійних напруг

На схемі рис. 6.4 наведені умовні позитивні напрямки фазних і лінійних напруг. Лінійні струми  $I_{\text{л}}$  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  $I_{\text{ф}}$ , 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:

$$I_{\text{ф}} = I_{\text{л}}. \quad (6.6)$$

Трифазні джерела живлення практично завжди виконують симетричними. У цьому випадку діючі значення фазних ЕРС  $E_A = E_B = E_C = E_{\text{ф}}$ , а також фазних напруг  $U_A = U_B = U_C = U_{\text{ф}}$  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:  $Z_A = Z_B = Z_C = Z_{\text{ф}}$ ;  $R_A = R_B = R_C = R_{\text{ф}}$ ;  $X_A = X_B = X_C = X_{\text{ф}}$ . Значення фазних коефіцієнтів потужності  $\cos\varphi_A = \cos\varphi_B = \cos\varphi_C = \cos\varphi_{\text{ф}}$  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)  $U_a = U_b = U_c = U_{\text{ф}}$ ,  $U_{AB} = U_{BC} = U_{CA} = U_{\text{л}}$ ,  $Z_a = Z_b = Z_c = Z_{\text{ф}}$ ;  $R_a = R_b = R_c = R_{\text{ф}}$ ;  $X_a = X_b = X_c = X_{\text{ф}}$   $\cos\varphi_a = \cos\varphi_b = \cos\varphi_c = \cos\varphi_{\text{ф}}$ . Співвідношення між фазними й лінійними напругами визначають як

$$U_{\text{л}} = \sqrt{3}U_{\text{ф}}. \quad (6.7)$$

Для **несиметричних трифазних** споживачів не всі ці співвідношення зберігаються. 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 фа-

зної 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:

$$\left. \begin{aligned} \dot{U}_a &= U_a = U_\phi = \frac{U_\lambda}{\sqrt{3}}; \\ \dot{U}_b &= U_b \left(-\frac{1}{2} - j\frac{\sqrt{3}}{2}\right) = U_\phi \left(-\frac{1}{2} - j\frac{\sqrt{3}}{2}\right) = \frac{U_\lambda}{\sqrt{3}} \left(-\frac{1}{2} - j\frac{\sqrt{3}}{2}\right); \\ \dot{U}_c &= U_c \left(-\frac{1}{2} + j\frac{\sqrt{3}}{2}\right) = U_\phi \left(-\frac{1}{2} + j\frac{\sqrt{3}}{2}\right) = \frac{U_\lambda}{\sqrt{3}} \left(-\frac{1}{2} + j\frac{\sqrt{3}}{2}\right) \end{aligned} \right\}; \quad (6.8)$$

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:

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

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:

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

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 дорівнюють лінійним напругам ( $U_{\phi}=U_{\text{л}}$ ).

Зневажаючи опором лінійних проводів, лінійні напруги споживача можна дорівнювати лінійним напругам джерела живлення:

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

При симетричній системі живлення:

$$U_{ab} = U_{bc} = U_{ca} = U_{AB} = U_{BC} = U_{CA} = U_{\phi} = U_{\text{л}} . \quad (6.10)$$

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:

$$\left. \begin{aligned} \dot{U}_{ab} &= U_{ab} = U_{\text{л}} ; \\ \dot{U}_{bc} &= U_{bc} \left( -\frac{1}{2} - j\frac{\sqrt{3}}{2} \right) = U_{\text{л}} \left( -\frac{1}{2} - j\frac{\sqrt{3}}{2} \right) ; \\ \dot{U}_{ca} &= U_{ca} \left( -\frac{1}{2} + j\frac{\sqrt{3}}{2} \right) = U_{\text{л}} \left( -\frac{1}{2} + j\frac{\sqrt{3}}{2} \right) . \end{aligned} \right\} \quad (6.11)$$

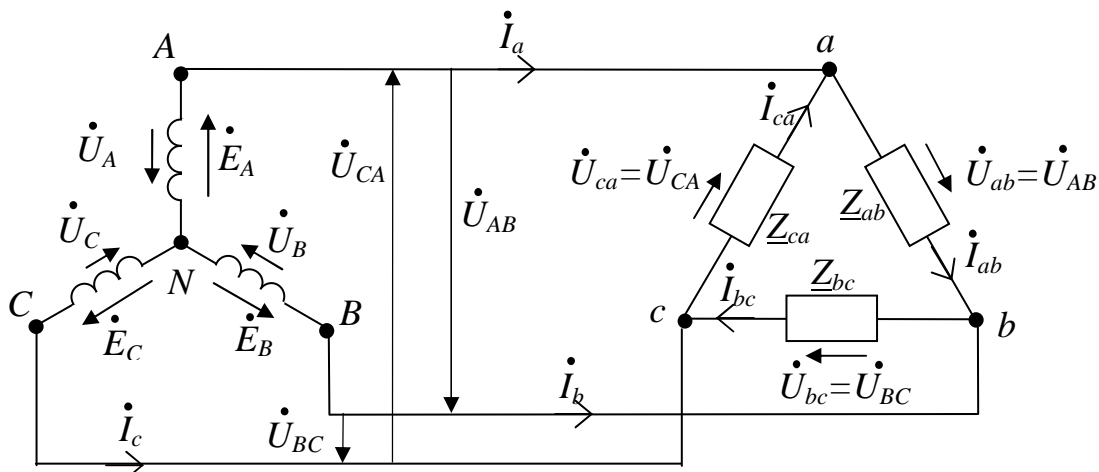


Рис.6.6 - З'єднання електроспоживачів "трикутником"

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

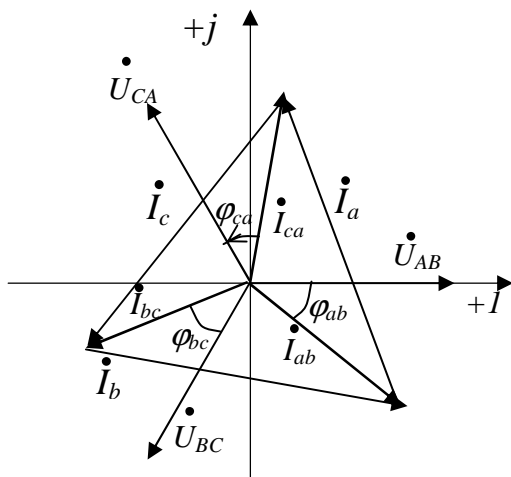


Рис.6.7 - Векторна діаграма струмів і напруг при з'єднанні споживача "трикутником"

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

$$I_{\text{л}} = \sqrt{3} I_{\phi} \quad (6.12)$$

### 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  $n$ .

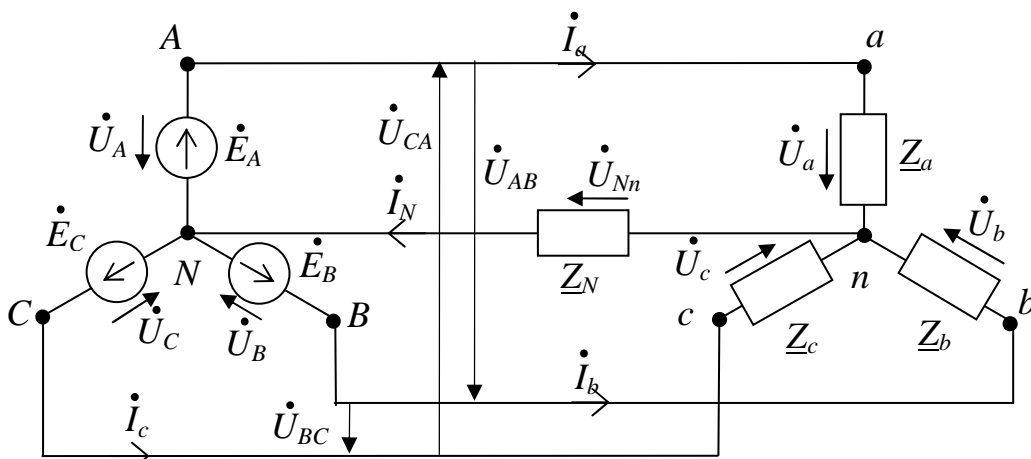


Рис.6.8 - Трифазна чотирипровідна електрична мережа

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  $U_{\phi}$  і лінійну  $U_{\text{л}} = \sqrt{3} U_{\phi}$ . При змішаному силовому й освітлювальному навантаженнях силові споживачі електроенергії живлять лінійними напругами  $U_{\text{л}} = 660; 380; 220$  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 ( $\underline{Z}_a \neq \underline{Z}_b \neq \underline{Z}_c$ ), 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  $\underline{Z}_a = \underline{Z}_b = \underline{Z}_c$  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

$$\dot{U}_{Nn} = \frac{U_n(\underline{Y}_a + a^2 \underline{Y}_b + a \underline{Y}_c)}{\sqrt{3}(\underline{Y}_a + \underline{Y}_b + \underline{Y}_c + \underline{Y}_N)}, \quad (6.14)$$

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):

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

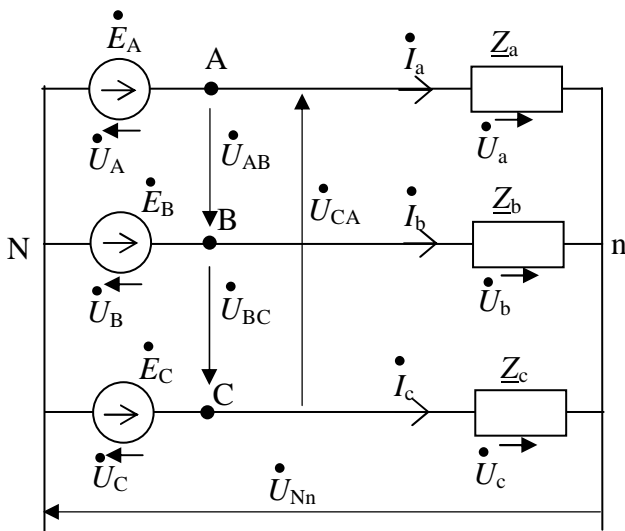


Рис.6.9 - Розрахункова схема

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 п 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. 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.

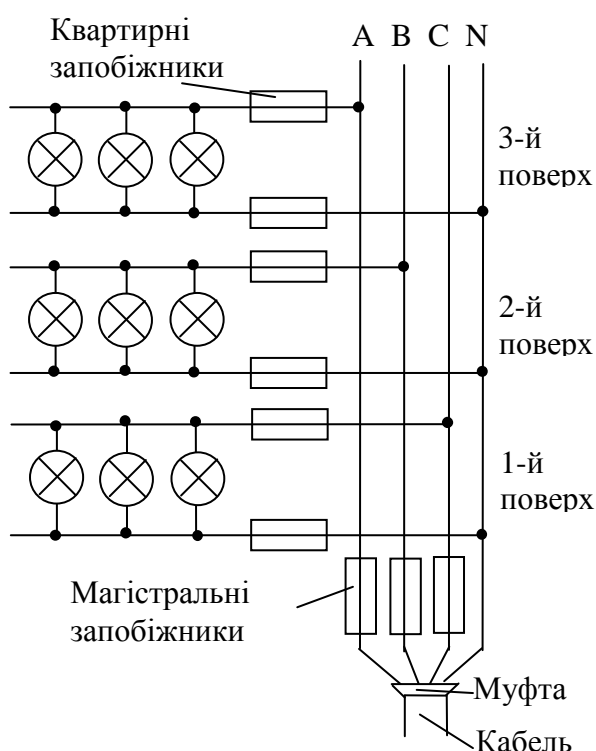


Рис. 6.10 – Чотирипровідна електрична мережа

### 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:

$$\left. \begin{aligned} P &= I_a^2 R_a + I_b^2 R_b + I_c^2 R_c = I_a \cdot U_a \cdot \cos \varphi_a + I_b \cdot U_b \cdot \cos \varphi_b + I_c \cdot U_c \cdot \cos \varphi_c; \\ Q &= I_a^2 \cdot X_a + I_b^2 \cdot X_b + I_c^2 \cdot X_c = I_a \cdot U_a \cdot \sin \varphi_a + I_b \cdot U_b \cdot \sin \varphi_b + I_c \cdot U_c \cdot \sin \varphi_c; \\ S &= \sqrt{P^2 + Q^2}, \end{aligned} \right\} \quad (6.15)$$

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:

$$\left. \begin{aligned} P &= 3I_\phi^2 R_\phi = \sqrt{3} U_\phi I_\phi \cos \varphi_\phi; \\ Q &= 3I_\phi^2 X_\phi = \sqrt{3} U_\phi I_\phi \sin \varphi_\phi; \\ S &= \sqrt{P^2 + Q^2} = \sqrt{3} U_\phi I_\phi, \end{aligned} \right\} \quad (6.16)$$

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  $Z_\phi$  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

$$I_{\phi Y} = U_{\phi Y} / Z_\phi = I_{\phi Y}, \quad U_{\phi Y} = U_\phi / \sqrt{3},$$

з яких випливає, що

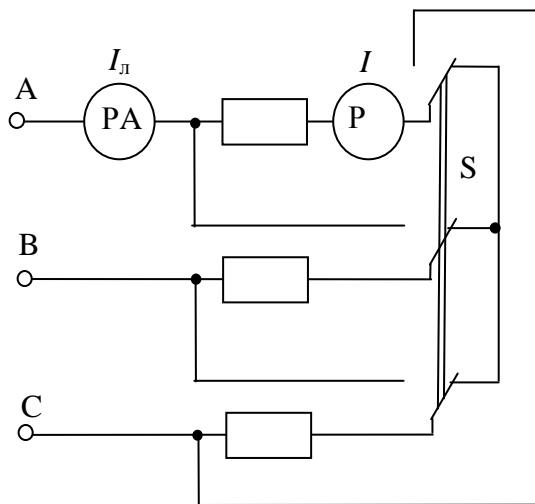


Рис.6.11 - Схема переключення трифазного приймача із «зірки» на «трикутник»

$$I_{\text{лY}} = \frac{U_{\text{л}}}{\sqrt{3}Z_{\phi}}. \quad (6.19)$$

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  $U_{\text{л}}$  і однакових повних фазних опорах  $Z_{\phi}$  вираз для діючих значень лінійних струмів:

$$I_{\text{л}\Delta} = 3I_{\text{лY}},$$

і для діючих значень фазних струмів

$$I_{\phi\Delta} = \sqrt{3}I_{\phi\text{Y}}.$$

Активна потужність трифазного симетричного приймача при кожній із схем з'єднання за (6.15) дорівнює

$$P = \sqrt{3}U_{\text{л}}I_{\text{л}}\cos\varphi.$$

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

$$P_{\Delta} = 3P_{\text{Y}}. \quad (6.21)$$

### Контрольні запитання з теми 6

1. В яких значеннях в електротехніці вживають термін «фаза»?
2. У якому випадку трифазну систему вважають симетричною?
3. Що називають прямою (зворотною) послідовністю чергування фаз?
4. Що розуміють під нейтраллю трифазної мережі?
5. Які схеми з'єднання фаз застосовують в трифазних мережах?
6. Запишіть у комплексній формі фазні напруги трифазного симетричного споживача з'єданого за схемою «зірка».
7. Накресліть векторну діаграму фазних і лінійних напруг споживача включеного за схемою «зірка».
8. Накресліть векторну діаграму напруг і струмів споживача, включеного за схемою «трикутник».
9. Поясніть особливості трифазних чотирипровідних кіл.
10. Запишіть співвідношення для активної, реактивної й повної потужностей трифазного симетричного кола.

## ТЕМА 7

### ЕЛЕКТРОВИМІРЮВАЛЬНІ ПРИЛАДИ

#### 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 досліdnим 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  $X_{\text{ист}} \approx X_{\text{д}}$ .

**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 належать 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 градуювання 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.

ції 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, термопари, 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 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 багатомежних 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**:

$$S_{аб} = \frac{\Delta I}{\Delta X}; \quad S_{від} = \frac{\Delta I}{\Delta X / X}, \quad (7.4)$$

де  $\Delta I$  - зміна сигналу на виході приладу;  $\Delta X$  - 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.

**Прилади магнітоелектричної системи** застосовують у колах постійного струму для вимірювання струму й напруги; вони мають 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. **Кут повороту стрілки магнітоелектричного приладу прямо пропорційний значенню струму, що проходить через рамку, і шкала приладу є рівномірною.**

Прилади даної системи строго полярні і для правильного включення до електричного кола затискачі приладу мають маркування «+» і «-».

Прилади для вимірювання струму називаються **амперметрами**. До електричного кола амперметр включають послідовно.

Для вимірювання струмів, що перевищують граничний струм приладу, використовують шунти. Шунт являє собою опір  $R_{ш}$ , включений паралельно вимірювальному приладу.

Прилад для вимірювання напруги називається **вольтметром**. Вольтметр для вимірювання постійної напруги складається із стрілочного приладу магнітоелектричної системи, послідовно з яким включений додатковий опір.

При вимірюванні напруги вольтметр підключають паралельно вимірюваній ділянці електричного кола.

**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. Обертовий момент вимірювального механізму приладу в колі змінного струму пропорційний квадрату діючого значення струму  $M_{вр} \approx C \cdot I^2$ . Внаслідок цього **шкала приладу квадратична**, що є його недоліком, і нерівномірна в початковій частині.

Електромагнітні прилади застосовують для вимірювання у колах постійного й змінного струмів як амперметри й вольтметри.

Принцип роботи **ЕВП електродинамічної системи** заснований на взаємодії магнітних полів нерухомої і рухомої котушок, по яких протікає вимірюваний струм. Електродинамічні прилади використовують в колах постійного і змінного струму як амперметри, вольтметри і ватметри.

Електродинамічні ватметри служать для вимірювання потужності в колах постійного й змінного струмів. При використанні ватметра в колі постійного струму (рис. 7.1) нерухома котушка включається до кола струму  $I$ , а рухома ко-

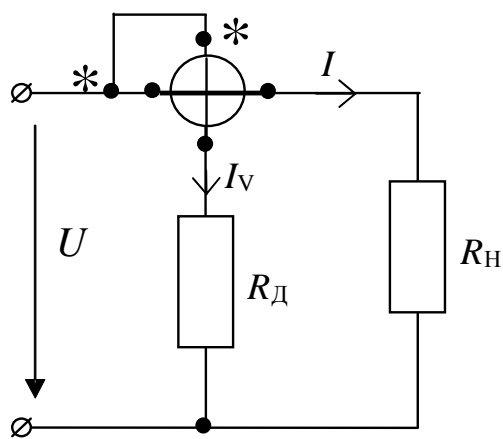


Рис.7.1 - Схема включення електродинамічного ватметра

тушка з послідовно з'єднаним додатковим резистором  $R_d$  - паралельно навантажувальному пристрою з опором  $R_n$ . Обертовий момент пропорційний потужності, споживаної опором навантаження  $R_n$ .

**Феродинамічний вимірювальний** механізм відрізняється від електродинамічного більш сильним магнітним полем, одержуваним завдяки наявності магнітної системи, що складається з магнітопроводу і нерухомого циліндра.

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.

#### 7.4. 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)  $Y$ .

Як перетворювачі в електротехніці використовують 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.

Номінальний струм у колі визначають як

$$I_{\text{ПР}} = I \frac{R_{\text{Ш}}}{R_{\text{ПР}} + R_{\text{Ш}}}, \quad I = I_{\text{ПР}} \left( \frac{R_{\text{ПР}}}{R_{\text{Ш}}} + 1 \right) = I_{\text{ПР}} \cdot p, \quad (7.6)$$

де  $p = \frac{R_{\text{ПР}}}{R_{\text{Ш}}} + 1$  – коефіцієнт, що називається **шунтувальним множником**. Він показує у скільки разів розширюється межа вимірювання струму.

З (7.6) можна одержати співвідношення для визначення опору шунта

$$R_{\text{Ш}} = \frac{R_{\text{ПР}}}{p - 1}. \quad (7.7)$$

Шунти бувають: внутрішні й зовнішні; одно- й багатомежеві. За точністю їх ділять на класи: 0,02; 0,05; 0,16; 0,2; 0,5; 1.

**Додаткові опори** застосовують для розширення меж вимірювання напруги. Їх включають послідовно з вимірювальним механізмом.

Значення додаткового опору можна визначити за формулою

$$R_{\text{Д}} = \frac{U - I_{\text{ПР}} \cdot R_{\text{ПР}}}{I_{\text{ПР}}} = R_{\text{ПР}} (p - 1), \quad (7.8)$$

де  $p = U/U_{\text{ПР}}$  – коефіцієнт розподілу за напругою.

З (7.8) випливає, що додатковий опір повинен бути в  $(p-1)$  разів більшим за опір приладу.

Додаткові опори виготовляють на номінальні струми: 0,5; 1; 3; 5; 7; 15 А і на 30 мА.

#### 7.5. Електронні електровимірювальні прилади

Електронні аналогові ЕВП являють собою засоби вимірювання, в яких перетворення сигналів вимірювальної інформації здійснюється за допомогою аналогових електронних пристроїв. 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. 7.9, де ВхП - вхідний пристрій у вигляді високоомного резистивного діляника напруги, ППН - підсилювач постійної напруги, МВП - магнітоелектричний вимірювальний прилад.

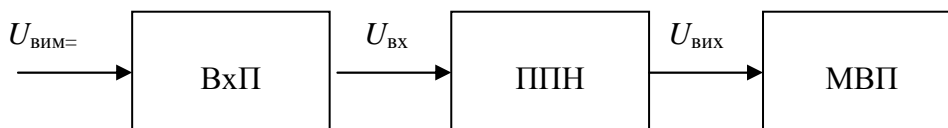


Рис.7.2 - Структурна схема електронного вольтметра постійної напруги

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 її наступною обробкою.

### **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. Якими переваги мають цифрові ЕВП?

## **ТЕМА 8**

### **МЕТОДИ ЕЛЕКТРИЧНИХ ВИМІРЮВАНЬ**

#### **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 використовуваних засобів вимірювань. **Методичні або теоретичні помилки** з'являються внаслідок недосконалості методів вимірювань, використання наближених співвідношень, не урахування 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 градуїровки 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

$$\Delta X = X - X_d \quad . \quad (8.1)$$

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

$$\delta = \frac{\Delta X}{X_d} = \frac{\Delta X}{X_d} \cdot 100\% \quad . \quad (8.2)$$

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, а також приведені похибки засобів вимірювання. Абсолютну похибку, взятую із зворотним знаком, називають поправкою:

$$\Pi = -\Delta X = X_0 - X \quad . \quad (8.3)$$

**Приведена похибка** – це відношення абсолютної похибки до нормуючого значення

$$\gamma = \frac{\Delta X}{X_N} = \frac{\Delta X}{X_N} \cdot 100\% \quad , \quad (8.4)$$

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.

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. Додаткові похибки ЕВП виникають при відхиленні величин, що впливають, 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 визначає виражену у відсотках максимальну, основну приведену похибку приладу. Чим менше число, тим вище клас точності приладу.

## **8.2. Класифікація методів електричних вимірювань**

Залежно від способу одержання результату *вимірювання підрозділяють на два види*: прямі й непрямі.

*Прямыми називають вимірювання*, при яких шукане значення фізичної величини визначають безпосередньо за показанням приладу.

*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.

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.

*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.

## **8.3. Вимірювання струму і напруги**

При вимірюванні малих постійних струмів (менше  $10^{-3}$  А) використовують прямі й непрямі методи вимірювання. У першому випадку струм вимірюють стрілочними магнітоелектричними приладами, для збільшення чутливості яких звичайно застосовують підсилювачі постійного струму.

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.

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 вимірюванні малих постійних напруг (порядку  $10^{-7} - 10^{-8}$  В) використовують магнітоелектричні гальванометри. 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.

#### **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.

В колах постійного струму потужність вимірюють за методом амперметра - вольтметра. Вимірявши амперметром струм  $I$  і вольтметром напругу  $U$ , обчислюють потужність приймача

$$P = U \cdot I. \quad (8.5)$$

При вимірюванні потужності в колах однофазного струму повну потужність приймача вимірюють, як правило, методом амперметра - вольтметра:

$$S = U \cdot I, \quad (8.6)$$

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.

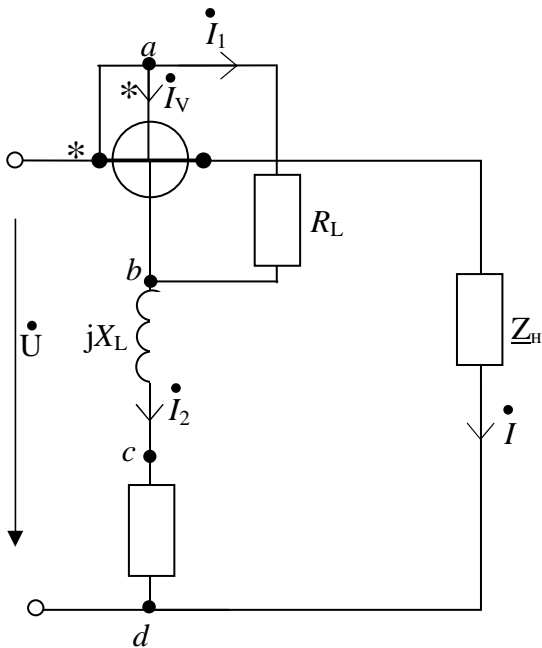


Рис. 8.1 - Схема включення варметра

Вимірювання реактивної потужності в однофазних колах проводять за допомогою реактивних ватметрів, що називаються варметрами. У цих приладах схемним шляхом створюється штучне зрушення фаз на  $90^\circ$  між напругою  $U$  на приймачі й струмом в обмотці напруги приладу  $I_v$  (рис. 8.1). Із схеми 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  $\dot{I}_v = \dot{I}_2 - \dot{I}_1$  при відповідному підборі параметрів  $X_L \ll (R_{wv} + R) = R_v$  буде зрушеним за фазою відносно напруги рівно на  $90^\circ$ . В результаті обертовий момент буде

пропорційним  $\sin \varphi$ , тобто обертовий момент пропорційний реактивній потужності  $Q = U \cdot I \sin \varphi$ .

При вимірюванні потужності в трифазних колах потужність трифазної системи дорівнює сумі потужностей, споживаних кожною фазою:

$$P = P_A + P_B + P_C. \quad (8.7)$$

У випадку рівномірного навантаження загальна активна потужність дорівнює потроєній потужності фази:

$$P = 3P_\phi = 3I_\phi \cdot U_\phi \cdot \cos \varphi, \quad (8.8)$$

де  $I_\phi$  і  $U_\phi$  - фазні струм і напруга.

Якщо фазні значення струму і напруги виразити через лінійні, то матимемо:

$$P = \sqrt{3} U \cdot I \cdot \cos \varphi, \quad (8.9)$$

Для вимірювання активної потужності трифазної системи застосовують різні способи:

**Спосіб одного ватметра** - для вимірювання потужності при симетричному навантаженні в чотирипровідній або трипровідній лінії, якщо доступна для підключення нейтральна (нульова) точка навантаження (рис. 8.2). При цьому загальна потужність дорівнює потроєному показанню ватметра:

$$P = 3I_\phi \cdot U_\phi \cdot \cos \varphi. \quad (8.10)$$



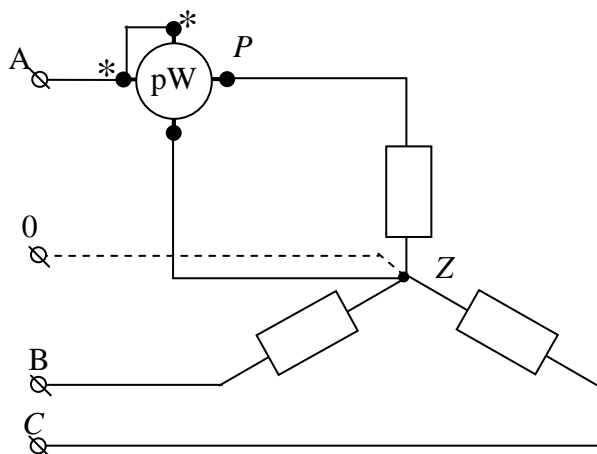


Рис.8.2 - Спосіб одного ватметра

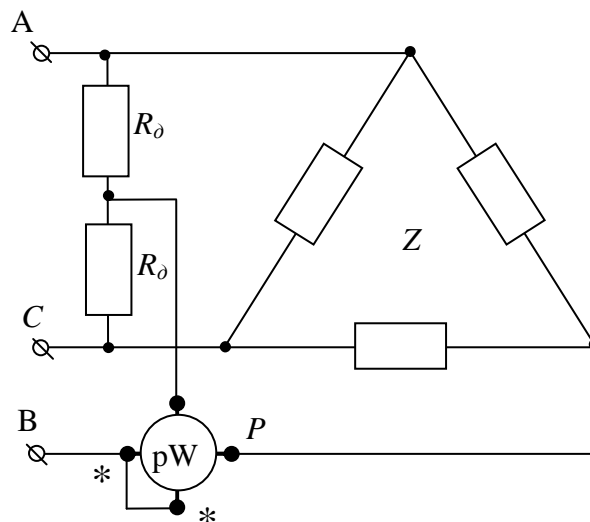


Рис.8.3 - Спосіб одного ватметра із штучною нульовою точкою

**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. 8.3). У цьому випадку загальна потужність дорівнює потроєному показанню ватметра.

**Спосіб трьох ватметрів** застосовують для вимірювання потужності при нерівномірному навантаженні в чотирипровідній лінії (рис. 8.4). Загальна потужність при цьому дорівнює сумі показань усіх трьох ватметрів.

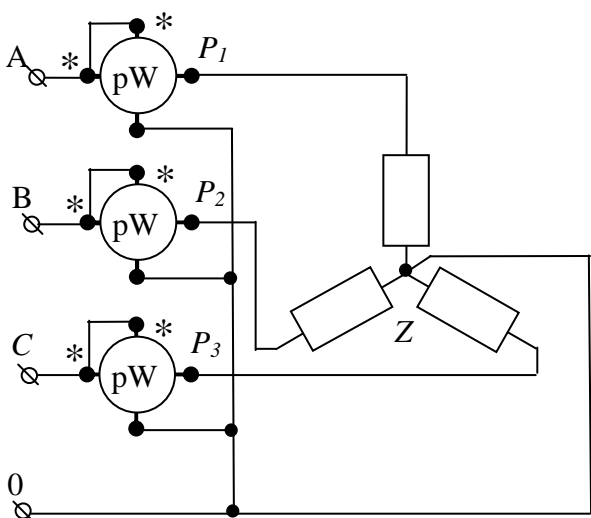


Рис.8.4 - Спосіб трьох ватметрів

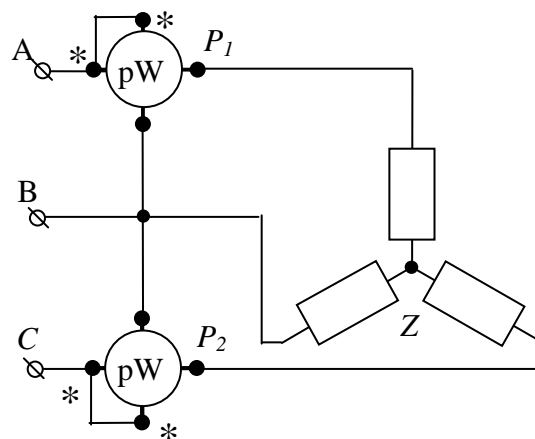


Рис.8.5 - Спосіб двох ватметрів

**Спосіб двох ватметрів** може бути застосований у трипровідних лініях у всіх випадках при вимірюванні потужності трифазних приймачів (рис. 8.5). 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. Активну електричну енергію в колах змінного струму вимірюють індукційними лічильниками, ввімкненими за схемами, що аналогічні схемам включення ватметрів. На рис. 8.6 наведено схему включення однофазного індукційного лічильника активної енергії.

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. На практиці застосовують також трифазні лічильники реактивної енергії. Облік реактивної енергії необхідний для

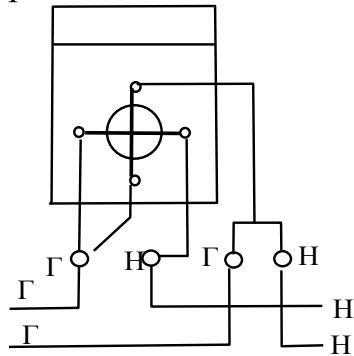


Рис.8.6- Схема включення однофазного індукційного лічильника

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 вимірювання неелектричної величини її потрібно попередньо перетворити на електричний сигнал. Це здійснюють за допомогою датчиків або первинних перетворювачів. На рис. 8.7 показана структурна схема пристрою для вимірювання неелектричної величини електричним методом, де 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  $x$ .

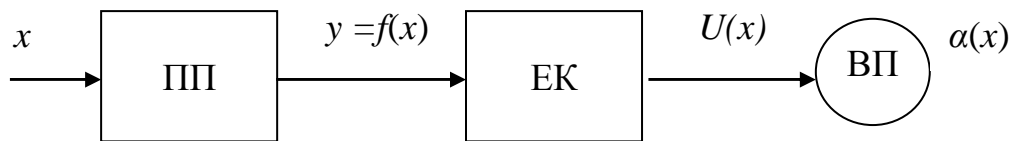


Рис.8.7 - Структурна схема пристрою для вимірювання неелектричної величини

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 з теми 8**

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. Як за допомогою двох ватметрів виміряти в трифазному трипровідному колі активну й реактивну потужності приймача?
6. У чому переваги електричних методів вимірювання неелектричних величин?

## ЗМ 2. ТРАНСФОРМАТОРИ І ЕЛЕКТРИЧНІ МАШИНИ

**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.

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 обертovому магнітному полі (синхронні машини), коли обертаються і магнітне поле і контур (асинхронні машини), при нерухомих у просторі магнітному полі й контурі, але магнітне поле 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.

### ТЕМА 9 ТРАНСФОРМАТОРИ

#### *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 сталевго 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 і трифазні, 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.

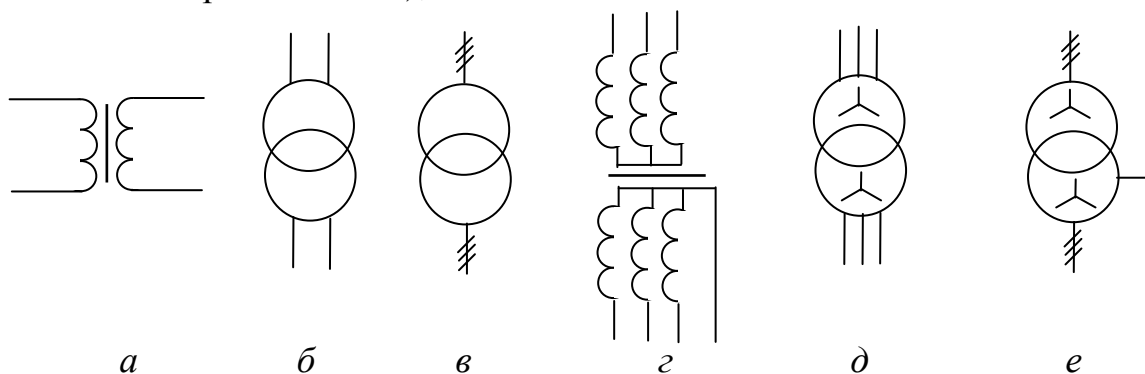


Рис.9.1 - Умовні графічні позначення трансформаторів

## 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 живлять споживач електричної енергії  $Z_H$ .

Змінний струм  $\dot{I}_1$ , проходячи по витках первинної обмотки трансформатора  $w_1$ , створює в осерді магнітопроводу змінний магнітний потік  $\Phi$ . 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 нава-

нтаження, протікає струм  $\dot{I}_2$ .

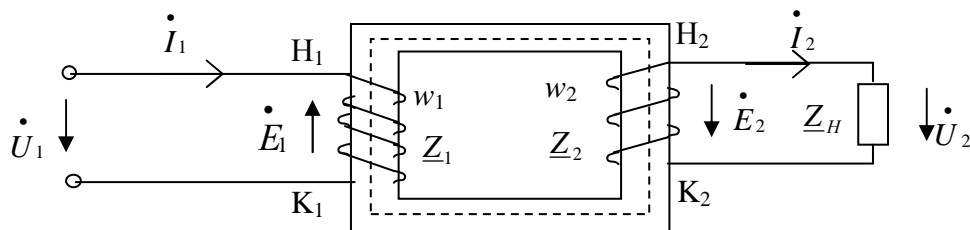


Рис.9.2 - Принцип дії однофазного трансформатора

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. Режим 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  $\alpha$ , що входить у рівняння (кут зрушення за фазою між струмом і магнітним потоком трансформатора), обумовлений втратами потужності в магнітопроводі. Значення кута  $\alpha$  для сучасних електротехнічних сталей 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).

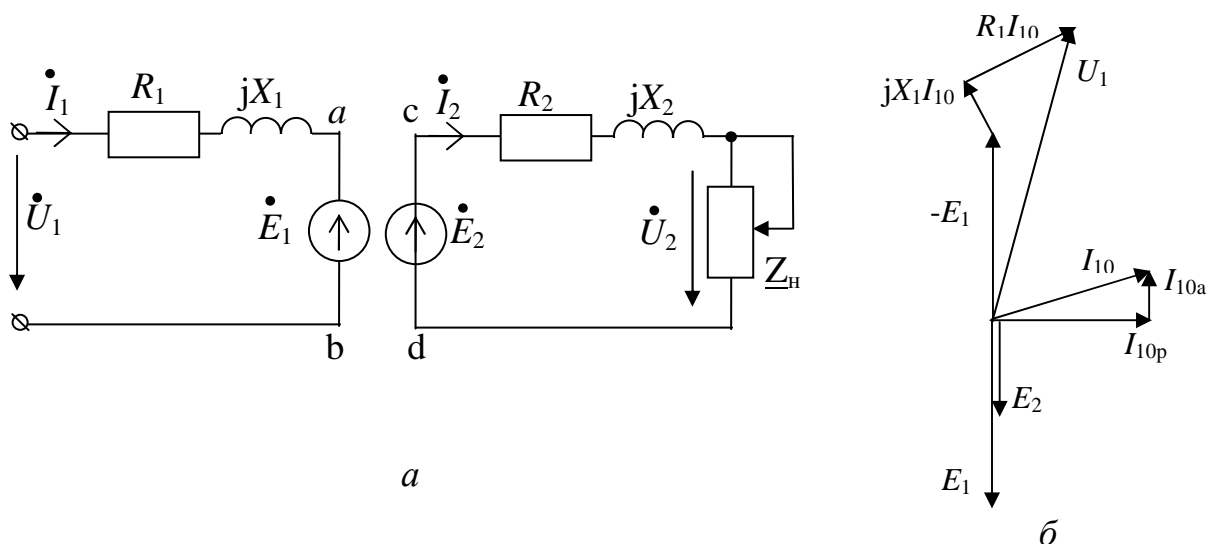


Рис.9.3 - Схема заміщення й векторна діаграма режиму холостого ходу

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. 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  $\Phi_0$  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  $S_2 = S_2'$  ( $E_2 I_2 = E_2' I_2'$ ), активна

$P_2 = P_2'$  ( $R_2 I_2^2 = R_2' I_2'^2$ ) і реактивна потужності  $Q_2 = Q_2'$  ( $X_2 I_2^2 = X_2' I_2'^2$ ), 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

$$\begin{aligned} \dot{U}_1 &= \dot{U} + \underline{Z}_1 \dot{I}_1; \\ \dot{U} &= \underline{Z}_2' \dot{I}_2' + \dot{U}_2'; \\ \dot{I}_1 &= \dot{I}_{10} + \dot{I}_2' \end{aligned} \quad (9.7)$$

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.

### 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  $S_H$ , коефіцієнт трансформації  $n$ , напруги  $U_{1H}$  і  $U_{2H}$ , напруга короткого замикання  $U_{KЗ}$ , струми  $I_{1H}$ ,  $I_{2H}$  і струм холостого ходу  $I_{10H}$ , частота  $f_H$ , втрати в сталі магнітопроводу  $\Delta P_{0H}$  і в обмотках  $\Delta P_{MH}$  та ін. У процесі тривалої експлуатації властивості ізоляції погіршуються, зростають втрати енергії. Тому періодично перевіряють основні дані трансформатора, до яких належать  $U_{KH}$  й  $I_{10H}$ , що характеризують 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.



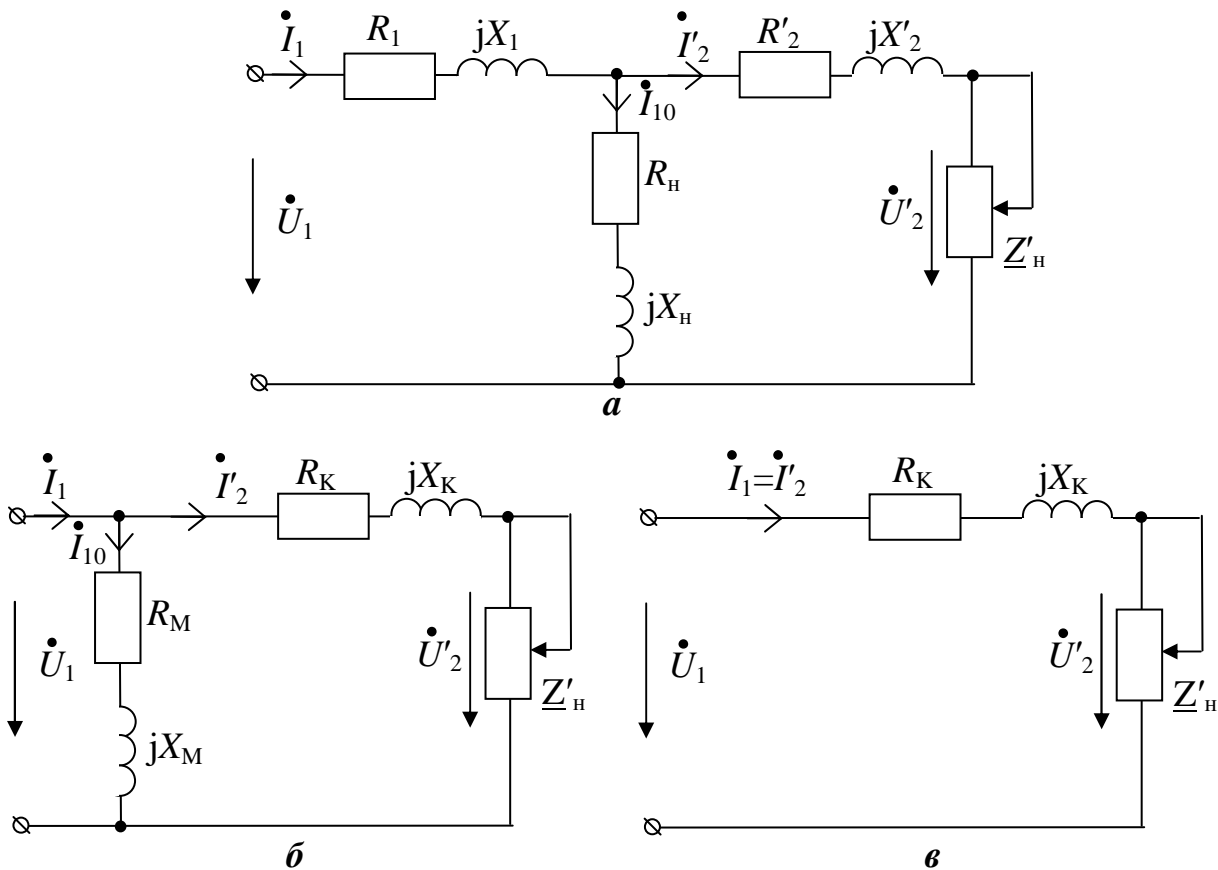


Рис.9.4 - Схеми заміщення однофазного трансформатора:  
а - Т-подібна, б - Г-подібна, в - режиму к.з.

**9.3.2. Зовнішня характеристика трансформатора.** Робочі властивості трансформатора характеризують залежністю напруги на навантаженні  $U_2$  і ККД  $\eta$  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

$$\dot{U}'_2 = \dot{U}_1 - (R_K + jX_K) \dot{I}_2 \quad (9.8)$$

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. 9.5).

Коефіцієнт корисної дії трансформатора  $\eta$  дорівнює відношенню корисної активної потужності  $P_2$  до всієї активної потужності, що надходить з мережі:

$$\eta = \frac{P_2}{P_1} = \frac{P_2}{P_2 + \Delta P_C + \Delta P_M}, \quad (9.9)$$

де  $\Delta P_C$  - втрати потужності в сталі магнітопровода;  $\Delta P_M$  - втрати потужності в міді обмоток.

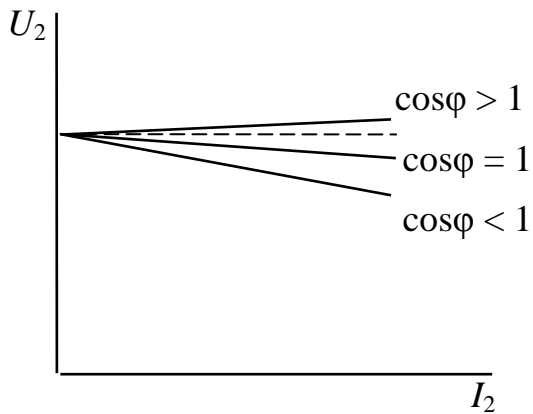


Рис.9.5 - Залежність  $U_2(I_2)$  при різному характері навантаження

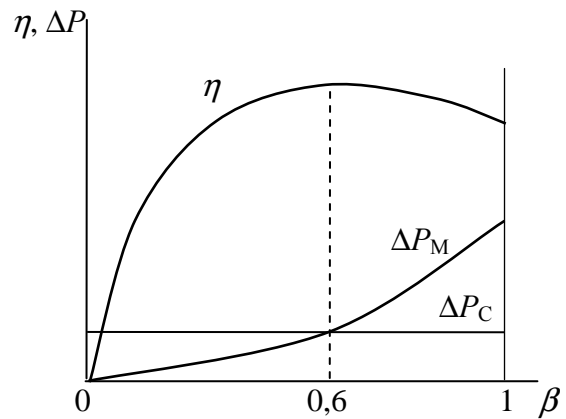


Рис.9.6 - Залежності  $\Delta P_C$  і  $\eta$  від коефіцієнта навантаження  $\beta$

Корисна потужність трансформатора виражається залежністю

$$P_2 = U_2 I_2 \cos \varphi_2 = \beta \cdot S_H \cos \varphi_2, \quad (9.10)$$

де  $S_H$  - повна потужність трансформатора, ВА;  $\beta = I_2/I_{2H}$  - коефіцієнт навантаження.

Втрати в сталі  $\Delta P_C$  не залежать від навантаження і дорівнюють втратам холостого ходу. Втрати в обмотках  $\Delta P_M$  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

$$\eta = \frac{\beta \cdot S_H \cos \varphi_2}{\beta \cdot S_H \cos \varphi_2 + \Delta P_C + \Delta P_{MH} \beta^2}. \quad (9.11)$$

Залежності,  $\Delta P_C$  і  $\eta$  від коефіцієнта навантаження  $\beta$  представлені на рис. 9.7. Залежність  $\eta(\beta)$  має максимум. За допомогою підбору параметрів обмоток і магнітопроводу для силових трансформаторів вибирають  $\eta_{\max}$  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. На кожному з трьох стрижнів розміщують первинну і вторинну обмотки однієї фази. Результуючі магніторушійні сили кожної фази зміщені одна до одної на  $120^\circ$ , 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» ( $\Delta$ ). 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. 9.7,а показана група з'єднання Y/Y - 0, де 0 указує на збіг фази А вторинної обмотки з фазою А первинної.

На рис. 9.7,б показана схема з'єднання Y/ $\Delta$  - 11, де 11 вказує, що вектор

напруги  $\dot{U}_{AB}$  первинної обмотки випереджає за фазою  $\dot{U}_{av}$  вторинної обмотки на  $30^\circ$  і збігається з положенням годинникової стрілки на цифрі 11.

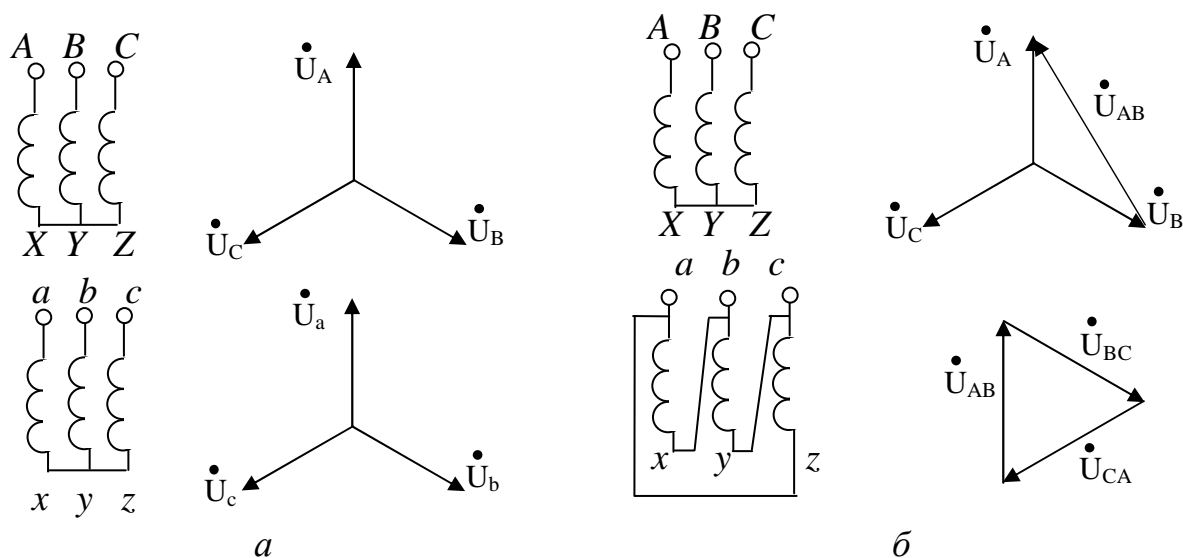


Рис.9.7 - Схеми з'єднання обмоток трифазних трансформаторів

### 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.

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. 9.8. Напруга джерела, прикладена до затискачів первинної обмотки АХ із числом витків  $w_1$ , урівноважується в основному ЕРС  $E_1$ , створеною 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:

$$n = U_1/U_2 = w_1/w_2. \quad (9.12)$$

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  $\dot{I}_{12} = \dot{I}_1 + \dot{I}_2$ . 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  $I_1/I_2 = U_1/U_2 = n$ .

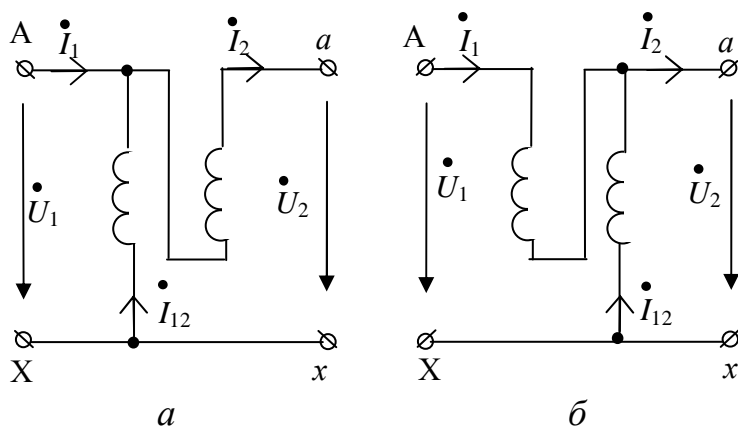


Рис.9.8 - Схеми автотрансформаторів:  
а - підвищувального, б - понижувального

Перевагою автотрансформатора перед звичайним трансформатором є простіша конструкція, менша витрата міді, більш високий ККД, менші втрати в обмотках і сталі магнітопроводу.

Однак автотрансформатор 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.

## 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. 9.9 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  $I_1$ :

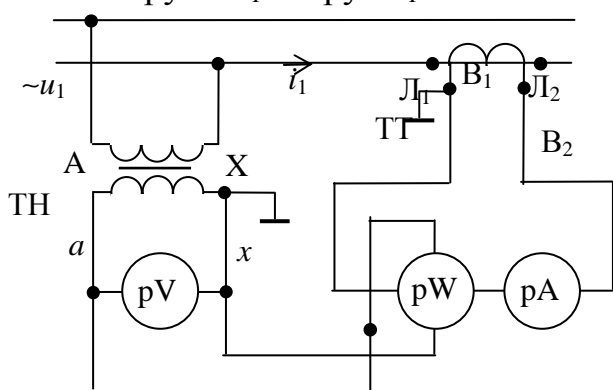


Рис.9.9 - Схеми включення трансформатора напруги й струму

$$U_1 = n_U \cdot U_2, \quad I_1 = n_I \cdot I_2,$$

де  $n_U$  і  $n_I$  - коефіцієнти трансформації трансформаторів напруги й струму відповідно;  $U_2$  і  $I_2$  - показання вольтметра і амперметра відповідно.

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. Нормальним режимом роботи трансформатора струму є режим короткого замикання, тому 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?

### **ТЕМА 10**

#### **ЕЛЕКТРИЧНІ МАШИНИ ПОСТІЙНОГО СТРУМУ**

##### ***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 із сталеві литої станини, головних і додаткових полюсів, на яких розміщують обмотки збудження. До цих обмоток підводять постійний струм, що створює в магнітному колі машини основне магнітне поле. Обертова частина машини постійного струму - *якір* з обмотками і колектором. На зовнішній поверхні якоря є пази, у які укладають замкнуту обмотку. Секції обмотки з'єднують між собою і з колекторними пластинами й утворюють замкнуту обмотку з певним числом паралельних гілок. Кількість гілок визначається типом обмотки. *Колектор* складається з окремих мідних пластин, ізольованих одна від одної і від вала прокладками з міканіту (ізоляційного матеріалу на основі слюди). Він призначений для випрямлення змінного струму якоря для зовнішнього кола у генераторів, а у двигунів - для зміни напрямку струму в провідниках обмотки якоря при його обертанні. По колектору ковзають нерухомі щітки, які закріплюють у спеціальних щіткотримачах.

##### ***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.

ЕРС обмотки якоря  $E$  генератора визначається конструкцією машини, швидкістю обертання якоря і величиною магнітного потоку, створюваного системою збудження:

$$E = \frac{N}{\alpha} \frac{pn}{60} \Phi = c n \Phi, \text{ В}, \quad (10.1)$$

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;  $\alpha$  - число пар паралельних гілок обмотки якоря;  $p$  - число пар полюсів;  $n$  - швидкість обертання, об/хв;  $\Phi$  - магнітний потік пари полюсів машини, Вб.

Таким чином, ЕРС якоря прямо пропорційна швидкості обертання машини і магнітному потоку. Звичайно швидкість обертання якоря 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 від 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  $I^2 \cdot R_{\text{я}}$ . Електричні втрати в щіткових контактах визначають, виходячи із струму якірного кола і падіння напруги під щітками однієї полярності:

$$\Delta P_{\text{щ}} = 2 \Delta U_{\text{щ}} I_{\text{я}}. \quad (10.3)$$

Електричні втрати в опорах якірного кола, включаючи щітковий контакт, становлять приблизно 50% всіх втрат енергії у машині.

Втрати енергії в обмотці збудження визначають через потужність, що поглинається цією обмоткою  $\Delta P_{\text{зб}} = U_{\text{зб}} \cdot I_{\text{зб}}$ . 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

$$\Delta P_{\text{Е}} = I_{\text{я}}^2 R_{\text{я}} + I_{\text{я}}^2 R_{\text{зб.}} + I_{\text{я}}^2 R_{\text{д.п.}} + \Delta P_{\text{щ}} + \Delta P_{\text{зб}}, \quad (10.4)$$

де  $R_{\text{зб.}}$ ,  $R_{\text{д.п.}}$ , - 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. Магнітні втрати в сталі якоря  $\Delta P_{\text{с}}$  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  $\Delta P_{\text{мех}}$ , 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  $P_{\text{ном}}$  (менший відсоток належить потужним машинам).

У машинах постійного струму є ще інші втрати, об'єднані в групу додаткових втрат  $\Delta P_{\text{дод}}$ . Вважають, що вони дорівнюють  $0,01 P_{\text{ном}}$ .

Знаючи суму всіх втрат у машині

$$\Delta P_{\Sigma} = \Delta P_{\text{Е}} + \Delta P_{\text{с}} + \Delta P_{\text{мех}} + \Delta P_{\text{дод}}, \quad (10.5)$$

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.

Машины 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). 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. У МПС невеликої потужності магнітне поле збудження створюється постійними магнітами.

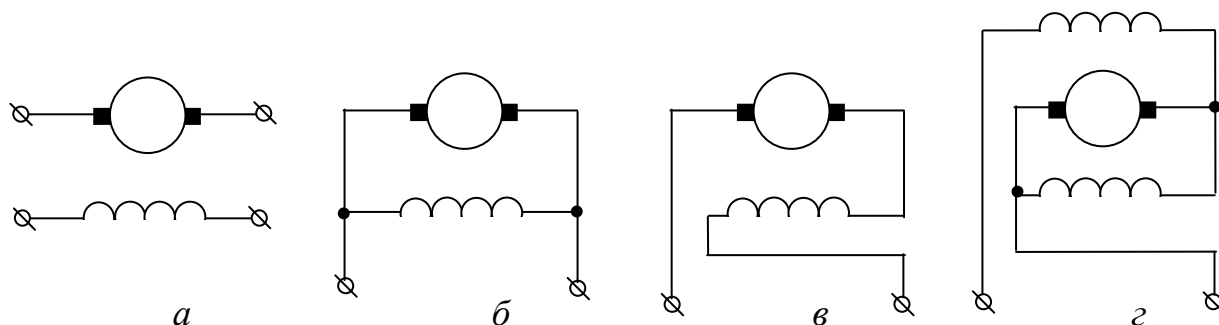


Рис. 10.5 - Схеми включення обмоток збудження машин:

а - з незалежним збудженням; б - паралельного збудження; в - послідовного збудження; г - змішаного збудження.

### **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.

Властивості й особливості електричних машин прийнято аналізувати за допомогою графіків - характеристик, які наводять у довідниках технічних даних або каталогах, чи знімають експериментально.

Найбільший практичний інтерес для генераторів представляє залежність напруги на його затискачах  $U$  від струму навантаження  $I_{\text{я}}$  при постійних швидкості обертання  $\omega$  і струмі обмотки збудження  $I_{\text{зб}}$  -  $U = f(I_{\text{я}})$ . Цю залежність називають зовнішньою характеристикою. Використовують також 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  $E = f(I_{\text{зб}})$  при  $\omega_{\text{ном}} = \text{const}$  і  $I_{\text{я}} = 0$ .

Для двигунів постійного струму найбільший інтерес становить залежність швидкості обертання  $\omega$  від струму  $I_{\text{я}}$  або від обертового моменту  $M$  при постійній напрузі живлення. Залежність  $\omega = f(I_{\text{я}})$  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 джерел напруги  $U$  і  $U_{\text{зб}}$ , що дозволяє окремо регулювати напругу на якорі двигуна і на обмотці збудження. Напрямки струму  $I$  і ЕРС обертання двигуна  $E$ , що показані на рис. 10.6, відповідають роботі в режимі двигуна, коли електрична енергія споживається двигуном з мережі і перетворюється на механічну енергію. На валу двигуна виникає обертовий електромагнітний момент  $M_{\text{ем}}$ . Корисний обертовий момент  $M$  на валу двигуна менший за електромагнітний на значення протидіючого моменту, створюваного в машині силами тертя й рівного моменту  $M_{\text{хх}}$  в режимі холостого ходу, тобто  $M = M_{\text{ем}} - M_{\text{хх}}$ .

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

$$M = \frac{P}{\omega}. \quad (10.9)$$

Аналітичний вираз механічної характеристики двигуна може бути отриманий з рівняння рівноваги напруг, складеного для якірного кола. При сталому



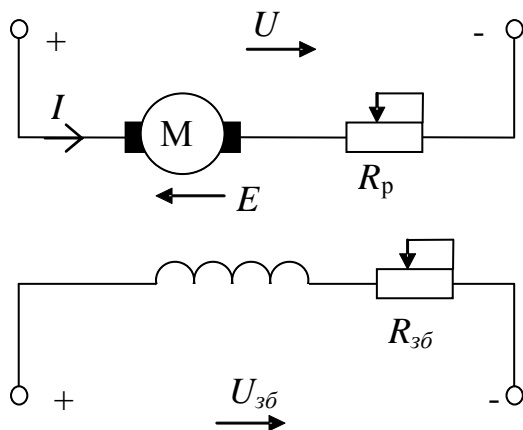


Рис.10.6 - Схема включення двигуна постійного струму незалежного збудження

режимі роботи 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);  $\Phi$  і  $\omega$  - 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  $U$ ,  $\Phi$  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. При  $M = 0$  всі характеристики проходять через одну точку на осі ординат. Кутова швидкість в цій точці має зна-

чення, що не залежить від опору якірного кола, вона зветься швидкістю ідеального холостого ходу  $\omega_0$  і визначається виразом

$$\omega_0 = \frac{U}{k\Phi}. \quad (10.17)$$

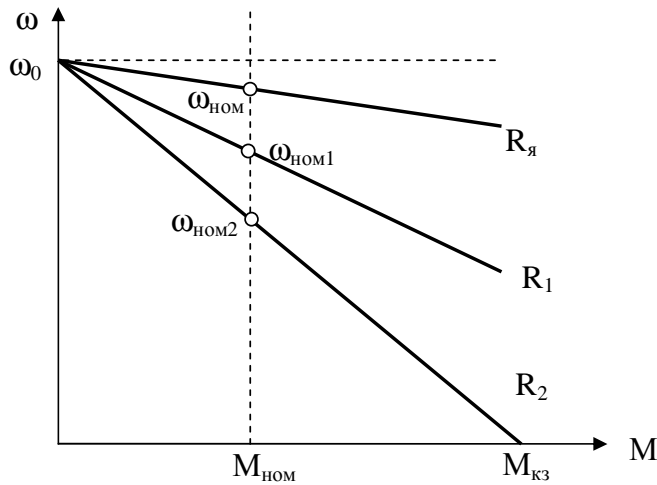


Рис.10.7 - Механічні характеристики двигуна постійного струму незалежного збудження

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 швидкість  $\omega_0$ , 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 статичного навантаження називається **статичним падінням швидкості**.

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. 10.7, 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 якірного кола двигуна  $R_{\text{я}}$ . Відповідно перепад швидкості для природної характеристики

$$\Delta\omega = \frac{M \cdot R_{\text{я}}}{k^2 \cdot \Phi_{\text{ном}}^2}.$$

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

$$\Delta\omega = \frac{M \cdot (R_{\text{я}} + R_p)}{k^2 \cdot \Phi^2}. \quad (10.20)$$

Розділивши (10.19) на  $\omega_0$ , отримаємо статичне падіння швидкості у відносних одиницях:

$$\Delta\omega^* = \frac{\Delta\omega}{\omega_0} = \frac{\omega_0 - \omega}{\omega_0}.$$

Якщо до якірного кола двигуна включений додатковий резистор (реостат), то отримані при цьому механічні характеристики називаються штучними або **реостатними характеристиками**. Ці характеристики перетинаються всі в одній точці  $\omega_0$ . Реостатні характеристики так само лінійні, як і природна характеристика, але 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.

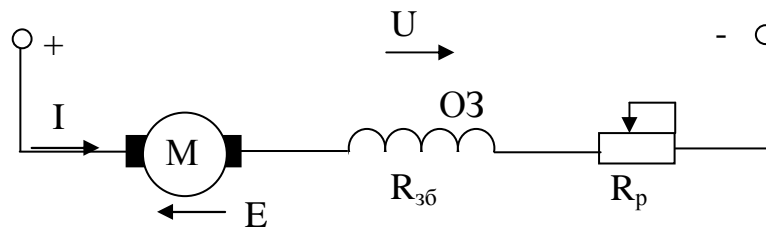


Рис. 10.8 - Схема включення двигуна постійного струму послідовного збудження.

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 якірного кола.

На відміну від двигуна незалежного збудження тут магнітний потік  $\Phi$  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  $\Phi = \alpha I$ , то момент двигуна можна виразити наступним чином:

$$M = k \cdot \Phi \cdot I = \alpha \cdot k \cdot I^2. \quad (10.22)$$

Підставивши у (10.21) значення струму з (10.22), отримаємо вираз для механічної характеристики:

$$\omega = \frac{U}{\alpha k \sqrt{\frac{M}{\alpha k}}} - \frac{R}{\alpha k} = \frac{A}{\sqrt{M}} - B. \quad (10.23)$$

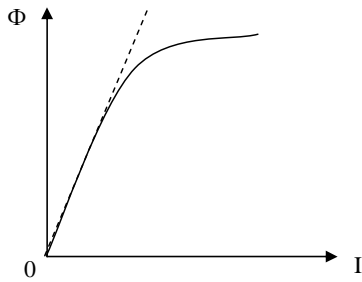


Рис.10.9 - Крива намагнічування двигуна постійного струму послідовного збудження

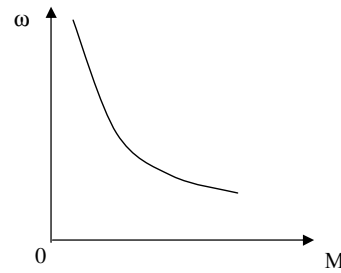


Рис.10.10 - Природна механічна характеристика двигуна постійного струму послідовного збудження

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 викликане 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  $M = f(I)$ .

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.

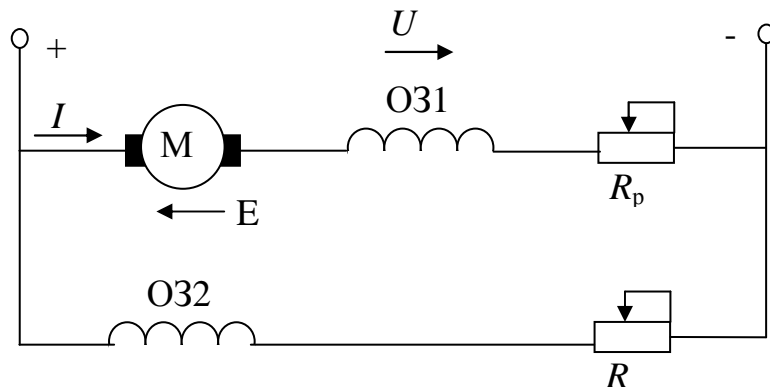


Рис. 10.11 - Схема включення двигуна постійного струму змішаного збудження.

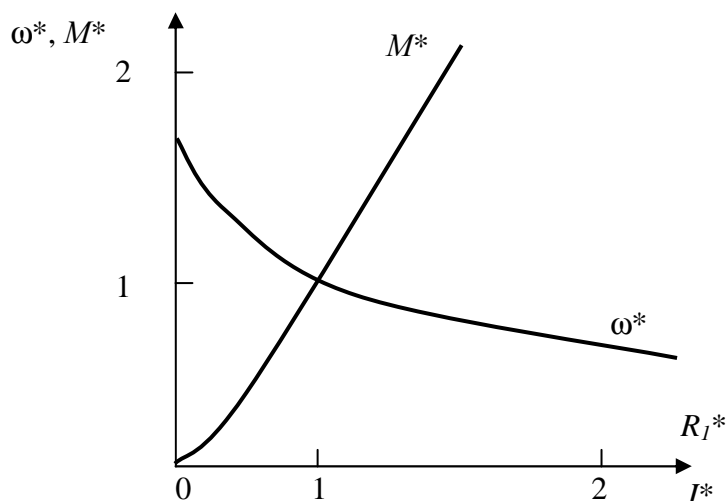


Рис. 10.12 - Залежність моменту і кутової швидкості від струму якоря для двигуна постійного струму змішаного збудження

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  $\Phi_0$  - магнітний потік, створений струмом збудження незалежної обмотки.

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 двигуна 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.

### 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. Виведіть рівняння обертового моменту двигуна. Як змінити напрямок обертання якоря двигуна?
6. Особливості схеми двигуна з паралельним збудженням.
7. Поясніть регулювання швидкості двигуна зміною струму збудження. Чому розрив кола збудження небезпечний для двигуна?
8. Поясніть регулювання швидкості двигуна з паралельним збудженням зміною напруги на якорі.
9. Як змінюється швидкість двигуна з послідовним збудженням при зміні навантаження на його валу? Чому робота з малим навантаженням для двигуна є неприпустимою?
10. Поясніть, як регулюють швидкість двигуна з послідовним збудженням.

11. Як змінюються обертовий момент і швидкість двигуна із змішаним збудженням із зростанням навантаження?

12. Які з втрат у машині постійного струму залежать від навантаження? Які втрати є постійними?

## ТЕМА 11

### АСИНХРОННІ ЕЛЕКТРИЧНІ МАШИНИ

Із загальної кількості електричних двигунів, що перебувають в експлуатації, на асинхронні двигуни припадає 90-95%. Простота, висока надійність, малі габарити і низька вартість обумовили їхнє широке застосування.

#### *11.1. Будова і принцип дії трифазної асинхронної машини*

**11.1.1. Будова асинхронної машини.** Основними конструктивними елементами АД є *нерухомий статор і обертовий ротор*. Статор складається із станини, що є одночасно корпусом двигуна, і закріплених у ній магнітопроводу і обмотки. Ротор АД складається з пакета магнітопроводу і обмотки. 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. 11.1,а). Умовне графічне позначення асинхронного двигуна з короткозамкненим ротором наведене на рис. 11.1,а.

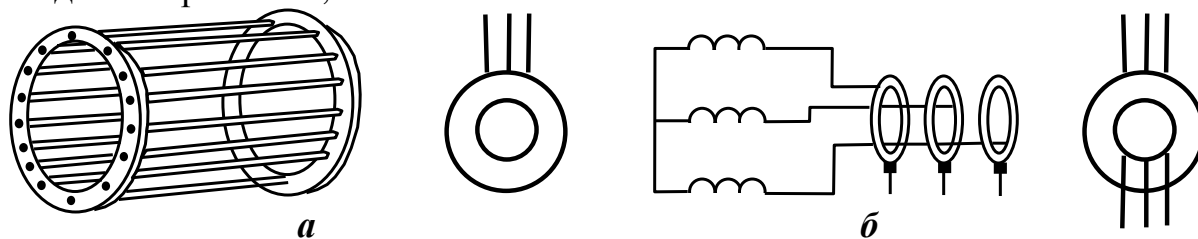


Рис.11.1 - Обмотки ротора АД:  
а - короткозамкнена; б - з фазним ротором.

У пази фазного ротора укладають провідники секцій трифазної обмотки, що з'єднується в «зірку» (рис. 11.1,б). Вільні виводи фаз обмотки ротора приєднують до трьох 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 наведене на рис. 11.1,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 результируючим магнітним полем створює електромагнітний момент на валу асинхронної машини.

Якщо цей момент перевищує момент опору на валу двигуна, вал починає обертатися і обертає робочий механізм. Кутову швидкість магнітного поля  $\omega_1$  називають синхронною. Звичайно кутова швидкість ротора  $\omega_2$  не дорівнює кутовій швидкості магнітного поля  $\omega_1$ . Звідси і назва двигуна асинхронний, тобто несинхронний.

Робота асинхронної машини характеризується **ковзанням**  $s$ , що являє собою **відносну різницю кутових швидкостей поля  $\omega_1$  і ротора  $\omega_2$** :

$$s = \frac{\omega_1 - \omega_2}{\omega_1} . \quad (11.1)$$

Значення і знак ковзання визначають режим роботи асинхронної машини. Так, у режимі ідеального холостого ходу ротор і магнітне поле обертаються з однаковою частотою в одному напрямку, тобто 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». Схему з'єднання обирають 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. 11.2,а) всі три кінці фазних обмоток  $C_4, C_5, C_6$  з'єднують в нульову точку, при схемі з'єднання в «трикутник» (рис. 11.2,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  $C_1 - C_6, C_2 - C_4, C_3 - C_5$ .

## 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 складати як вектори. Для врахування цієї обставини до формули ЕРС вводять обмоточний коефіцієнт  $k$ . Таким чином, ЕРС фазної обмотки статора визначається за формулою

$$E_1 = 4,44 \cdot f_1 \cdot w_1 \cdot k_1 \cdot \Phi , \quad (11.2)$$

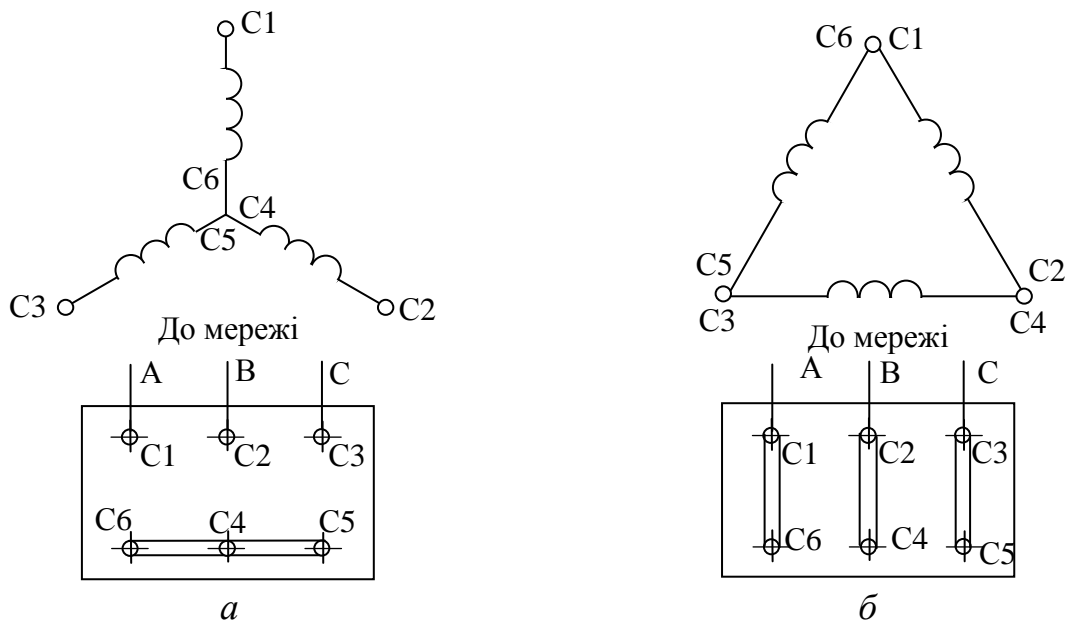


Рис.11.2 - Схеми з'єднання фазних обмоток АД:  
а – «зірка»; б – «трикутник»

де  $f_1$  - частота струму статора;  $w_1$  - число витків фазної обмотки;  $k_1$  - обмоточний коефіцієнт статора ( $k_1 = 0,9 \div 0,95$ );  $\Phi$  - 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. Крім головного потоку, **кожна з обмоток створює потік, що зчіплюється лише з нею самою**. Він називається **потокот розсіювання** і індуктує в обмотках статора і ротора ЕРС розсіювання  $E_{p1}$  і  $E_{p2}$ .

### 11.3. Рівняння електричної рівноваги статора і ротора

ЕРС фазних обмоток статора врівноважуються напругою мережі  $U_1$ . За рахунок напруги мережі також покривається падіння напруги в активному опорі обмотки статора  $R_1$ , рівне  $I_1 \cdot R_1$ . **Рівняння електричної рівноваги статора** має вигляд:

$$\bar{U}_1 + \bar{E}_1 + \bar{E}_{p1} - \bar{I}_1 \cdot R_1 = 0, \text{ або } \bar{U}_1 = -\bar{E}_1 - \bar{E}_{p1} + \bar{I}_1 \cdot R_1. \quad (11.9)$$

Оскільки  $E_{p1} = I_1 \cdot X_1$ , то

$$\bar{U}_1 = -\bar{E}_1 + \bar{I}_1 \cdot R_1 + \bar{I}_1 \cdot X_1, \text{ або } \bar{U}_1 = -\bar{E}_1 + \bar{I}_1 \cdot Z_1, \quad (11.10)$$

де  $Z_1 = \sqrt{R_1^2 + X_1^2}$  - повний опір фази статора. У комплексній формі рівняння електричної рівноваги статора має вигляд

$$\dot{U}_1 = -\dot{E}_1 + \dot{I}_1(R_1 + jX_1) = -\dot{E}_1 + \dot{I}_1 \cdot \underline{Z}_1. \quad (11.11)$$

Оскільки опір фазних обмоток статора  $Z_1$  невеликий, можна знехтувати падінням напруги  $I_1 \cdot Z_1$ , тоді

$$U_1 \approx E_1 \equiv \Phi. \quad (11.12)$$

Отже, при постійній напрузі мережі обертовий магнітний потік практично постійний і при невеликих струмах статора не залежить від навантаження.

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**

$$\bar{E}_2 + \bar{E}_{p2} = \bar{I}_2 \cdot R_2, \text{ або } \bar{E}_2 = \bar{I}_2 \cdot R_2 + \bar{I}_2 \cdot X_2 = \bar{I}_2 \cdot Z_2, \quad (11.13)$$

де  $Z_2 = \sqrt{R_2^2 + X_2^2}$  - повний опір фази ротора.

У комплексному запису

$$\dot{E}_2 = \dot{I}_2 \cdot (R_2 + jX_2) = \dot{I}_2 \cdot \underline{Z}_2. \quad (11.14)$$

Цьому рівнянню відповідає векторна діаграма ротора, зображена на рис. 11.3. З рівняння напруг струм ротора дорівнює

$$I_2 = \frac{E_2}{Z_2} = \frac{E_2}{\sqrt{R_2^2 + X_2^2}}. \quad (11.15)$$

Величини  $E_2$  і  $X_2$  залежать від ковзання. Взявши до уваги що  $E_2 = E_{2H} \cdot s$  і  $X_2 = X_{2H} \cdot s$ , дістанемо

$$I_2 = \frac{E_{2H} \cdot s}{\sqrt{R_2^2 + X_{2H}^2 \cdot s^2}} = \frac{E_{2H}}{\sqrt{\left(\frac{R_2}{s}\right)^2 + X_{2H}^2}}. \quad (11.16)$$

У цій формулі змінною, залежною від навантаження величиною, є ковзання  $s$ .

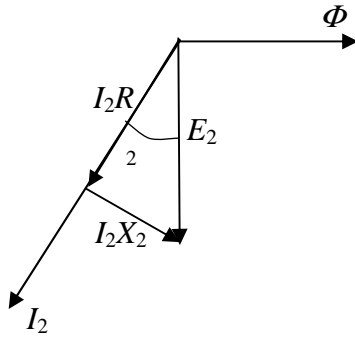
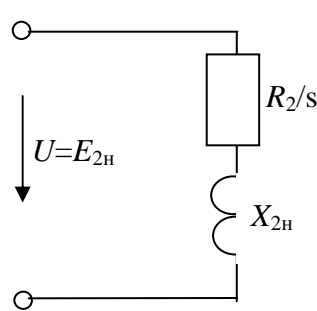
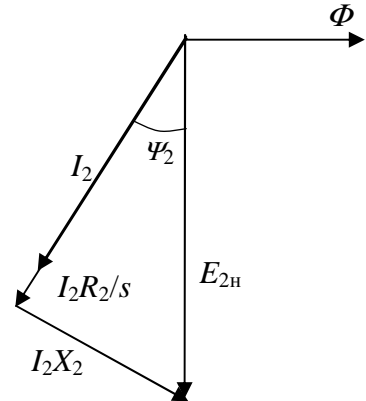


Рис.11.3 - Векторна діаграма за рівнянням (11.14)



а



б

Рис.11.4 - Схема ротора (а) і векторна діаграма (б) при малих ковзаннях

Фаза струму відносно ЕРС  $E_2$  також залежить від ковзання:

$$\operatorname{tg} \psi_2 = \frac{X_2}{R_2} = \frac{X_{2H} \cdot s}{R_2}. \quad (11.17)$$

На підставі (11.16) 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. 11.4,а). Векторна діаграма такої схеми ротора показана на рис. 11.4,б.

#### 11.4. Схема заміщення асинхронного двигуна

Розділивши обидві частини рівняння напруг ротора (11.14) на ковзання, можна записати

$$\dot{E}_{2H} = \dot{I}_2 \frac{R_2}{s} + \dot{I}_2 \cdot jX_{2H}. \quad (11.18)$$

Беручи до уваги, що  $I_2 = I_2' k_i$ , де  $I_2'$  - наведений струм 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

$$\dot{E}_{2H} \cdot k_e = \dot{I}_2' \frac{R_2 \cdot k_e \cdot k_i}{s} + \dot{I}_2' \cdot jX_{2H} \cdot k_e \cdot k_i, \text{ або } \dot{E}_2' = \dot{I}_2' \frac{R_2'}{s} + \dot{I}_2' \cdot jX_{2H}', \quad (11.19)$$

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;  $k = k_e \cdot k_i = \frac{m_1 \cdot w_1^2 \cdot k_1^2 \cdot k^2}{m_2 \cdot w_2^2 \cdot k^2}$  - коефіцієнт приведення опорів ротора до статора.

Заміна дійсних величин ротора приведеними дозволяє перейти від електромагнітного зв'язку між колами ротора і статора до електричного.

**АД може бути представлений електричною схемою заміщення**, наведеною на рис. 11.5.

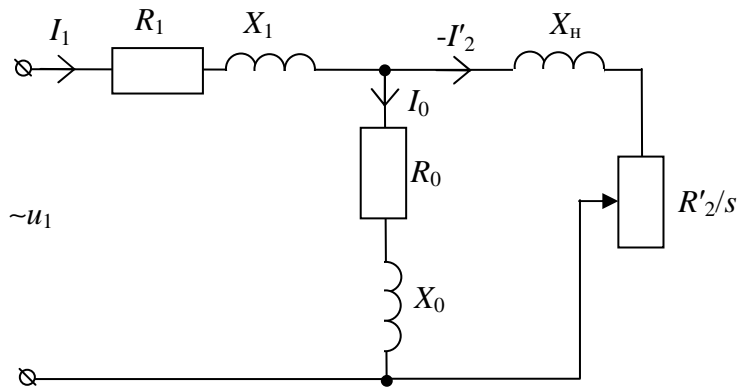


Рис.11.5 - Схема заміщення АД

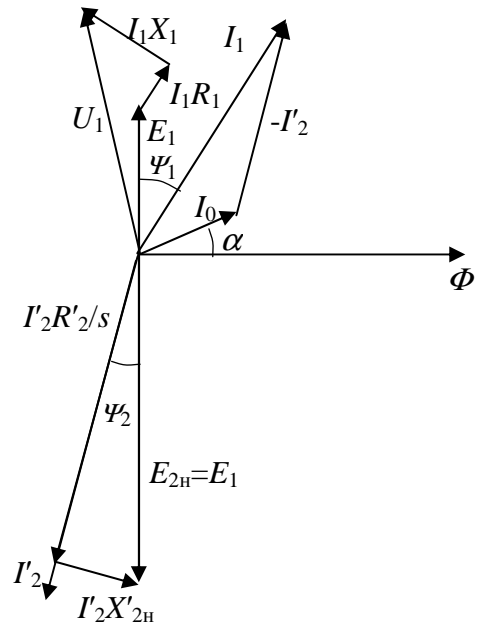


Рис.11.6 - Повна векторна діаграма АД

Даній схемі заміщення відповідає повна векторна діаграма асинхронного двигуна, що зображена на рис. 11.6. 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  $E'_2$ :

$$\dot{I}_0 \cdot R_0 + \dot{I}_0 \cdot jX_0 = -\dot{E}_1 = -\dot{E}'_2. \quad (11.20)$$

Параметри схеми заміщення можуть бути встановлені розрахунком або за дослідними даними.

### 11.5. Втрати і ККД асинхронного двигуна

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  $P_{E.C}$ :

$$P_{E.C} = m_1 \cdot I_1^2 \cdot R_1, \quad (11.21)$$

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  $P_{E.P}$ :

$$P_{E.P} = m_2 \cdot I_2^2 \cdot R_2, \quad (11.22)$$

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

$$\eta = \frac{P_2}{P_1} = \frac{P_1 - \Delta P}{P_1}, \quad (11.23)$$

де  $\Delta P$  - 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 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  $0,7 \div 0,8$ .

Електромагнітна потужність двигуна  $P_{EM}$  дорівнює добутку моменту електромагнітних сил  $M$  і кутової швидкості поля  $\omega_1$ :

$$P_{EM} = M \cdot \omega_1 = M \frac{2\pi \cdot n_1}{60}. \quad (11.24)$$

У свою чергу, механічна потужність ротора  $P'_2$  дорівнює добутку моменту і кутової швидкості ротора  $\omega_2$ :

$$P'_2 = M \cdot \omega_2 = M \frac{2\pi \cdot n_2}{60}; \quad (11.25)$$

Електромагнітна потужність ротора:

$$P_{E.P} = P_{EM} - P'_2 = M \frac{2\pi}{60} (n_1 - n_2) = M \frac{2\pi \cdot n_1}{60} \frac{n_1 - n_2}{n_1} = M \cdot \omega_1 \cdot s = P_{EM} \cdot s. \quad (11.26)$$

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:

$$M = \frac{P_{E.P}}{\omega_1 \cdot s} = \frac{m_2 \cdot I_2^2 \cdot R_2}{\omega_1 \cdot s}. \quad (11.27)$$

Перетворимо (11.27), використовуючи формули (11.8) і (11.16):

$$M = \frac{m_2 \cdot I_2^2 \cdot R_2}{\omega_1 \cdot s} = \frac{m_2}{\omega_1 \cdot s} \cdot \frac{E_{2H}^2 \cdot s^2 \cdot R_2}{R_2^2 + x_{2H}^2 \cdot s^2} = \frac{m_2}{\omega_1 \cdot k_e^2} \cdot \frac{E_1^2 \cdot s \cdot R_2}{R_2^2 + X_{2H}^2 \cdot s^2}.$$

Позначивши постійну величину  $\frac{m_2}{\omega_1 \cdot k_e^2} = C_1$  дістанемо

$$M = C_1 \cdot E_1^2 \frac{s \cdot R_2}{R_2^2 + X_{2H}^2 \cdot s^2}. \quad (11.28)$$

Якщо знехтувати падінням напруги в обмотці статора  $I_1 \cdot Z_1$ , то можна ЕРС  $E_1$  замінити напругою  $U_1$  (11.13). 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

$$M = C_1 \cdot U_1^2 \frac{s \cdot R_2}{R_2^2 + X_{2H}^2 \cdot s^2}. \quad (11.29)$$

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. 11.7).

З формули (11.29) і графіка випливає, що при малих ковзаннях ( $s < s_K$ ) момент приблизно пропорційний ковзанню. Із збільшенням ковзання стає відчутнішим вплив  $s$  у знаменнику формули (11.29) і момент, досягши свого найбільшого значення  $M_K$  при ковзанні  $s = s_K$ , далі убуває до величини пускового моменту  $M_{\Pi}$  при  $s = 1$ . **Максимальний момент  $M_K$  і ковзання  $s_K$ , при якому він розвивається, називаються критичними.**

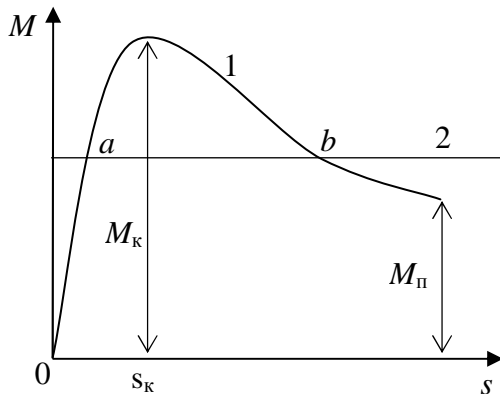


Рис. 11.7 - Механічна характеристика АД

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. 11.7), 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 її порушеннях. Це можливо, тільки якщо

$$\frac{dM}{ds} > \frac{dM_{on}}{ds}. \quad (11.30)$$

Як видно з рис. 11.7, 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.

Обертний 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**  $k_M$

$$k_M = \frac{M_K}{M_H}, \quad (11.31)$$

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  $M_H$ .

Для визначення критичного ковзання необхідно прирівняти до нуля похідну  $\frac{dM}{ds}$  і розв'язати отриманий вираз відносно  $s$ . Такий аналіз показує, що

$$s_K = \frac{R_2}{X_{2H}}, \quad (11.32)$$

а сам критичний момент, який можна одержати з виразу (11.32) після підстановки значення  $s = s_K$ , дорівнює

$$M_K = C_1 \cdot U_1^2 \frac{1}{2X_{2H}}. \quad (11.33)$$

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.

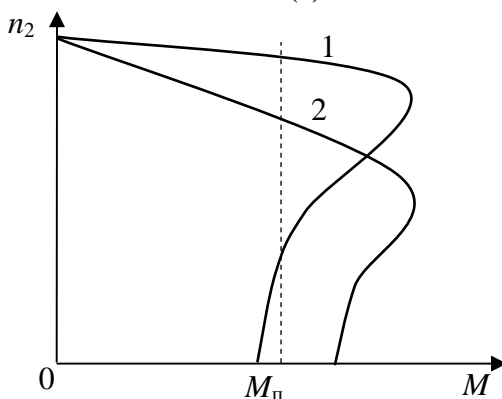


Рис.11.8 - Механічні характеристики АД

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. 11.8, 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 опору.

Для розрахунку механічної характеристики двигуна за двома відомими величинами -  $M_K$  і  $s_K$ , які можна одержати з каталогу, використовують формулу.

$$M = \frac{2M_K}{\frac{s_K}{s} + \frac{s}{s_K}} \quad (11.34)$$

### 11.7. Робочі характеристики асинхронних двигунів

Під робочими характеристиками АД розуміють залежності ряду величин від корисної потужності  $P_2$  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. 11.9.

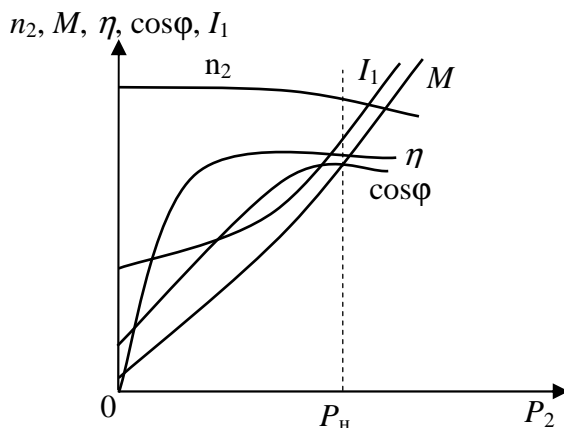


Рис.11.9 - Робочі характеристики АД

Залежність  $n_2 = f(P_2)$  або  $s = f(P_2)$  називається **швидкісною характеристикою**. 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  $s = \frac{P_{E.P}}{P_{EM}}$ . 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  $0,15 \div 0,2$ .

**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  $I_{х.х.}$ . Він може бути більшим за 50% від номінального. Із зростанням навантаження струм статора зростає.

### 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.

**11.8.1. Пуск АД з короткозамкненим ротором.** Пуск АД шляхом безпосереднього підключення до мережі змінного струму без обмеження струмів на-

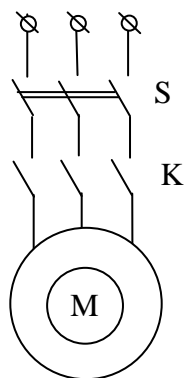


Рис.11.10 - Схема прямого пуску АД

зивають **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. 11.10) досить проста, що сприяло її широкому поширенню. Для прямого пуску необ-

хідно, 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.

**11.8.2. Пуск асинхронних двигунів з фазним ротором.** На рис. 11.11,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 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:

$$s_k = \frac{c_1(R_2' + R_{2д}')}{\sqrt{R_1^2 + (X_{1\sigma} + c_1 \cdot X_{2\sigma}')^2}}, \quad (11.35)$$

де  $R_{2д}$  – додатковий активний опір у колі ротора, приведений до обмотки статора АД.



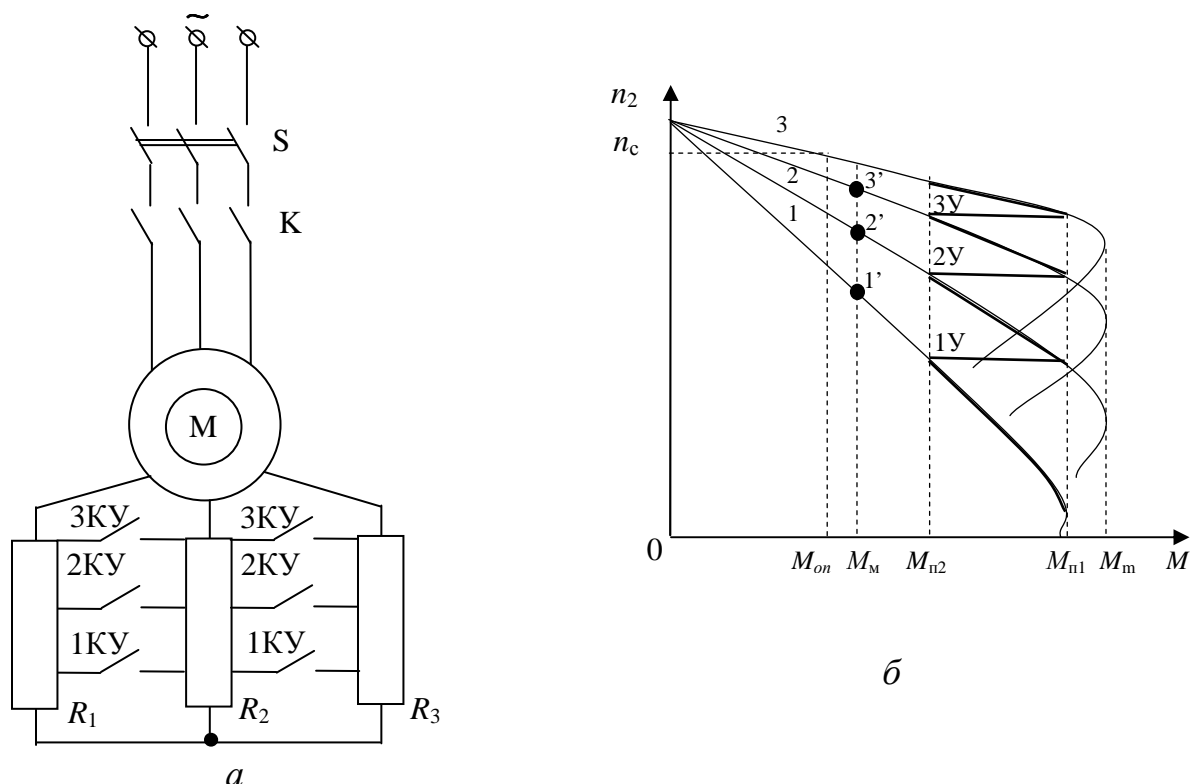


Рис.11.11 - Схема (а) і пускова діаграма (б) реостатного пуску колекторного АД

Зростання  $s_k$ , у свою чергу, збільшує нахил механічних характеристик (рис. 11.11,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.

На рис. 11.11,б пусковим механічним характеристикам 1, 2, 3 відповідають додаткові активні опори  $R_{2Д1} > R_{2Д2} > R_{2Д3}$ . Значення моменту перемикання  $M_{п2}$  визначається величинами витримки реле часу кіл керування, які настроюються. На практиці застосовують також інші схеми пуску АД.

### 11.9. Механічні характеристики асинхронного двигуна в гальмових режимах

АД працює 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  $\omega$  представлені на рис. 11.12. 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 реактивну потужність для збудження. Гальмуванню з відда-

чею 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.

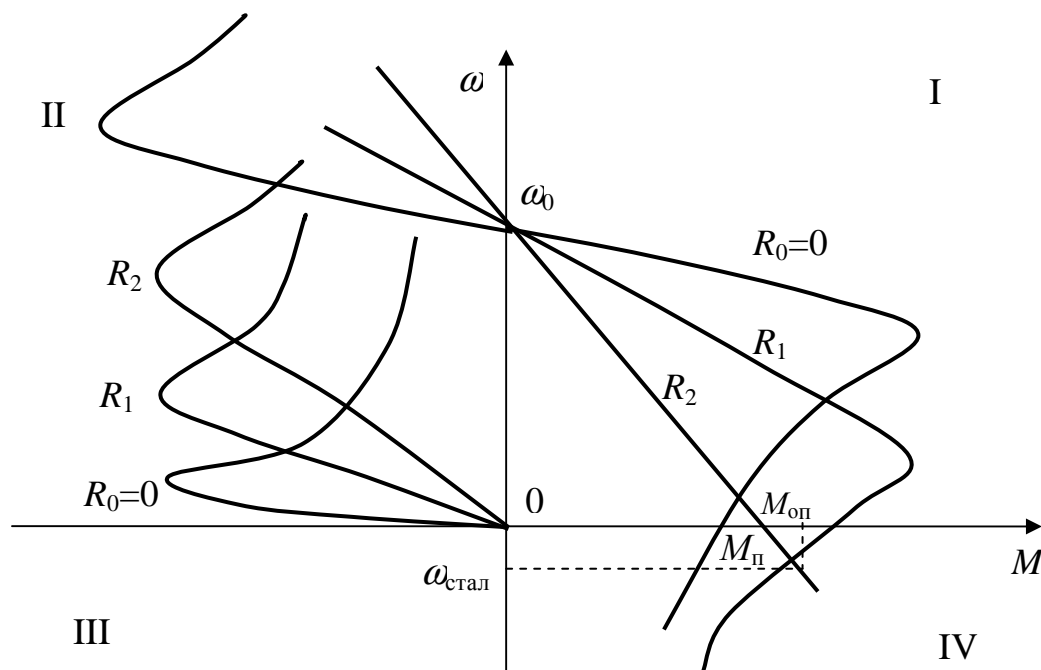


Рис. 11.12 - Механічні характеристики АД в різних режимах роботи

Гальмування противключенням застосовують на практиці частіше. Цей режим отримують 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. 11.12 точка  $(\omega_{стал}, M_{оп})$  на характеристиці  $R_2$ .

Механічна характеристика  $R_1$  у режимі гальмування противключенням і  $M_{оп} = \text{const}$  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. 11.13). Ротор при цьому обертається проти напрямку руху поля і поступово сповільнюється. Коли кутова швидкість спаде до нуля (точка С на рис. 11.13), 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 в режим динамічного гальмування контактор К1 (рис. 11.14) відключає статор від мережі змінного струму, а контактор К2 приєднує обмотку стато-

ра до мережі постійного струму. Для обмеження струму й одержання різних гальмових характеристик у колі ротора передбачені зовнішні резистори.

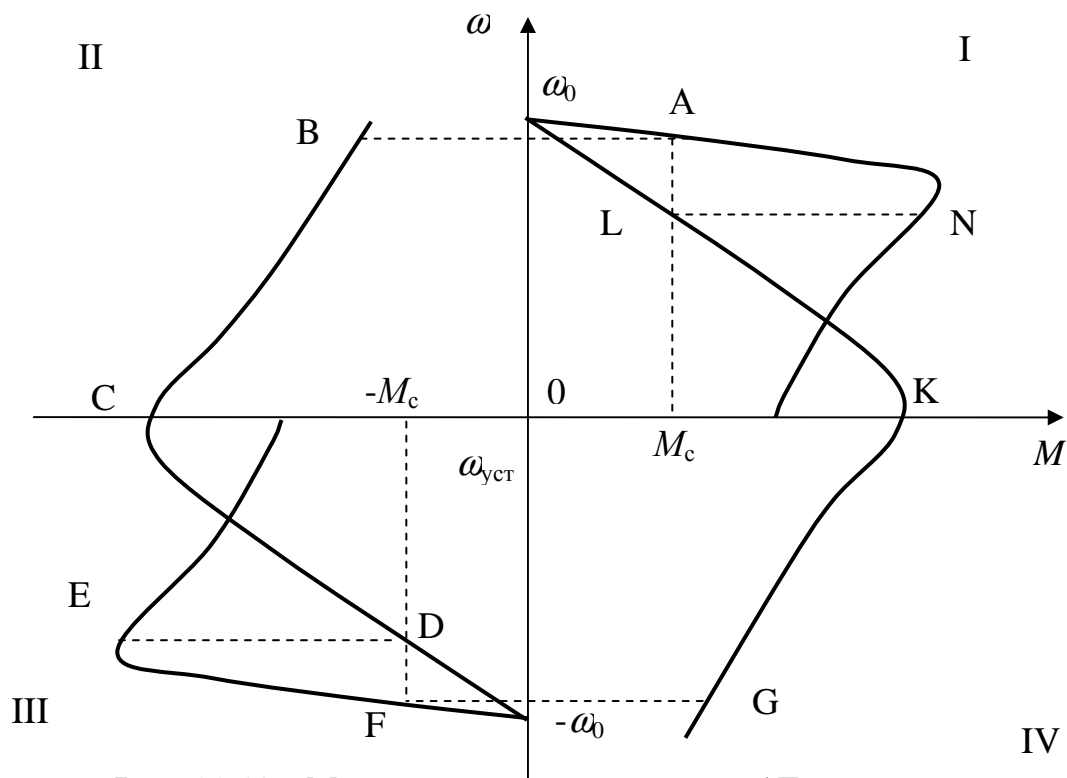


Рис. 11.13 - Механічні характеристики АД при перемиканні двох фаз статора

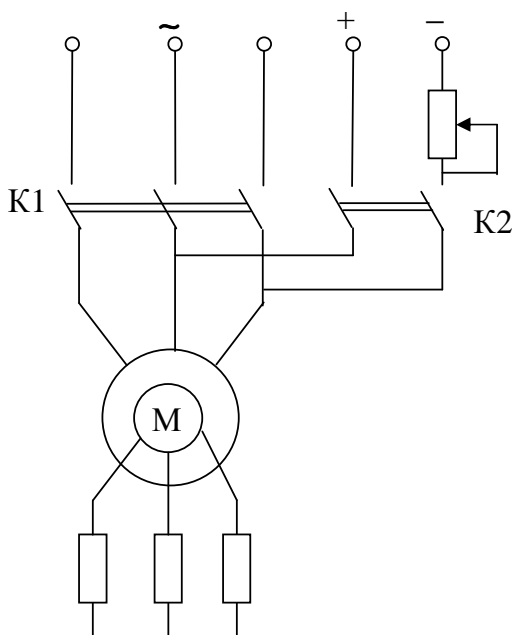


Рис.11.14 - Схема включення АД для переходу на режим динамічного гальмування

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 магніторушійної сили статора, опору ротора і кутової швидкості двигуна. Механічні характеристики для цього режиму приведені в нижній частині квадранта II (рис. 11.12). 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. 11.12 характеристики динамічного гальмування надані для трьох різних опорів кола ротора і тому ж самому струмі статора.

На практиці найчастіше застосовують гальмування противключенням, особливо коли потрібно здійснити зміну напрямку обертання (реверс) або динамічне гальмування.

### ***Контрольні запитання з теми 11***

1. Як виконують обмотку ротора короткозамкненого двигуна?
2. Поясніть будову обмотки ротора двигуна з контактними кільцями.
3. Як створюється обертовий момент АД, чому ротор не може постійно досягти синхронної швидкості обертання?
4. Як визначають ковзання й швидкість обертання ротора і як впливає на АД зміна навантаження на валу?
5. Що розуміють під механічною характеристикою двигуна і який вигляд механічної характеристики АД?
6. Поясніть роль ЕРС статора. Як записується рівняння напруг статора?
7. Запишіть рівняння напруг ротора. Як залежить від ковзання струм ротора і його фаза?
8. На підставі яких рівнянь будується повна векторна діаграма й схема заміщення асинхронного двигуна? Як будується векторна діаграма?
9. Які види втрат потужності мають місце в АД? Що розуміють під електромагнітною й механічною потужністю двигуна?
10. Проаналізуйте залежність обертового моменту від ковзання.
11. Що розуміють під коефіцієнтом перевантажувальної здатності і яка його величина для звичайних АД?
12. Поясніть умову усталеної роботи двигуна.
13. Від чого і як залежить критичний момент і критичне ковзання?
14. Позитивні якості й недоліки прямого пуску асинхронних короткозамкнених двигунів.
15. Як пускають в хід двигуни з контактними кільцями? Дайте загальну оцінку їхніх пускових властивостей.
16. Які можливі способи гальмування асинхронного двигуна? Дайте їхню оцінку й поясніть практичне значення.

## **ЗМ 3. ОСНОВИ ЕЛЕКТРОНІКИ, ЕЛЕКТРОПРИВОД ТА ЕЛЕКТРООБЛАДНАННЯ ДЛЯ БУДІВНИЦТВА**

Промислова електроніка являє собою галузь науки і техніки, що займається вивченням будови й роботи електронних приладів і їхнього застосування у промисловості. Електронні прилади використовуються в автоматичній, телемеханіці, 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.

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.

### **ТЕМА 13 ОСНОВИ ПРОМИСЛОВОЇ ЕЛЕКТРОНІКИ**

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  $I_{\text{пр}}$ , обмежений практично тільки опором навантаження  $R_{\text{н}}$ . Зовнішня напруга  $U_{\text{пр}}$  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  $U_{\text{звор}}$  або замикаючою, а обумовлений нею невеликий струм - зворотним струмом  $I_{\text{звор}}$ .

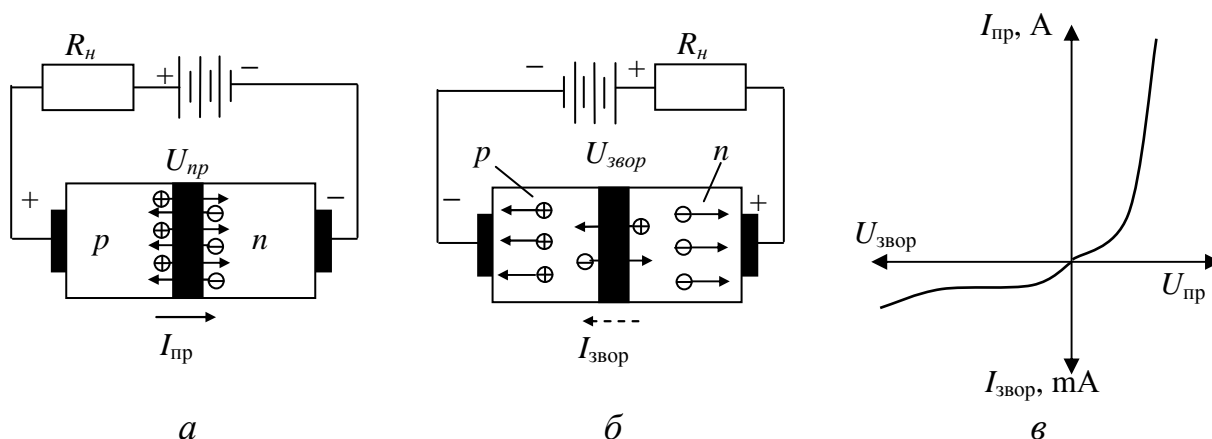


Рис. 13.1 - Проходження струму через  $p$ - $n$  перехід напівпровідникового діода:  
 а - відкритий (провідний) стан; б - закритий (непровідний) стан;  
 в - вольт-амперна характеристика

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.** 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).

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 вентилля різко зменшується, а прямий струм  $I_{пр}$  зростає до значень, обумовлених опором навантаження.

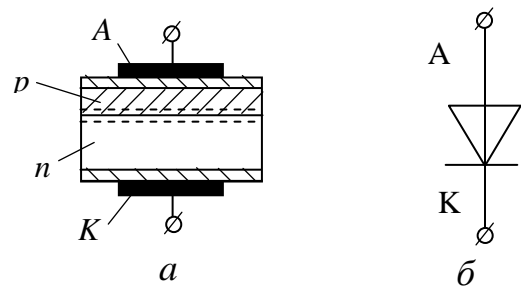


Рис. 13.2 - Кремнієвий діод: а - будова, б - умовне позначення

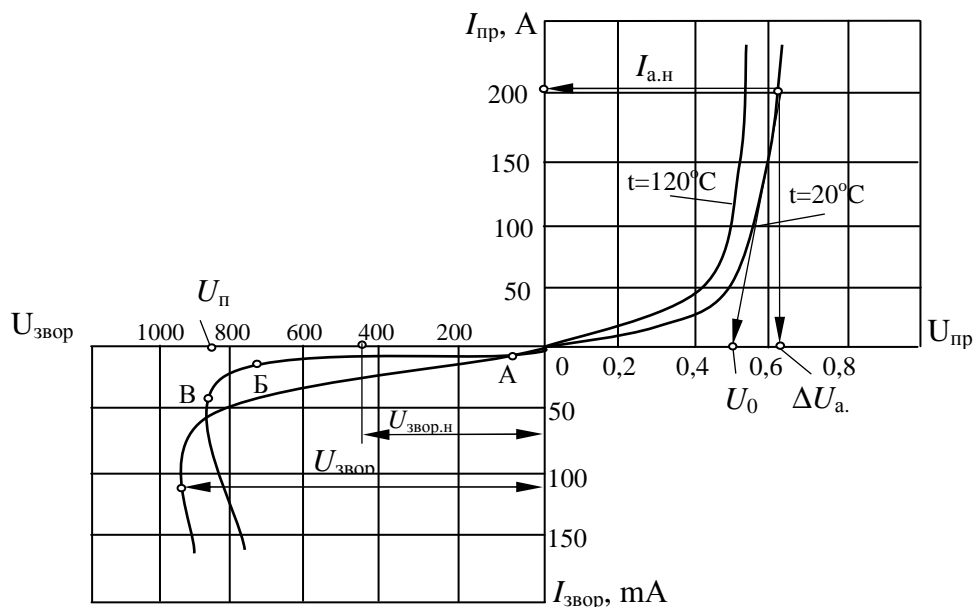


Рис. 13.3 - Статичні ВАХ при різних температурах  $p$ - $n$  переходу

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 знач-

ному збільшенні зворотної напруги струм  $I_{\text{звор}}$  досягає насичення і зростає незначно; третя ділянка  $BB$  характерна тим, що при певних значеннях зворотної напруги струм  $I_{\text{звор}}$  різко зростає і настає пробій  $p$ - $n$  переходу. Величина напруги  $U_{\text{п}}$ , при якій зворотна гілка різко вигибається, називається пробивною напругою.

Для нормальної роботи вентиля припустиму (номінальну) зворотну напругу  $U_{\text{звор.н}}$  беруть удвічі меншою порівняно з пробивною напругою  $U_{\text{п}}$ .

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** припускають значно менші щільності прямого струму 50-60 мА/см<sup>2</sup> і менші значення зворотної напруги 40÷50 В, ніж германієві і кремнієві, що допускають щільності прямого струму 40÷80 А/см<sup>2</sup> і значення зворотної напруги 400÷1200 В.

Для підвищення значення  $U_{\text{звор.доп}}$  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  $П1$  -  $П2$  -  $П3$ , 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 тер-



мічні 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.

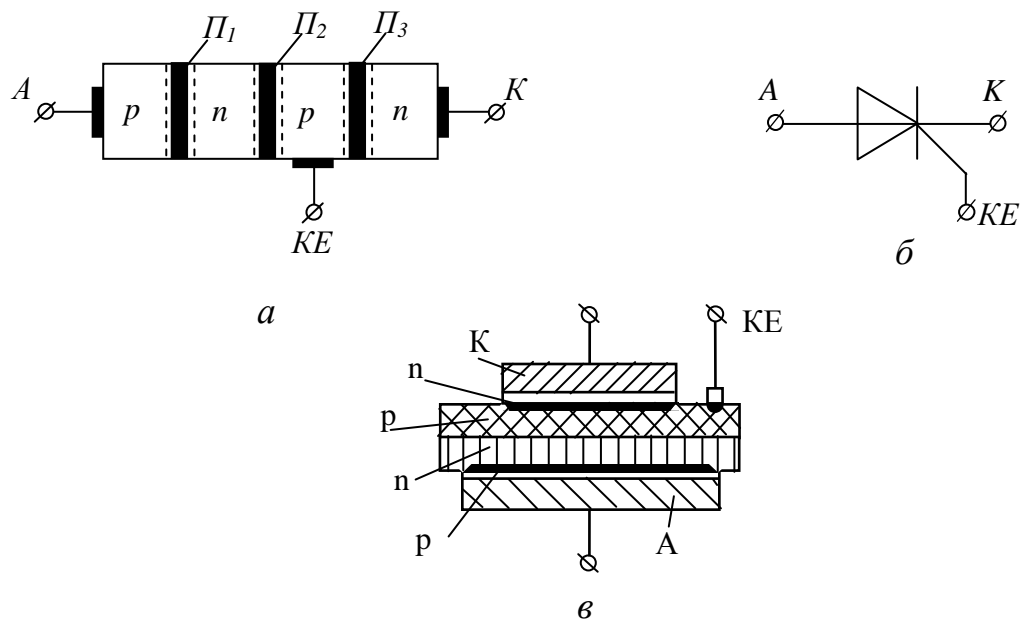


Рис. 13.4 - Керований кремнієвий діод – тиристор:  
 а - схема чотиришарової структури; б - умовна позначка;  
 в - будова тиристора (схематична)

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,

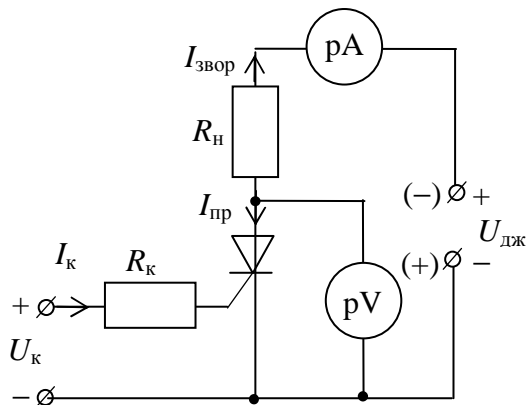


Рис.13.5 - Схема для зняття характеристик тиристора

і напругою між анодом і катодом відбиває статична ВАХ (рис. 13.6). Якщо коло керуючого електрода тиристора не підключене до джерела  $U_k$ , а напруга між анодом і катодом не перевищує припустимого значення напруги перемикання  $U_{пер}$ , то незалежно від полярності прикладеної напруги  $U_{дж}$  між анодом і катодом струм практично не протікає.

Дійсно, якщо на анод тиристора подається негативний потенціал, а на

катод - позитивний, то до середнього переходу  $\Pi_2$  (рис. 13.5) буде прикладена пряма напруга  $U_{пр}$ , а до переходів  $\Pi_1$  і  $\Pi_3$ , що з'єднані послідовно, зворотна напруга  $U_{пер}$ . 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  $\Pi_2$  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  $U_{\text{пер}}$  (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;

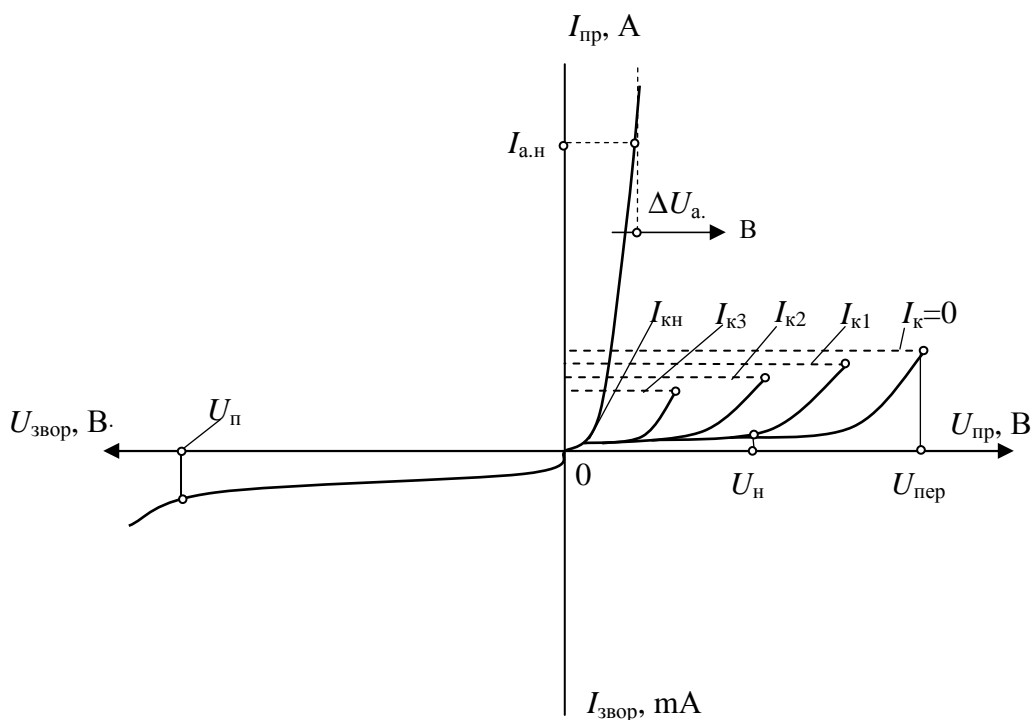


Рис.13.6 - Статичні ВАХ тиристора

2) подачею на керуючий електрод позитивного імпульсу напруги  $U_k$  при прямій напрузі на аноді тиристора. Під дією  $U_k$  через перехід  $\Pi_3$  буде проходити невеликий струм  $I_k$ , що нейтралізує дію закритого переходу  $\Pi_2$ , і тиристор відкривається при меншому значенні  $U_{\text{пер}}$ . У напрямку від анода до катода тиристора буде проходити прямий струм  $I_{\text{пр}}$ , 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  $U_{\text{пер}}$  тиристора і відкритому стану приладу відповідає ВАХ звичайного некерованого діода. Якщо змінити полярність напруги, прикладеної між анодом і катодом тиристора, то раніше відкритий перехід  $\Pi_2$  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) і 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).

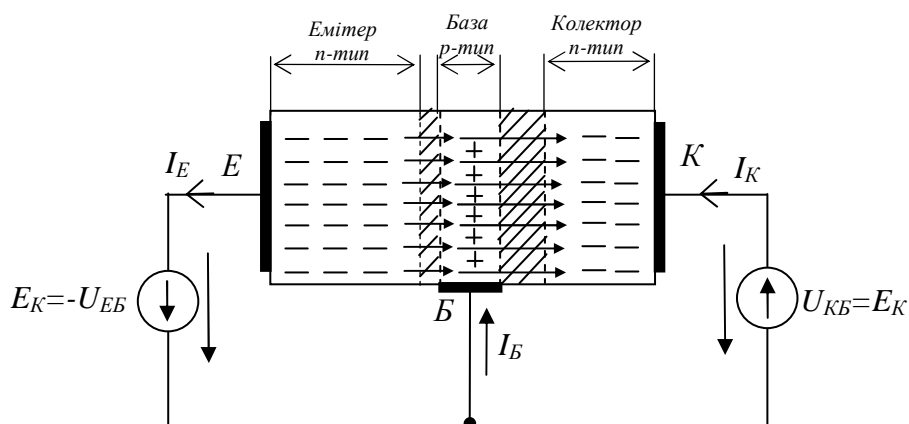


Рис.13.7 - Біполярний транзистор типу  $n$ - $p$ - $n$

Середній шар транзистора називається **базою**  $B$ , один крайній шар - **колектором**  $K$ , а інший крайній шар - **емітером**  $E$ . Кожний шар має вивід, за допомогою якого транзистор включається до кола.

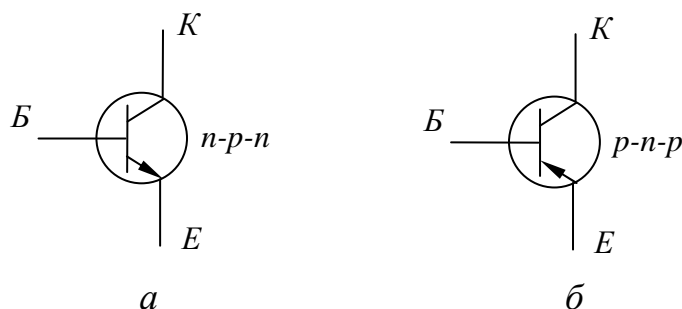


Рис.13.8 - Позначення транзисторів: а - типу  $n$ - $p$ - $n$ ; б - типу  $p$ - $n$ - $p$

Можливі три варіанти схеми включення транзистора (табл. 13.1): з загальним емітером (ЗЕ), з загальною базою (ЗБ) і з загальним колектором (ЗК).

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

з загальним емітером	з загальною базою	з загальним 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  $U_{KB} > 0$  залежить мало. Незначна частина вільних електронів, інжектованих 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 з ЗЕ, за допомогою якої здійснюють посилення за струмом, напругою, потужністю. Для цієї схеми коефіцієнти підсилення визначаються з виразів:

$$\text{за струмом} \quad k_i = \frac{i_{\text{вих}}}{i_{\text{вх}}} = \frac{i_K}{i_B} = \frac{\alpha}{1 - \alpha} = \beta > 1; \quad (13.2)$$

$$\text{за напругою} \quad k_u = \frac{u_{\text{вих}}}{u_{\text{вх}}} = \frac{i_{\kappa} \cdot R_{\text{н}}}{i_{\text{б}} \cdot R_{\text{вх}}} = \alpha \frac{R_{\text{н}}}{R_{\text{еб}}} > 1; \quad (13.3)$$

$$\text{за потужністю} \quad k_p = k_i \cdot k_u = \frac{\alpha^2}{1 - \alpha} \cdot \frac{R_{\text{н}}}{R_{\text{еб}}} > 1; \quad (13.4)$$

де  $R_{\text{еб}}$  - опір переходу емітер-база;  $\beta = \frac{\alpha}{1 - \alpha}$ .

При цьому вихідна напруга  $u_{\text{вих}}$  перебуває у протифазі з вхідною  $u_{\text{вх}}$ .

Для схеми транзистора з ЗБ коефіцієнти підсилення за струмом, напругою і потужністю знаходять з виразів

$$k_i = \frac{i_{\text{вих}}}{i_{\text{вх}}} = \frac{i_{\kappa}}{i_{\text{б}}} = \alpha < 1; \quad (13.5)$$

$$k_u = \frac{u_{\text{вих}}}{u_{\text{вх}}} = \frac{i_{\kappa} \cdot R_{\text{н}}}{i_{\text{б}} \cdot R_{\text{вх}}} = \alpha \frac{R_{\text{н}}}{R_{\text{еб}}} > 1; \quad (13.6)$$

$$k_p = k_i \cdot k_u = \alpha^2 \cdot \frac{R_{\text{н}}}{R_{\text{еб}}} > 1. \quad (13.7)$$

Включення транзистора за схемою із ЗБ 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 з ЗК коефіцієнти підсилення за струмом, напругою й потужністю знаходять з виразів:

$$k_i = \frac{i_{\text{вих}}}{i_{\text{вх}}} = \frac{i_{\text{е}}}{i_{\text{б}}} = \frac{i_{\kappa} + i_{\text{б}}}{i_{\text{б}}} = \beta + 1 = \frac{1}{1 - \alpha} > 1; \quad (13.8)$$

$$k_u = \frac{u_{\text{вих}}}{u_{\text{вх}}} = \frac{u_{\text{вих}}}{u_{\text{вих}} + u_{\text{еб}}} = \frac{i_{\text{е}} \cdot R_{\text{н}}}{i_{\text{е}} (R_{\text{н}} + R_{\text{еб}})} = \frac{R_{\text{н}}}{R_{\text{н}} + R_{\text{еб}}} \leq 1; \quad (13.9)$$

$$k_p = k_i \cdot k_u \cong k_i = \beta + 1 = \frac{1}{1 - \alpha} > 1. \quad (13.10)$$

Вихідна напруга для схеми з ЗК 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 з ЗЕ.

Під вхідною характеристикою транзистора розуміють залежність вхідного струму від вхідної напруги при постійній вихідній напрузі. Для схеми з ЗЕ це  $I_{\text{б}}(U_{\text{б}})$  при  $U_{\kappa} = \text{const}$ .

Під вихідною характеристикою розуміють залежність вихідного струму від вихідної напруги при постійному входньому струмі. Для схеми з ЗЕ це  $I_k(U_k)$  при  $I_6 = \text{const}$ .

Статичні характеристики біполярного транзистора показані на рис. 13.9. Область робочих режимів транзистора на його характеристиках обмежена максимально допустимими значеннями струму  $I_{k.\text{max}}$ , напруги  $U_{ke.\text{max}}$  і потужності розсіювання  $P_{\text{роз.}\text{max}} \approx U_{ke} \cdot I_k$ , а також нелінійними викривленнями при малих значеннях струму колектора.

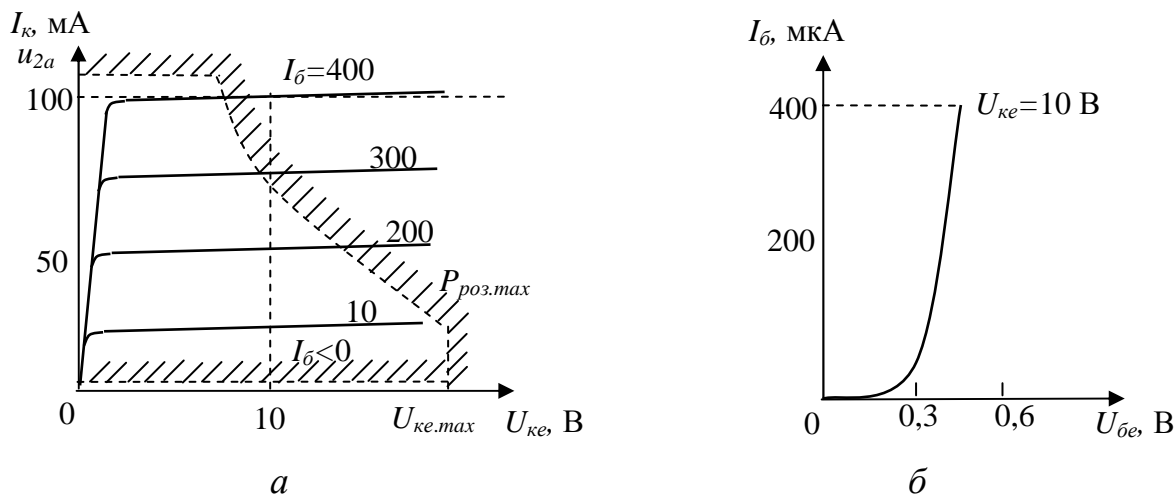


Рис.13.9 - Статичні характеристики транзистора в схемі з ЗЕ:  
а - вихідна характеристика; б - входна характеристика

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 входного кола при включенні за схемою з ЗЕ (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  $U_{\text{звор}}$ .

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 струму

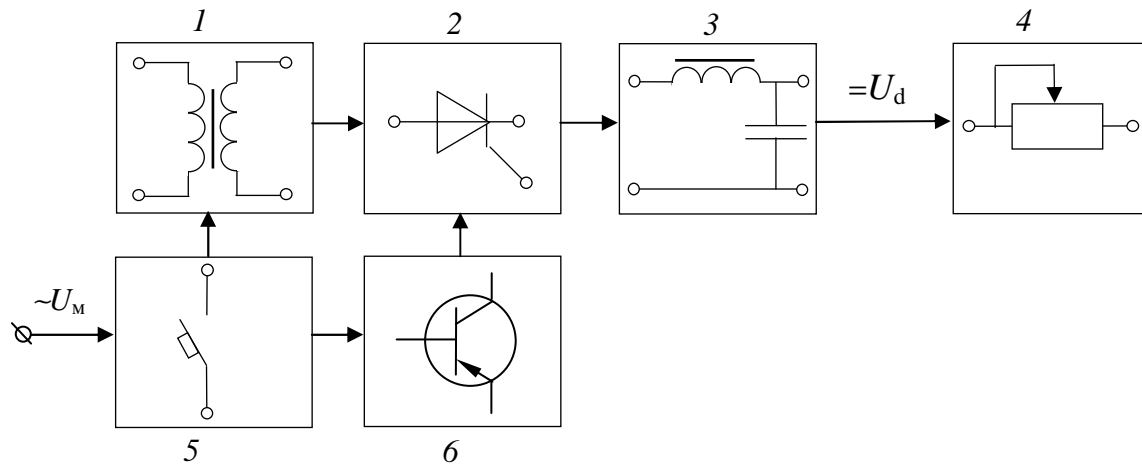


Рис.13.10 - Структурна схема випрямляча

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.

**13.2.1. Випрямлячі однофазного струму.** Розглянемо схему *однонапівперіодного 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.

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  $U_d$  і  $I_d$  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 однонапівперіодної 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:

$$I_a = I_d = U_{d0}/R_d . \quad (13.13)$$

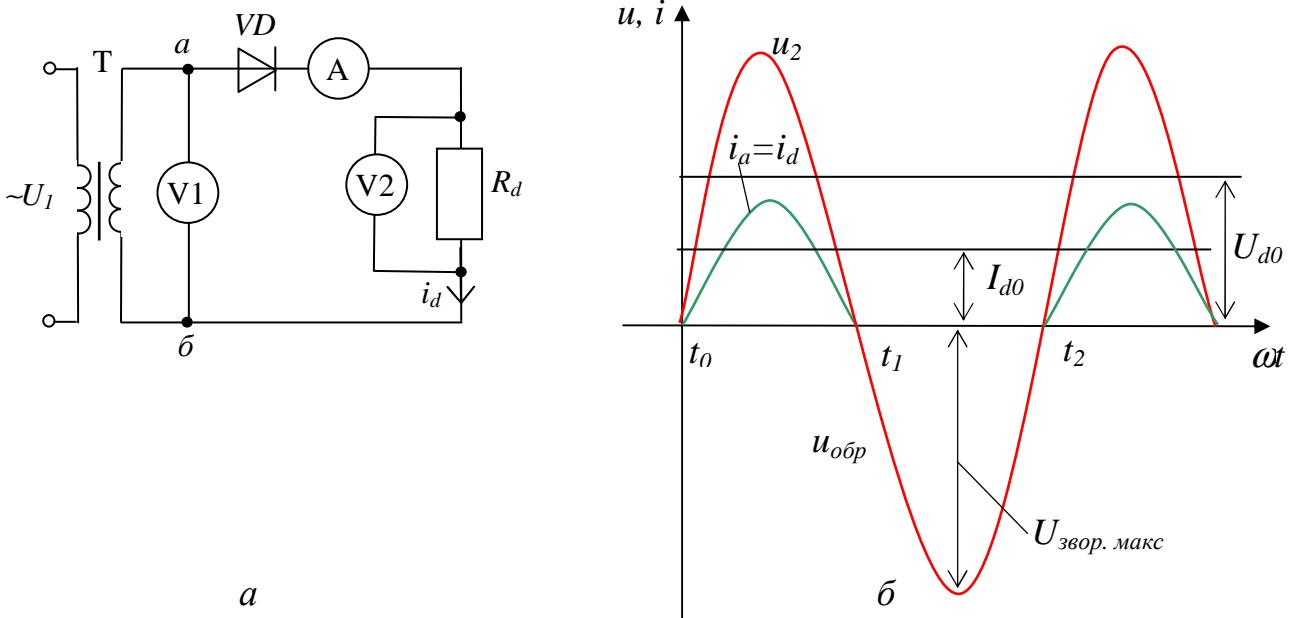


Рис.13.11 - Однонапівперіодний однофазний випрямляч:

$a$  - схема;  $б$  - діаграми напруг і струмів

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 раза більша за потужність у навантаженні  $R_d$ :

$$S_{тр} = 3,09 U_d \cdot I_d . \quad (13.14)$$

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 (13.15) випливає, що показання амперметра електромагнітної системи  $A$ , який включений до кола вторинної обмотки трансформатора  $T$  (рис. 13.11,а), будуть в 1,57 раза перевищувати показання магнітоелектричного амперметра  $A$ , 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  $k_{тр} = w_1/w_2$

$$I_1 = 1,51 \frac{1}{k_{тр}} I_d. \quad (13.17)$$

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  $k_{тр}$  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).

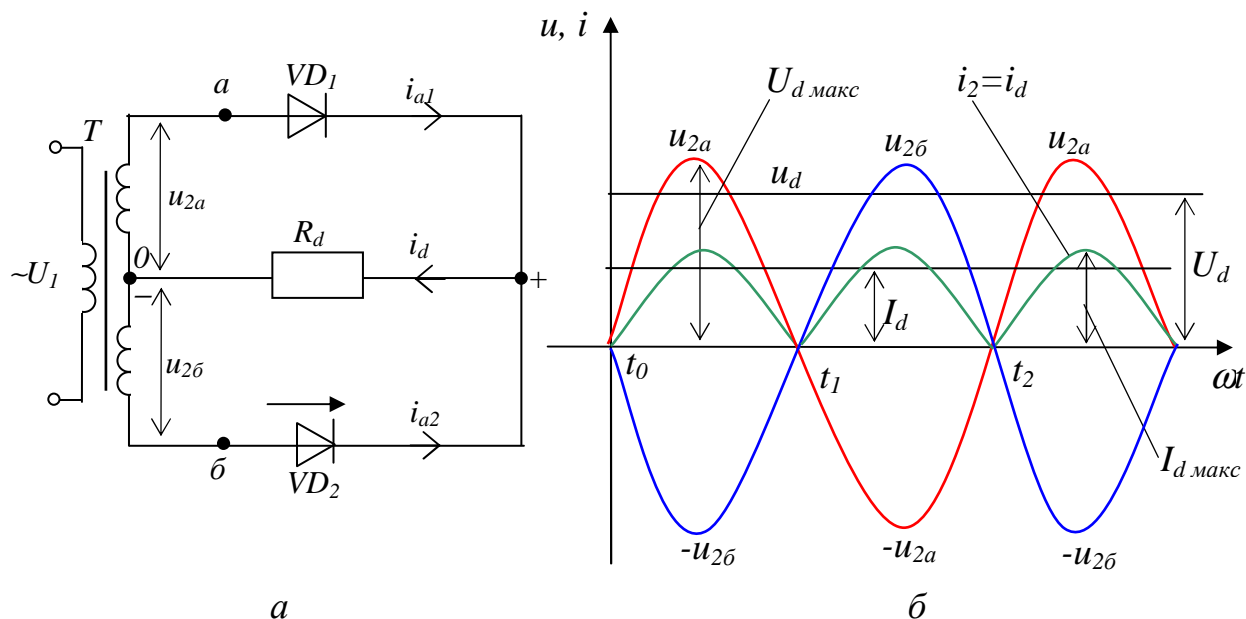


Рис.13.12 - Двонапівперіодний однофазний випрямляч:  
а - схема; б - діаграми напруг і струмів

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. Для даної схеми справедливі наступні співвідношення між напругами, струмами і потужностями в окремих елементах випрямляча.

Середнє значення випрямленої напруги

$$U_{d0} = 0,9 \cdot U_2. \quad (13.18)$$

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

$$U_{звор. \max} = 2\sqrt{2} \cdot U_2 = 3,12 \cdot U_{d0} . \quad (13.19)$$

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  $I_d$ , що проходить через навантаження, тобто  $I_a = 0,5 \cdot I_d$ .

Діюче значення струму діода  $I_{a, \text{діюч}}$  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 Т 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.

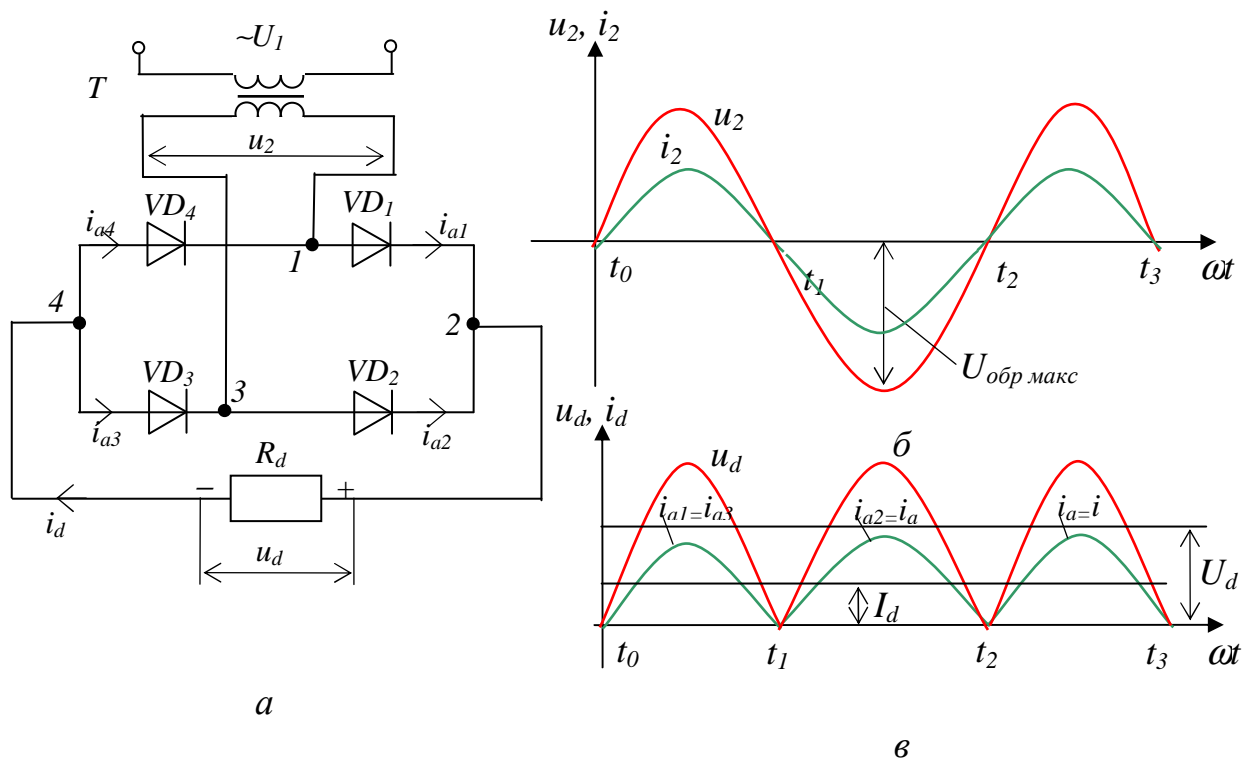


Рис.13.13 - Однофазний мостовий випрямляч: а - схема; б і в - діаграми напруг і струмів на елементах схеми

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:

- 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  $VD_6$ ), 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. В анодній групі в дану частину періоду пра-

цює той діод, катод якого має найбільш негативний потенціал стосовно загальної точки анодів.

Діоди катодної групи відкриваються в момент перетинання позитивних ділянок синусоїд, а діоди анодної групи - в момент перетинання негативних ділянок синусоїд. Кожний з діодів працює протягом однієї третини періоду.

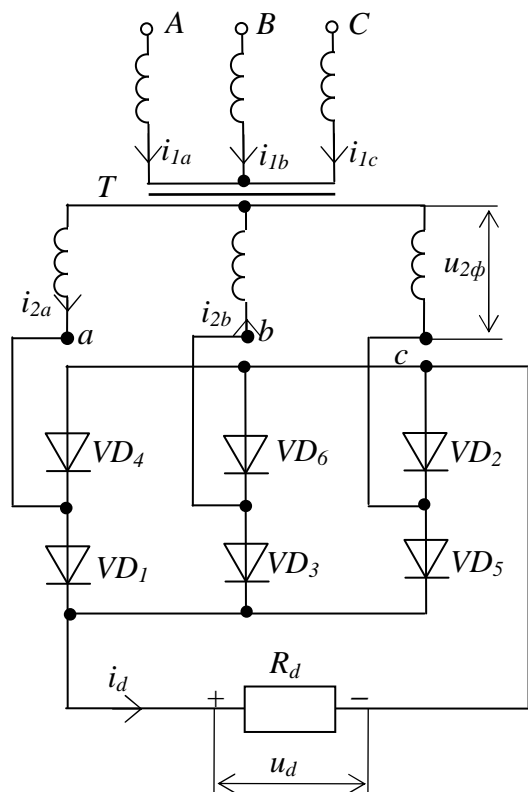


Рис. 13.14 - Трифазна мостова схема випрямляча

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. 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. Частота пульсацій кривої  $u_d$  дорівнює  $6f_1$ , коефіцієнт пульсацій напруги на виході випрямляча дорівнює:

$$q = \frac{U_{\max}}{U_{d0}} = \frac{2}{m^2 - 1} = \frac{2}{6^2 - 1} = 0,057. (13.28)$$

Зворотна напруга на закритому діоді визначається різницею потенціалів

його катода й анода. 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  $u_d$ . 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	$U_{d0}/U_{2\phi}$	$U_{\text{звор.макс}}/U_{d0}$	$I_d/I_d$	$I_{\text{а.діюч}}/I_d$	$I_2/I_d$	$S_{\text{тр}}/P_d$	Коефіцієнт пульсацій, %
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  $I_{\text{а.діюч}}$ ,  $I_2$ ,  $S_{\text{тр}}$  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  $U_d$ , пропорційне напрузі  $U_{2\phi}$ . Тому регулювання  $U_d$  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. Аноди тиристорів  $VS_1$  і  $VS_2$  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  $u_{2b}$  джерела живлення.

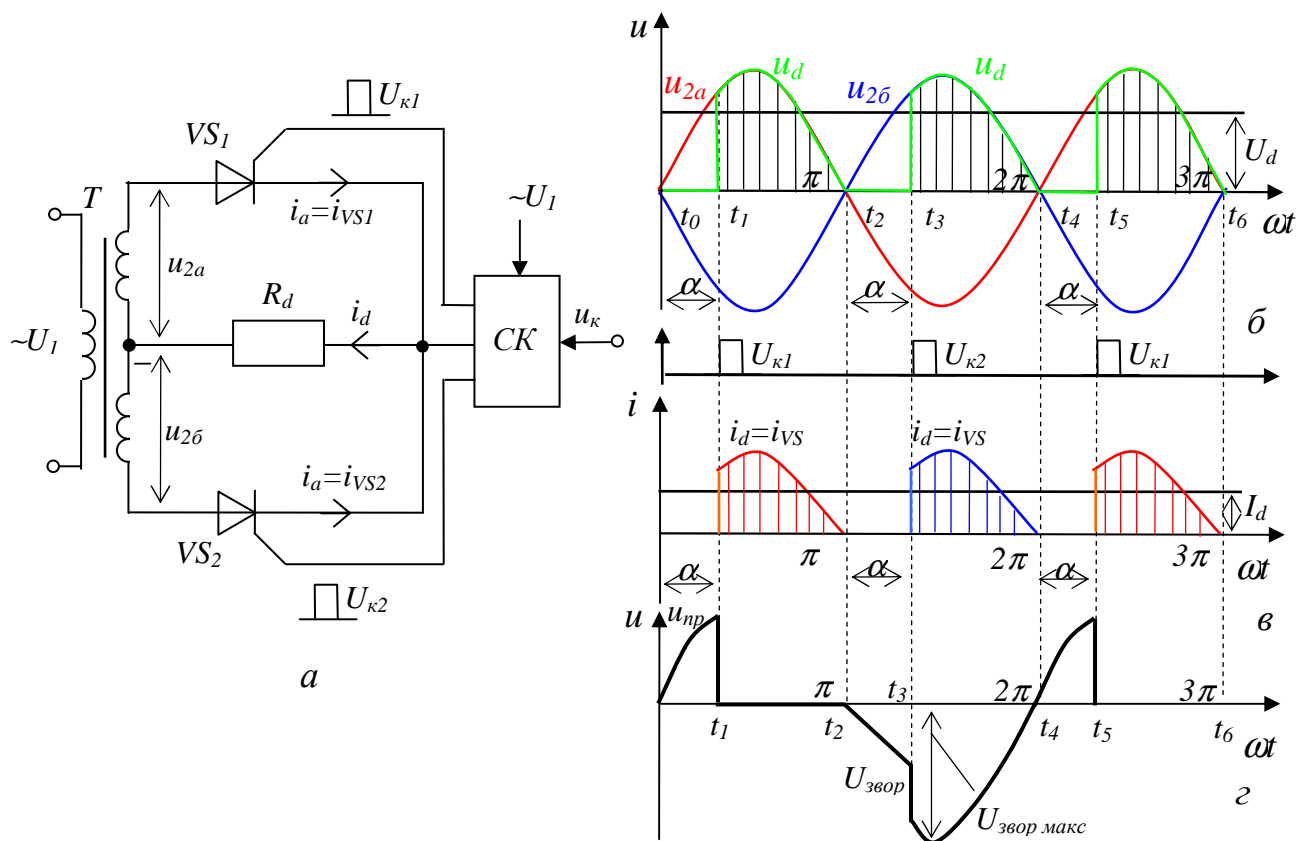


Рис.13.15 - Однофазний керований двонапівперіодний випрямляч:  
а - схема; б - г - діаграми напруг і струмів в елементах

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 результа-

ті чого в інтервалі  $t_0 - t_1$  напруга на навантаженні  $R_d$  буде дорівнювати нулю, тому що обидва тиристори  $VS_1$  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  $\alpha$ . У момент відкриття тиристора  $VS_1$  напруга  $u_d$  на навантаженні  $R_d$  стрибком 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  $\alpha$ , знову вступить у роботу тиристор  $VS_1$  і т.д.

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.

Коли змінювати кут  $\alpha$ , то будуть змінюватися час роботи тиристорів і відповідно величина випрямленої напруги, середнє значення якої визначають за 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  $\alpha$  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  $\alpha = 0$ .

**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) керуючі імпульси подаються з деяким зсувом у часі стосовно моменту природного відкриття діодів у некерованій схемі.

Зміна фази (зсув) керуючих імпульсів у бік збільшення або зменшення кута керування  $\alpha$  викликає відповідне зменшення або збільшення імпульсів напруги  $u_d$ . При куті  $\alpha = 0$  крива випрямленої напруги матиме таку ж форму, як у некерованому випрямлячі. Крива струму  $i_d$  за своєю формою буде повторювати

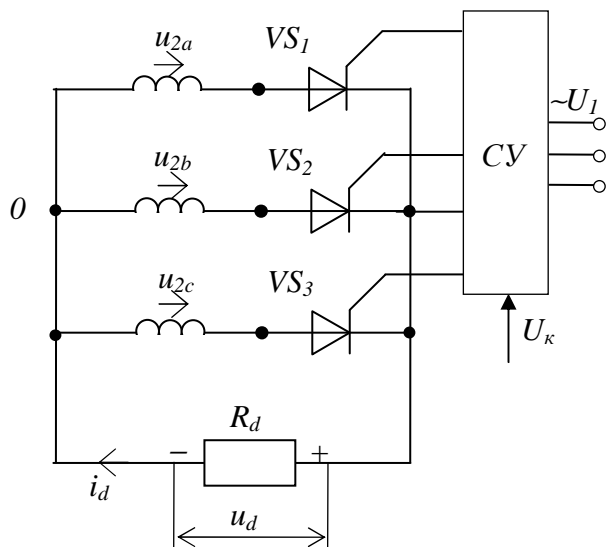


Рис.13.16 - Трифазний керований тиристорний випрямляч з нульовою точкою

криву випрямленої напруги  $u_d$  при роботі випрямляча на активне навантаження. В керованого випрямляча є дві характерні області роботи. Перша відповідає зміні кута регулювання в межах  $0 < \alpha < 30^\circ$ , при цьому випрямлений струм буде безперервним, 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 працюючий тиристор закривається, але на черговий тиристор, що вступає до роботи, відмикаючий імпульс ще не поданий, і в кривій випрямленої напруги виникають паузи (нульові ділянки), протягом яких струм  $i_d = 0$ , тобто має місце режим переривчастих струмів.

Для трифазної нульової схеми при роботі на активне навантаження граничним кутом регулювання, при якому  $U_d = 0$ , є кут  $\alpha_{\text{макс}} = 150^\circ$ . Напруга на тиристорі визначається різницею потенціалів анода і загальної точки катодів, потенціал якої змінюється за кривою напруги  $u_d$ .

**У трифазній мостовій схемі з тиристорами** (рис. 13.17), так само як і з некерованими діодами, одночасно працюють два тиристори: 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 тиристори непарної групи подаються з випередженням на  $180^\circ$  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.

Доки кут регулювання  $\alpha \ll 60^\circ$ , криві випрямленої напруги, а отже, і криві випрямленого струму при активному навантаженні безперервні. Для цього режиму ( $0 \ll \alpha \ll 60^\circ$ ) середнє значення випрямленої напруги визначається виразом (13.29). 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.

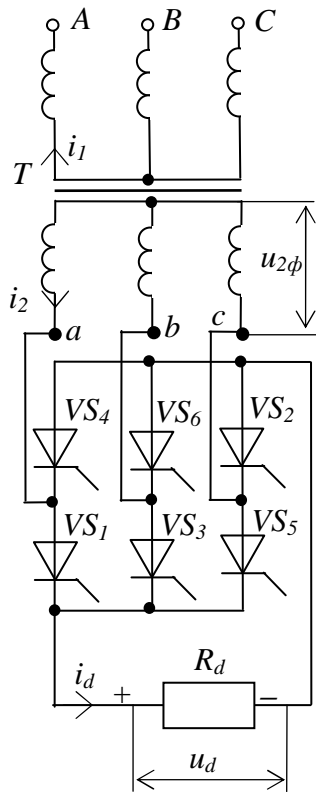


Рис.13.17 - Трифазна мостова схема

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 подають імпульси шириною більшою за  $60^\circ$ , або два вузьких імпульси з інтервалом між ними у  $60^\circ$ .

Схема керування випрямлячем повинна бути побудована так, щоб при подачі відмикаючого імпульсу на тиристор одного плеча мосту, що вступає до роботи, одночасно здійснювалася б подача імпульсу на керуючий електрод тиристора відстаючої фази протилежного плеча мосту. Наприклад, при роботі випрямляча з  $\alpha = 90^\circ$  для того щоб відкрити тиристор  $VS_1$  у момент  $t_1$  необхідно одночасно подати відмикаючий імпульс і на тиристор  $VS_2$ , після чого обидва вентиля 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. Середні значення випрямленої напруги, коли

струм  $i_d$  є переривчастим ( $\alpha > 60^\circ$ ), визначають виразом

$$U_d = U_{d0} [1 + \cos(60^\circ + \alpha)]. \quad (13.30)$$

З формули (13.30) 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. Згладжуючі фільтри

Наявність пульсацій випрямленої напруги погіршує роботу споживачів, що живляться від випрямлячів. Для зменшення пульсації напруги на виході випрямляча встановлюють спеціальний пристрій, називаний **згладжуючим фільтром**. Схема включення фільтра  $\Phi$  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  $s$** :



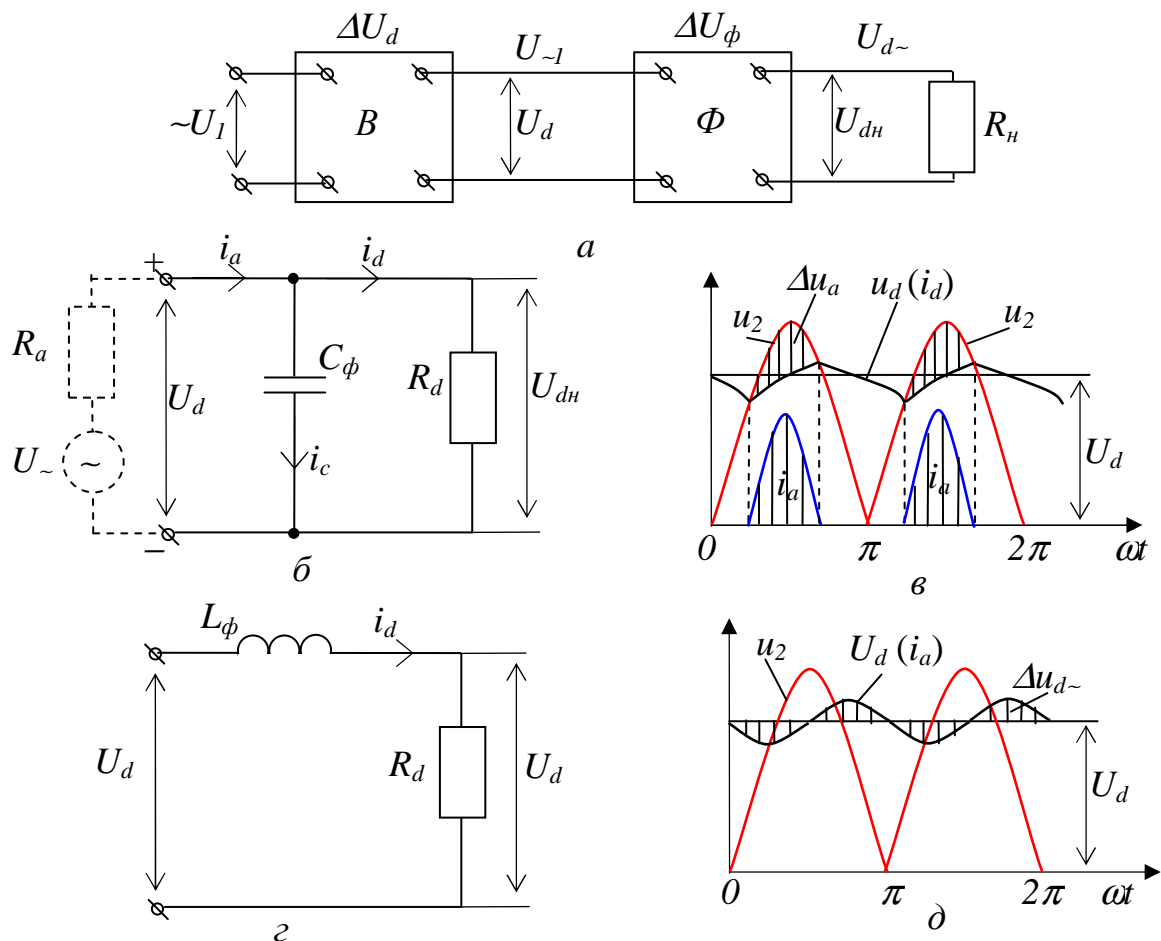


Рис. 13.20 - Схеми включення фільтрів: а - блок-схема випрямляча з фільтром; б - ємнісний фільтр; в - індуктивний фільтр; г і д - криві напруг і струмів

$$s = \frac{q}{q_1} = \frac{U_{\sim 1}}{U_d} \cdot \frac{U_{d\sim}}{U_{dH}}. \quad (13.31)$$

Поряд з ослабленням змінної складової випрямленої напруги згладжуючий фільтр зменшує і постійну складову ( $U_{dH} = U_d - \Delta U_\phi$ ). Очевидно, чим меншим є зменшення постійної складової ( $U_d/U_{dH}$ ) при незмінному ослабленні змінної ( $U_{d\sim}/U_{\sim 1}$ ), тим якісніше буде фільтр. Для фільтрів випрямлячів малої потужності відношення постійних складових напруг звичайно  $U_d/U_{dH} = 1,05 \div 1,1$ , а для випрямлячів великої потужності  $U_d/U_{dH} = 1,005 \div 1,01$ .

У практичних розрахунках можна вважати  $U_d \approx U_{dH}$  і коефіцієнт згладжування, що показує в цьому випадку ступінь ослаблення змінної складової випрямленої напруги фільтром, приймати рівним  $s = q/q_1 \approx U_{\sim 1}/U_{d\sim}$ .

Розглянемо основні види згладжуючих фільтрів.

**Ємнісний фільтр** (рис. 13.20,б) являє собою конденсатор  $C_\phi$ , що включається паралельно навантажувальному опору  $R_d$ . Шунтуючі 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  $\Delta U_a$  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.

При розрахунку ємнісного фільтра вихідним звичайно є значення коефіцієнта пульсацій  $q_1$ , а також кутової частоти  $\omega_c = 2\pi f_1$  джерела живлення й опору навантаження  $R_d$ . Значення  $C_\phi$  (у мкф) можна визначити з виразу:

$$C_\phi = \frac{1}{m \cdot \omega_c \cdot q_1} \frac{10^6}{R_d}. \quad (13.32)$$

**Індуктивний фільтр** (рис. 13.20,з) являє собою дросель  $L_\phi$ , що включається послідовно з навантаженням і має великий реактивний опір  $X_L = \omega_c \cdot L_\phi$  для змінної складової випрямленого струму, яка значно зменшується, і падіння напруги  $\Delta U_d$  від цієї складової на  $R_d$  стає незначним (рис. 13.20,д).

Для гарного згладжування напруги на навантаженні необхідно, щоб

$$X_L = \omega_1 \cdot L_\phi \gg R_d. \quad (13.33)$$

При заданому коефіцієнті згладжування  $s$  необхідне значення індуктивності фільтра  $L_\phi$  (у генрі) з урахуванням виконання умови (13.33) визначають за виразом

$$L_\phi = \frac{s \cdot R_d}{2\pi \cdot f_c \cdot m}, \quad (13.34)$$

де  $f_c$  - частота напруги мережі, Гц;  $m$  - число фаз випрямлення.

Аналіз формули (13.34) показує, що те саме значення коефіцієнта  $s$  може бути отримане при менших значеннях індуктивності  $L_\phi$  і меншому опорі навантаження  $R_d$ . Таким чином, **індуктивний фільтр вигідно застосовувати у випрямлячах середньої і великої потужності, в яких опір навантаження малий.**

### 13.4. Підсилювачі

**Підсилювачами** називаються **пристрої, призначені для збільшення значень параметрів електричних сигналів за рахунок енергії джерела живлення**. Підсилювачі застосовують переважно для 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. Це відбувається, 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).

Підсилювальна техніка заснована на широкому використанні підсилювачів на інтегральних мікросхемах, які дозволяють застосовувати їх для реалізації різних функціональних вузлів систем автоматики, керування і вимірів.

Відповідно до трьох схем включення транзисторів: з загальним емітером, загальною базою і загальним колектором застосовують три схеми транзисторних підсилювачів.

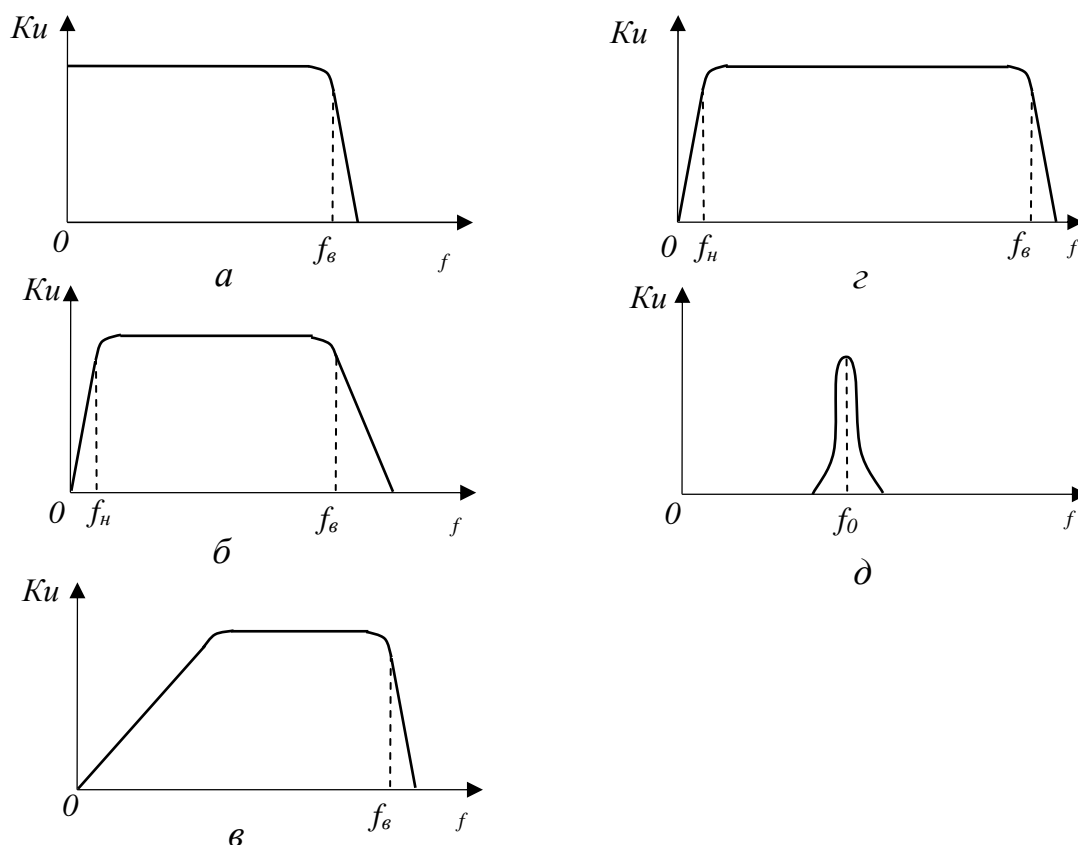


Рис.13.21 - Амплітудно-частотні характеристики підсилювачів

Розглянемо принцип роботи типового підсилювального каскаду на біполярному транзисторі, що включений за схемою з загальним емітером (рис. 13.22). Джерело посилюваного сигналу (обведене штриховою лінією) має внутрішній опір  $R_{гн}$  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:

$$\dot{K} = \frac{\dot{U}_{\text{вих}} e^{j\psi_{\text{вих}}}}{\dot{U}_{\text{вх}} e^{j\psi_{\text{вх}}}} = K \cdot e^{j(\psi_{\text{вих}} - \psi_{\text{вх}})} = K \cdot e^{j\varphi}, \quad (13.35)$$

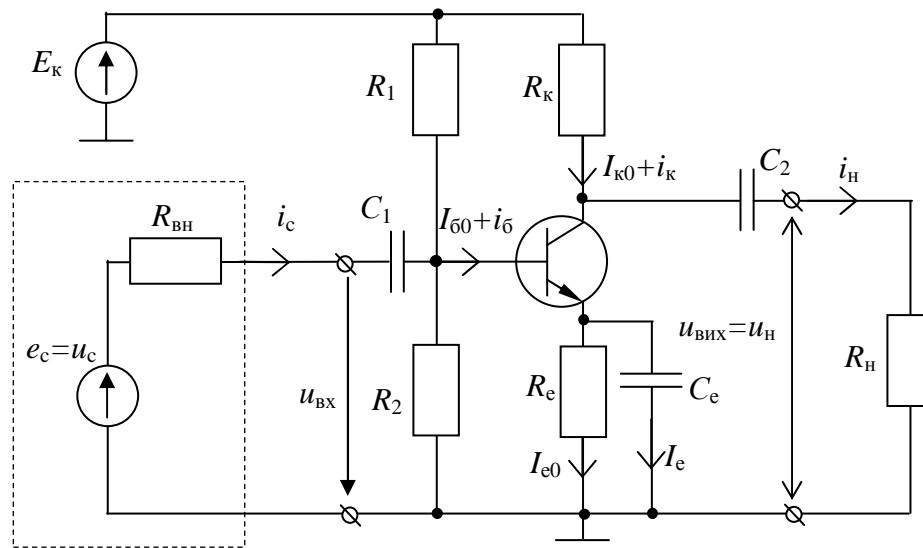


Рис. 13.22 - Схема підсилювального каскаду з загальним емітером

де  $K = \frac{U_{\text{вих}}}{U_{\text{вх}}}$  - модуль коефіцієнта підсилення підсилювача;  $\varphi = \psi_{\text{вих}} - \psi_{\text{вх}}$  - різниця фазових кутів сигналу на виході і вході підсилювача.

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.

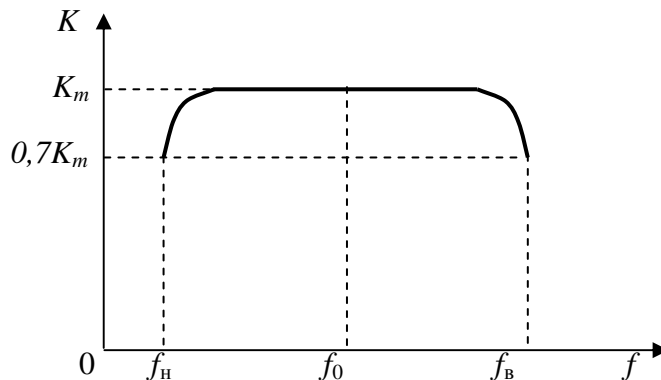


Рис. 13.23 - АЧХ підсилювача з ЗЕ

Для одержання великих значень коефіцієнтів підсилення на практиці застосовують багатокаскадні схеми.

### **Контрольні запитання з теми 13**

1. Поясніть явище однобічної 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.

### **ТЕМА 14**

### **ЗАГАЛЬНІ ВІДОМОСТІ ПРО ЕЛЕКТРОПРИВОД**

#### **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 переміщаються лінійно (лінійний двигун). Іншими словами, двигун повинен розвивати рухові зусилля: рушійний момент або рушійну механічну силу, які передаються робочому органу  $РО$ .

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  $РО$  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 яких 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.

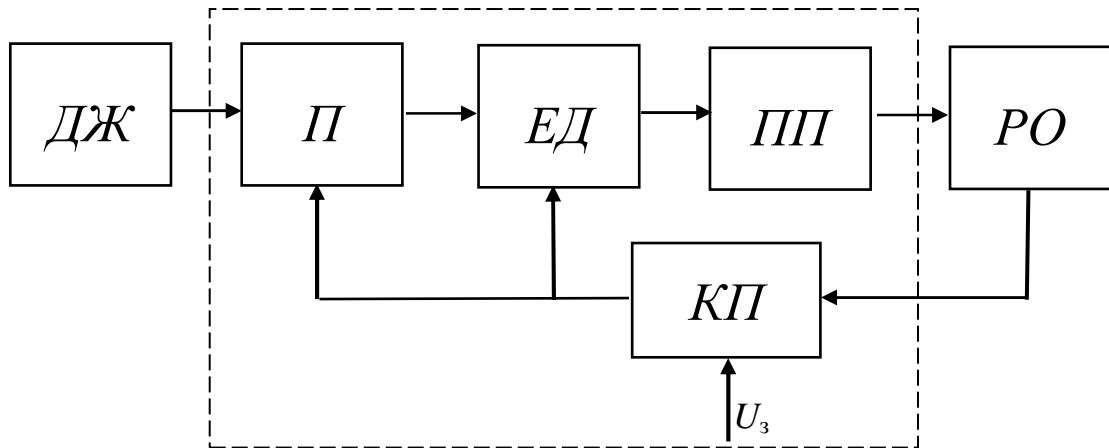


Рис.14.1 - Структурна схема електропривода

Керування ЕП здійснюється впливом на перетворювач і електричний двигун керуючих сигналів, що можуть формуватися з урахуванням задаючого сигналу  $U_3$  і сигналів, що надходять від інших елементів привода.

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 КП від інших елементів, називаються **зворотними зв'язками**.

За видами регулювання ЕП підрозділяють на класи.

**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 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 багатодвигуновий привод. **Груповим називається ЕП**, в якому один двигун надає руху за допомогою трансмісій або передач групі робочих машин або групі робочих органів однієї машини. **Одиночним називається ЕП**, в якому електродвигун надає руху тільки одному 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, 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 обертowego 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 обертovому русі або робочим зусиллям при поступальному русі. В кожному конкретному механізмі він має своє конструктивне виконання. Зокрема, на підйомному крані робочим органом є гак, грейфер 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, що пов'язані з тертям в підшипниках, напрямних, зачепленнях та ін. У результаті цього потік потужності, проходячи від джерела до споживача, поступово зменшується. 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:

$$\text{при обертовому русі} \quad W = \int_0^t M \omega dt, \quad (14.1)$$

$$\text{при поступальному русі} \quad W = \int_0^t F v dt, \quad (14.2)$$

де  $F$  - сила, Н;  $M$  - момент, Нм;  $\omega$  - кутова швидкість, рад/с;  $v$  - лінійна швидкість, м/с.

Механічна потужність визначається як похідна роботи за часом, тобто

$$\text{для обертового руху} \quad P = \frac{dW}{dt} = M \omega, \quad (14.3)$$

$$\text{для поступального руху} \quad P = F v. \quad (14.4)$$

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;  $\Delta P$  - потужність втрат у механічних ланках.

Якщо для механічної частини привода відомий ККД  $\eta$ , 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:



$$P_{po} = M_{po} \cdot \omega_{po}; \quad P_c = M_{op} \cdot \omega,$$

де  $\omega_{po}$  - кутова швидкість робочого органа;  $M_{po}$  - момент навантаження на робочому органі;  $\omega$  - кутова швидкість вала двигуна;  $M_{op}$  - момент опору на валу двигуна, називаний також статичним моментом.

Тоді

$$M_{op} \cdot \omega = M_{po} \cdot \omega_{po} / \eta,$$

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

$$M_{op} \cdot \omega = F_{po} \cdot v_{po} / \eta,$$

або

$$M_{on} = F_{po} \cdot \rho / \eta, \quad (14.9)$$

де  $\rho = v / \omega$  - радіус приведення зусилля навантаження до вала двигуна.

Величина  $M_{op}$ , обумовлена співвідношенням (14.9), **називається моментом опору** (або **статичним моментом**), приведеним до вала двигуна. Значення  $i_p$  і  $\rho$  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.*

### 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, ство-

рюваний силою вітру. Напрямок активного моменту не залежить від напрямку обертання. 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  $M_{on}$  від кутової швидкості вала двигуна  $\omega$ , які визначаються механічною характеристикою двигуна і механічною характеристикою робочого механізму, характер якої визначається винятково властивостями виробничого механізму.

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). Така характеристика належить, наприклад, підйомним кранам, лебідкам 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  $\omega$ , 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.

Нагадаємо, що 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 в різних двигунів різна і характеризується показником, що називають жорсткістю. Під **жорсткістю механічної характеристики електропривода** розуміють відношення різниці електромагнітних моментів, що розвиваються електродвигуновим пристроєм, до відповідної різниці кутових швидкостей електропривода. Тобто жорсткість  $\beta$  визначається співвідношенням

$$\beta = \frac{M_2 - M_1}{\omega_2 - \omega_1} = \frac{\Delta M}{\Delta \omega}. \quad (14.15)$$

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

$$\beta_c = \frac{\partial M_{оп}}{\partial \omega}. \quad (14.17)$$

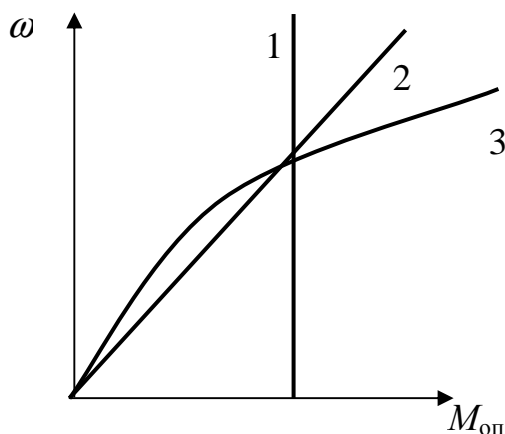


Рис. 14.2 - Механічні характеристики виробничих механізмів

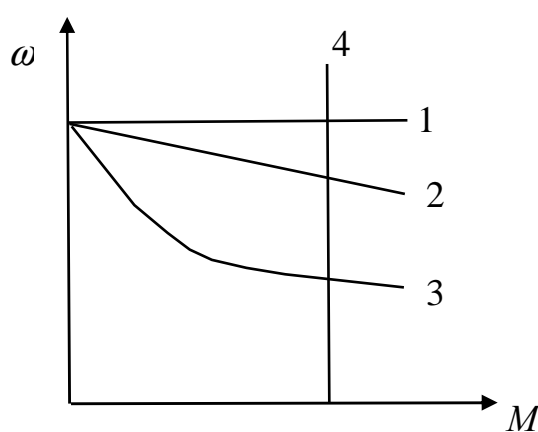


Рис. 14.3 - Механічні характеристики двигунів

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  $(M, \omega)$ , 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  $\omega$ , 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  $\omega$  у точці з частотою обертання  $\omega'$ , 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  $M'_{\text{дв}}$ , що розвивається електродвигуном, і  $M'_{\text{вм}}$  виробничого механізму в цьому режимі.

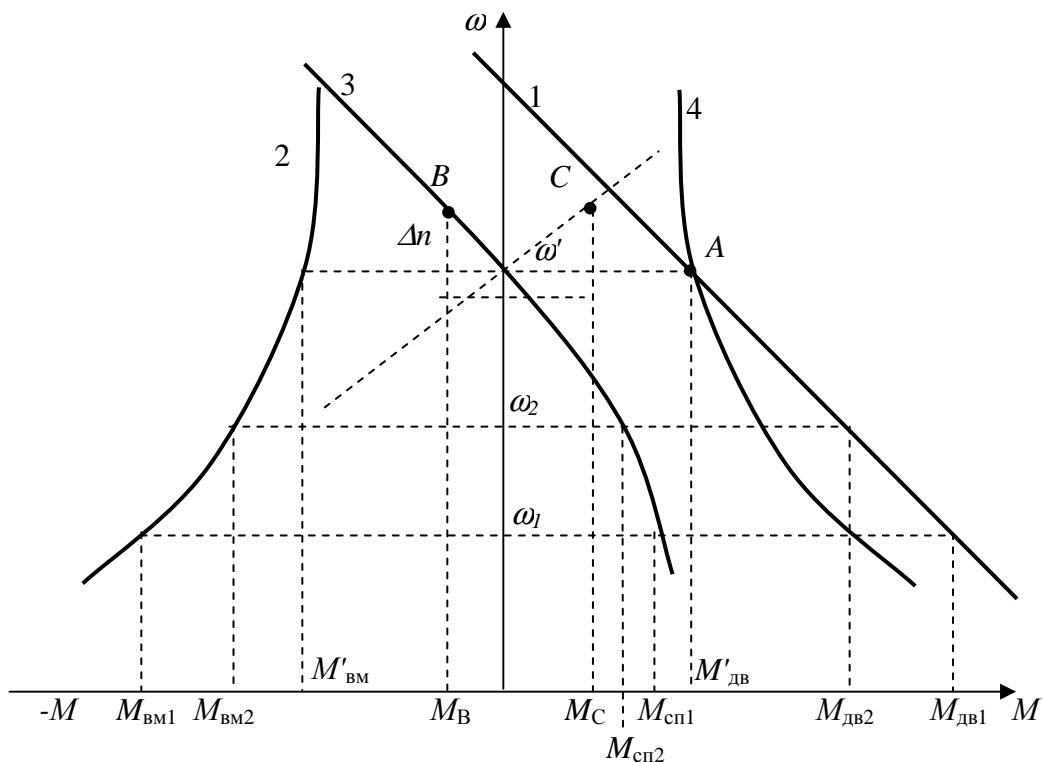


Рис.14.4 - Спільна характеристика електродвигуна і виробничого механізму

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  $\omega$  у першому квадранті. На рис. 14.4 цією характеристикою є крива 4 і, отже усталений режим відображається точкою A з координатами  $M'_{\text{дв}}$ ,  $\omega'$ .

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  $\omega_1$ . 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  $\omega_2$ . 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.

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.

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

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 короточасних 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.

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.

Слід зазначити, що замість дійсної температури користуються відносною величиною, **перевищенням температури  $\tau$** , що представляє різницю температур машини і навколишнього середовища. З деяким допущенням характеристика нагрівання електричної машини має вигляд експоненти (рис. 14.5). звідки видно, що перевищення температури  $\tau$  прагне до максимального значення  $\tau = \tau_{\text{ст}}$ . Електрична машина не перегрівается протягом тривалого часу, якщо її стале значення перевищення температури  $\tau_{\text{ст}}$  менше (або дорівнює) припустимого  $\tau_{\text{прип}}$  класу ізоляції машини:  $\tau_{\text{ст}} \leq \tau_{\text{прип}}$ .

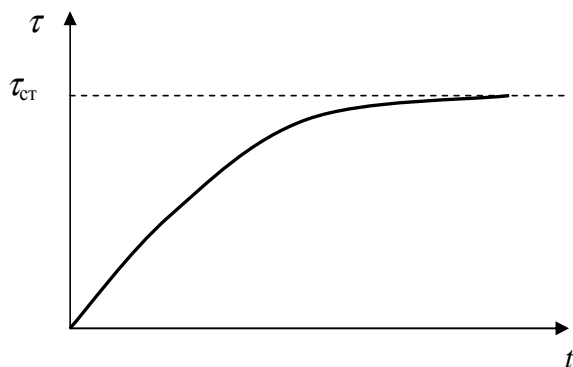


Рис. 14.5 - Характеристика нагрівання двигуна

При навантаженні двигуна треба орієнтуватися 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  $t_{\text{ц}}$  за формулою

$$P_{\text{сер}} = \frac{P_1 \cdot t_1 + P_2 \cdot t_2 + \dots + P_6 \cdot t_6}{t_1 + t_2 + \dots + t_6} \quad (14.20)$$

Потім  $P_{\text{сер}}$  множать на **коефіцієнт запасу**  $k_3 = 1,14 \div 1,3$ ;  $P'_{\text{сер}} = P_{\text{сер}} k_3$ . Далі за  $P'_{\text{сер}}$  вибирають двигун, будують для нього одну з навантажувальних діаграм і виконують перевірочний розрахунок.

Для більш точного вибору двигуна використовують **метод середніх витрат**. Для цього беруть діаграму потужності двигуна, що відрізняється від навантажувальної діаграми потужності виробничого механізму появою динамічного моменту при зміні швидкості привода.

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  $\Delta P$ , 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  $\tau_{ст} \leq \tau_{прип}$ , 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.

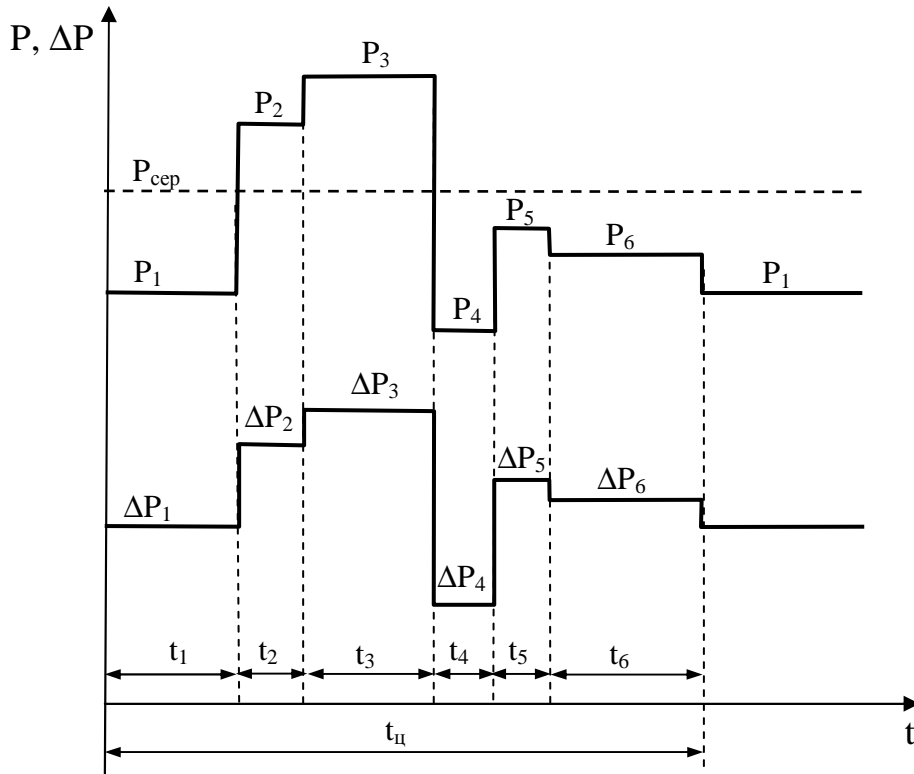


Рис. 14.6 - Східчаста навантажувальна діаграма двигуна

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;  $\lambda_i$  - 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 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 роботи. 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. Переліchte 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?

## ТЕМА 15

### РЕГУЛЮВАННЯ ШВИДКОСТІ ЕЛЕКТРОПРИВОДІВ

#### **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. В усіх 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  $\omega_{\max}$  до мінімальної  $\omega_{\min}$  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

$$\phi_{\text{пл}} = \omega_i / \omega_{i-1} \quad (15.2)$$

де  $\omega_i$  і  $\omega_{i-1}$  - кутові швидкості відповідно на  $i$ -й і  $(i-1)$ -й ступенях регулювання.

При плавному регулюванні  $\phi_{\text{пл}} \rightarrow 1$ , а число швидкостей  $z \rightarrow \infty$ . Число швидкостей  $z$ , діапазон регулювання  $D$  і коефіцієнт плавності регулювання зв'язані між собою рівністю

$$D = \phi_{\text{пл}}^{z-1}. \quad (15.3)$$

**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 еконо-

мічності 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 регульовальних 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.

### **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  $\Phi$ ) 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  $\Phi$ , 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 ( $P = P_{\text{ном}} = \text{const}$ ). Електромеханічним характеристикам  $\omega = f(I)$  при зміні струму збудження відповідають різні значення кутової швидкості ідеального холостого ходу, обумовлені формулою

$$\omega = \frac{U}{k \cdot \Phi} . \quad (15.5)$$

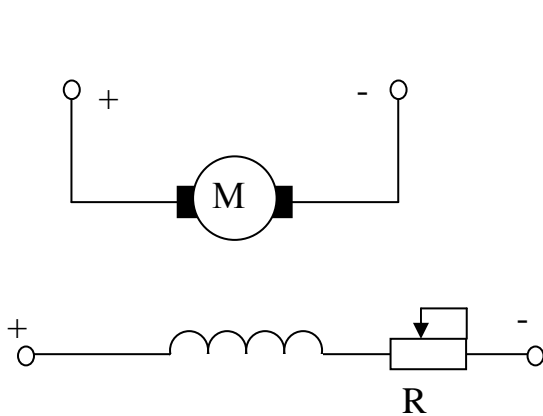


Рис.15.1 - Резисторне регулювання потоку збудження

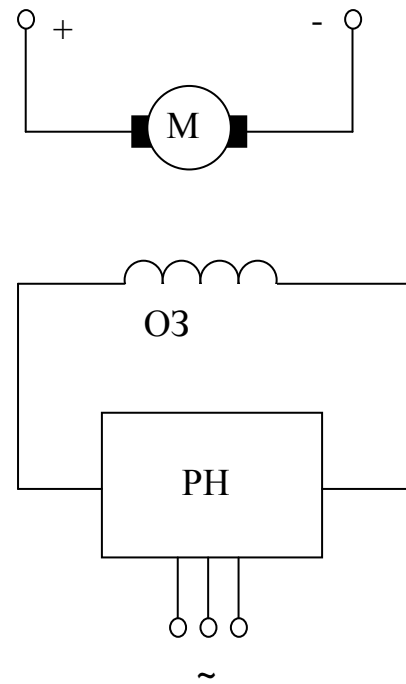


Рис. 15.2 - Регулювання потоку збудження регулятором напруги

На рис. 15.3 показані електромеханічні характеристики двигуна при регулюванні швидкості потоком збудження. Кутова швидкість ідеального холостого ходу  $\omega_0$  відповідає природній характеристиці, коли потік  $\Phi = \Phi_{\text{ном}}$ . Значення кутових швидкостей ідеального холостого ходу при ослабленому потоці  $\omega_0'$  і  $\omega_0''$  лежать вище  $\omega_0$ . Всі характеристики перетинають вісь абсцис в одній точці, оскільки при різних струмах збудження і кутовій швидкості, яка дорівнює нулю, струм у якорному колі дорівнює струму короткого замикання.

Механічні характеристики, показані на рис. 15.4, мають ті ж значення кутових швидкостей ідеального холостого ходу, що й електромеханічні характеристики. Однак вони не перетинаються в одній точці на осі абсцис, тому що в міру зменшення потоку зменшується і момент короткого замикання.

Даний спосіб регулювання є економічним. Повному використанню двигуна відповідають точки, що належать лінії номінального струму  $I_c = I_{\text{ном}}$ .

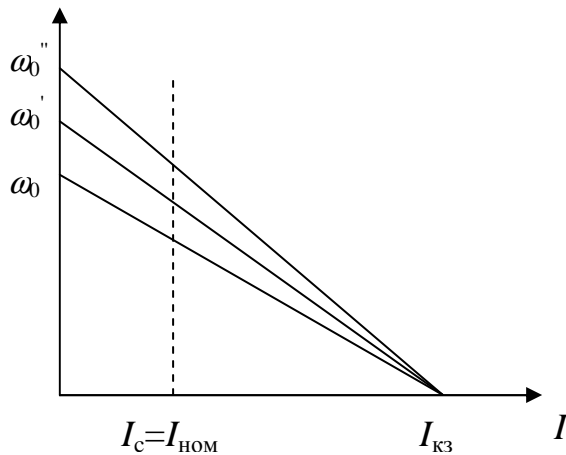


Рис. 15.3 - Електромеханічні характеристики двигуна незалежного збудження

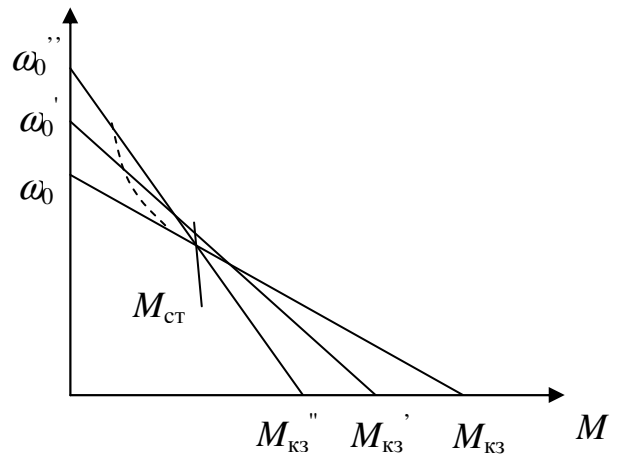


Рис. 15.4 - Механічні характеристики двигуна незалежного збудження

Регульовані двигуни мають діапазон регулювання від 2:1 до 5:1, а в ряді випадків до (8-10):1. Плавність регулювання в межах заданого діапазону може бути отримана досить значною і визначається кількістю ступенів пристроїв, що регулюють напругу обмотки збудження.

**15.2.2. Реостатне регулювання** кутової швидкості двигуна здійснюється шляхом зміни опору кола якоря і не вимагає особливих пояснень.

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.

Способом досягнення плавного регулювання при введенні резисторів у коло якоря є використання імпульсного параметричного регулювання швидкості.

Схему включення двигуна 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. Співвідношення тривалостей  $t_1$  замкнутого й  $t_2$  розімкнутого станів ключа  $K$  прийнято виражати у вигляді відносної величини

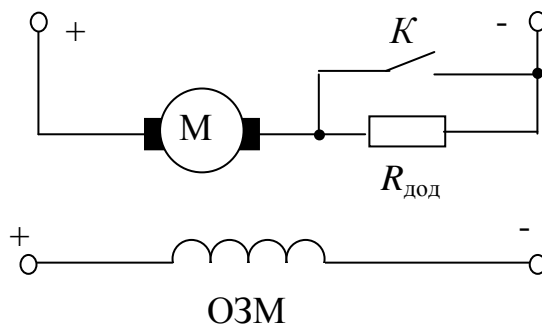


Рис. 15.5 - Схема включення двигуна постійного струму з незалежним збудженням при імпульсному регулюванні швидкості

$$\varepsilon = \frac{t_1}{t_1 + t_2}, \quad (15.6)$$

яка називається **скважністю керуючих імпульсів**.

Механічні характеристики двигуна, показані на рис. 15.6, тобто вони мають той же вигляд і ті ж властивості, що й при чисто реостатному регулюванні.

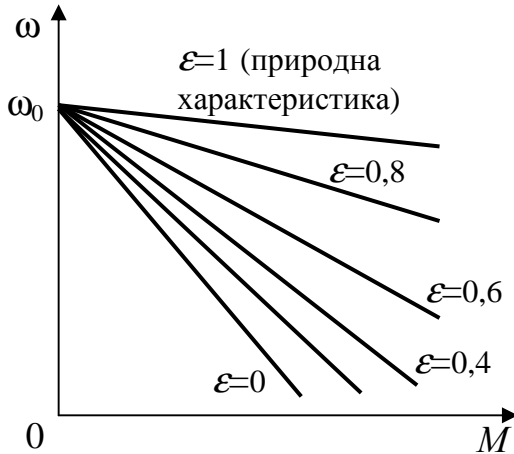


Рис. 15.6 - Характеристики двигуна постійного струму при імпульсному регулюванні швидкості

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).

**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 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  $\frac{\omega_1}{\omega_2} = \frac{U_1 - I \cdot R_{\text{я}}}{U_2 - I \cdot R_{\text{я}}}$ , звідки випливає, що при зміні напруги ре-

гульовальні характеристики розташовуються паралельно одна до одної, тобто мають однакову жорсткість. Діапазон регулювання

$$D = \frac{U_{\text{ном}} - I \cdot R_{\text{я}}}{U_{\text{мін}} - I \cdot R_{\text{я}}}, \quad (15.7)$$

де  $U_{\text{ном}}$  і  $U_{\text{мін}}$  - номінальна й мінімальна напруги.

Діапазон регулювання обмежений значенням  $D = (8-10) : 1$  у системах привода без зворотних зв'язків (у замкнених системах діапазон регулювання істотно більший і може досягати значень 1000:1 і більше). Плавність регулювання визначається плавністю зміни напруги живлення. ККД двигуна дорівнює відношенню фактичної кутової швидкості двигуна до кутової швидкості ідеального холостого ходу на заданій характеристиці. Втрати потужності в якірному колі при постійному моменті навантаження залишаються незмінними і дорівнюють втратам при роботі на природній характеристиці.

### 15.3. Регулювання кутової швидкості асинхронних двигунів

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 реостатному регулюванні показані на рис. 15.7. 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  $M_{ст}$ .

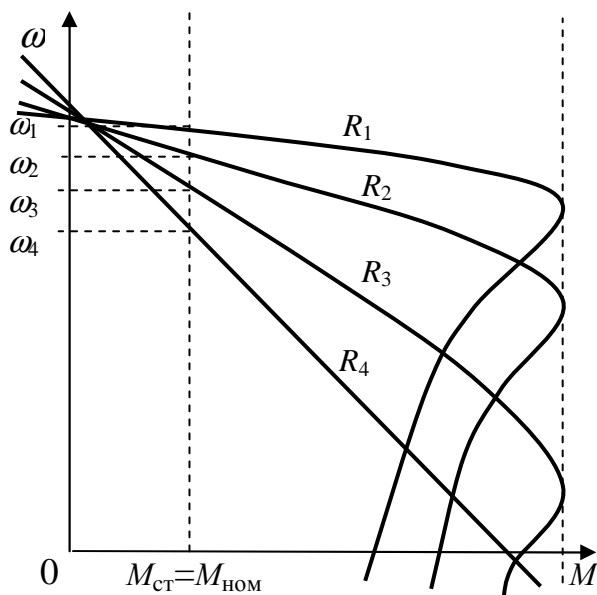


Рис. 15.7 – Механічні реостатні характеристики АД

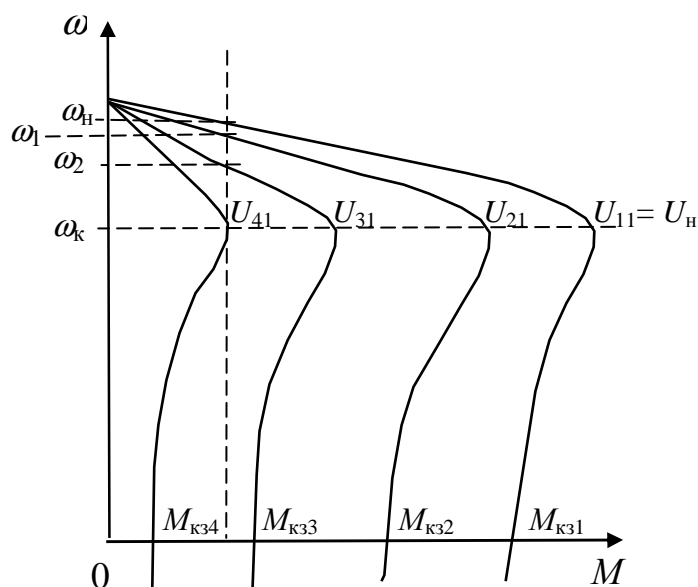


Рис. 15.8 – Механічні характеристики АД при зміні напруги на статорі

В роторному колі проходять великі струми, для яких складно створити резистори з безступеневою зміною опору. 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. 15.8).

Як правило, регулювання здійснюють зменшенням напруги. При цьому, як видно з рис. 15.8 ( $U_{11} > U_{21} > U_{31} > U_{41}$ ), частота обертання (критичне ковзання) залишається постійною, а максимальний момент знижується пропорційно квадрату напруги. 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. 15.9) на відміну від реостатного дозволяє забезпечити плавну зміну частоти обертання й виключити контактну апаратуру в роторному колі.

Для зміни напруги при регулюванні використовують автотрансформатори, напівпровідникові підсилювачі, тиристорні регулятори напруги.



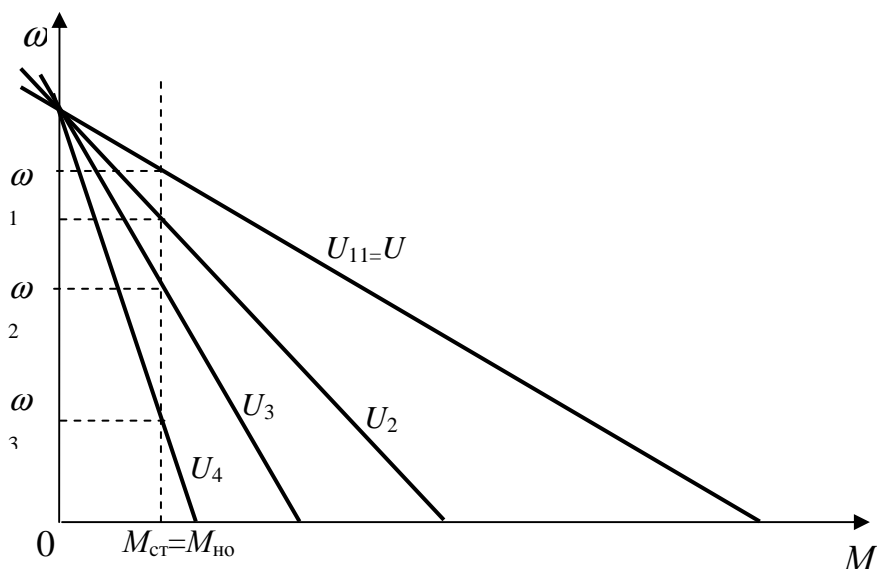


Рис. 15.9 - Механічні характеристики АД при зміні напруги на статорі й включенні активного опору до кола ротора

### 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?
7. В яке коло включають додатковий опір при регулюванні швидкості потоком збудження і при реостатному регулюванні?
8. Як визначають скважність керуючих імпульсів  $\epsilon$ ? На що вона впливає?
9. Який вигляд мають регульовальні 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?

## ТЕМА 16

### ЕЛЕКТРООБЛАДНАННЯ ЗВАРЮВАЛЬНИХ УСТАНОВОК

*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  $1 \text{ см}^2$ , 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 розплавлення металу країв деталей, що зварюються, і електрода (або присадочного металу) здійснюється за рахунок тепла, яке виділяється електричною дугою, виконується вручну, напів-автоматично або автоматично.

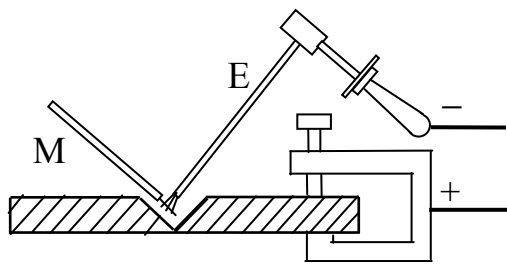
***Ручне дугове зварювання*** може здійснюватися двома способами: способом Бенардоса і способом Славянова.

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 *Е*. Між електродом *Е* (вугільним, графітовим або вольфрамовим) і виробом збуджують електричну дугу. Краї виробу і присадочний матеріал, що вводиться до зони дуги *М*, 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.

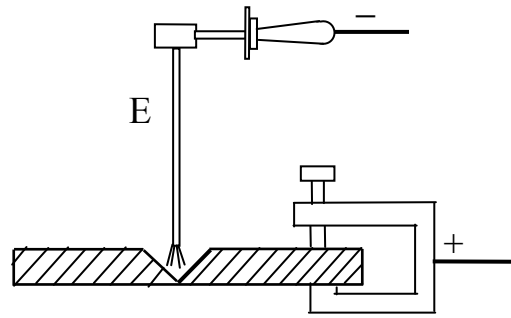
Зварювання за способом Н.Г.Славянова (рис.16.2) виконують за допомогою електрода, що плавиться. Електрична дуга збуджується між металевим електродом і кромками виробу, що зварюються. Виходить загальна ванна розплавленого металу, яка, охолоджуючись, утворює зварний шов.

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.



*Рис.16.1 - Електрозварювання за способом Бенардоса*



*Рис.16.2 - Електрозварювання за способом Славянова*

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 зварюва-

льних 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  $\Phi_d$ , тим самим змінюють напругу струму генератора і величину зварювального струму.

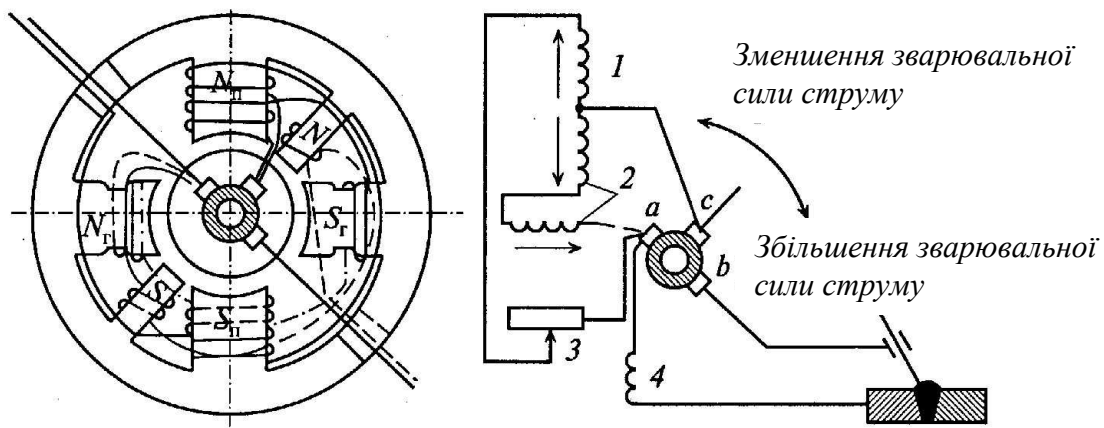


Рис. 16.3 - Схема генератора з розщепленими обмотками:  
1,2 - відповідно регульована і нерегульована обмотки збудження;  
3 - реостат; 4 - серієсна обмотка;  $a$ ,  $b$ ,  $c$  — щітки

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  $\Phi_{зб}$ , 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  $\Phi_n$ , спрямований проти потоку  $\Phi_{зб}$ .

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.

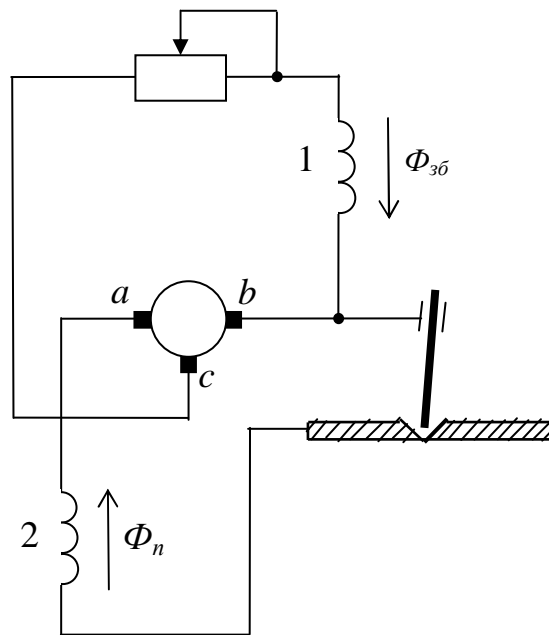


Рис. 16.4 - Зварювальний генератор з розмагнічуючою дією реакції якоря:  
 1 – обмотка збудження; 2 – розмагнічуюча обмотка; *a, b, c* — щітки

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:

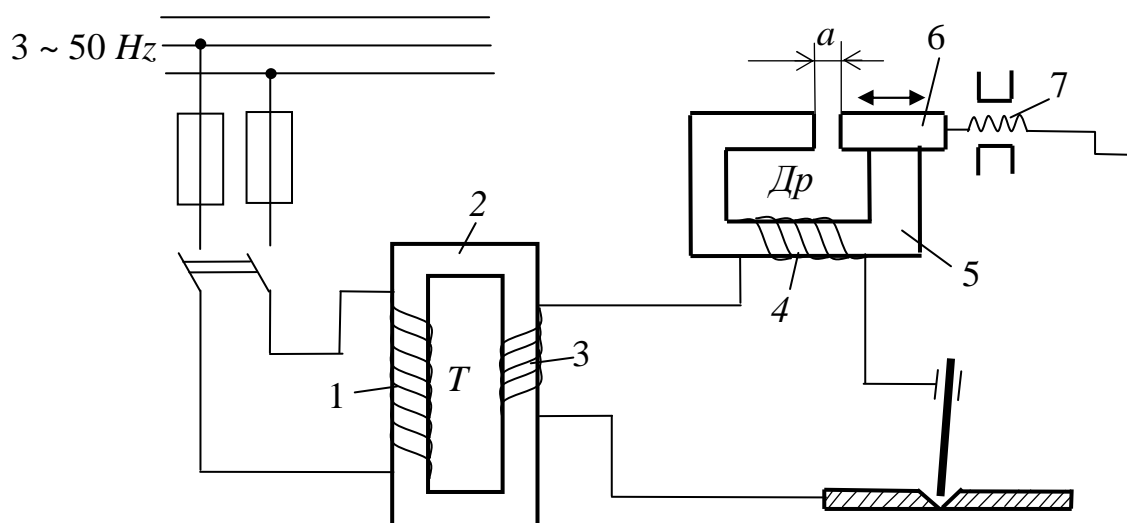
- з окремим дроселем;
- з вбудованим дроселем;
- з рухомим магнітним шунтом;
- із збільшеним магнітним розсіюванням і рухомою обмоткою.

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, виготовленої з мідної шини, індукуюється 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; а - 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 рухомих 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  $a$ .

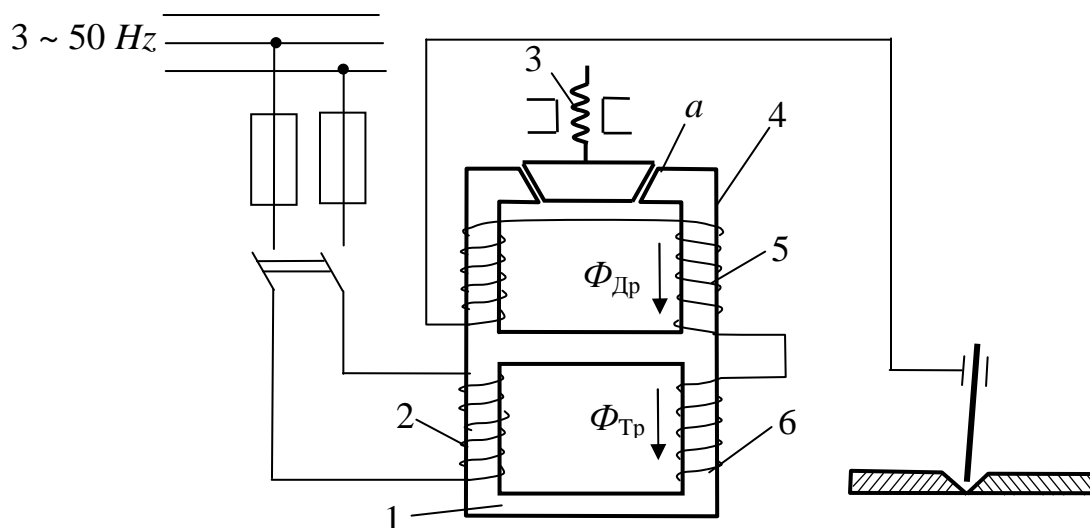


Рис. 16.6 - Схема зварювального трансформатора з вбудованим дроселем:

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 рухомим 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 значення сили зварювального струму зростає. На такому принципі працюють зварювальні апарати типу СТАН-0, ОСТА-350 та ін. [2.23].

**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. Пер-



винна 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.

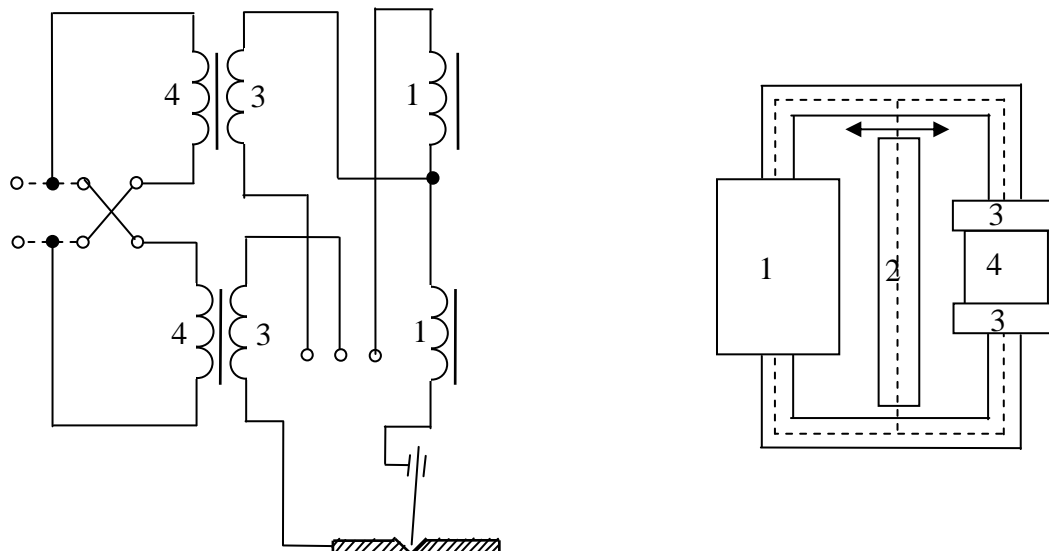


Рис. 16.7 - Схема зварювального апарата з рухомим магнітним шунтом:  
1 - реактивна обмотка; 2 - магнітний шунт; 3, 4 - обмотки  
відповідно вторинна й первинна

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.

### 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 контактного зварювання?

## ТЕМА 17

### ЕЛЕКТРООБЛАДНАННЯ ВАНТАЖОПІДЙОМНИХ МАШИН

#### 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 електрогідролічні 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 вантажопідйомних 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 °С. 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, восьмиполісний.

Наприклад, МТР-411-8 - крановий електродвигун з фазним ротором, 4-ї величини, 1-ї довжини, восьмиполосний, 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 виключити 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 ПВ=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 ПВ 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. 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).

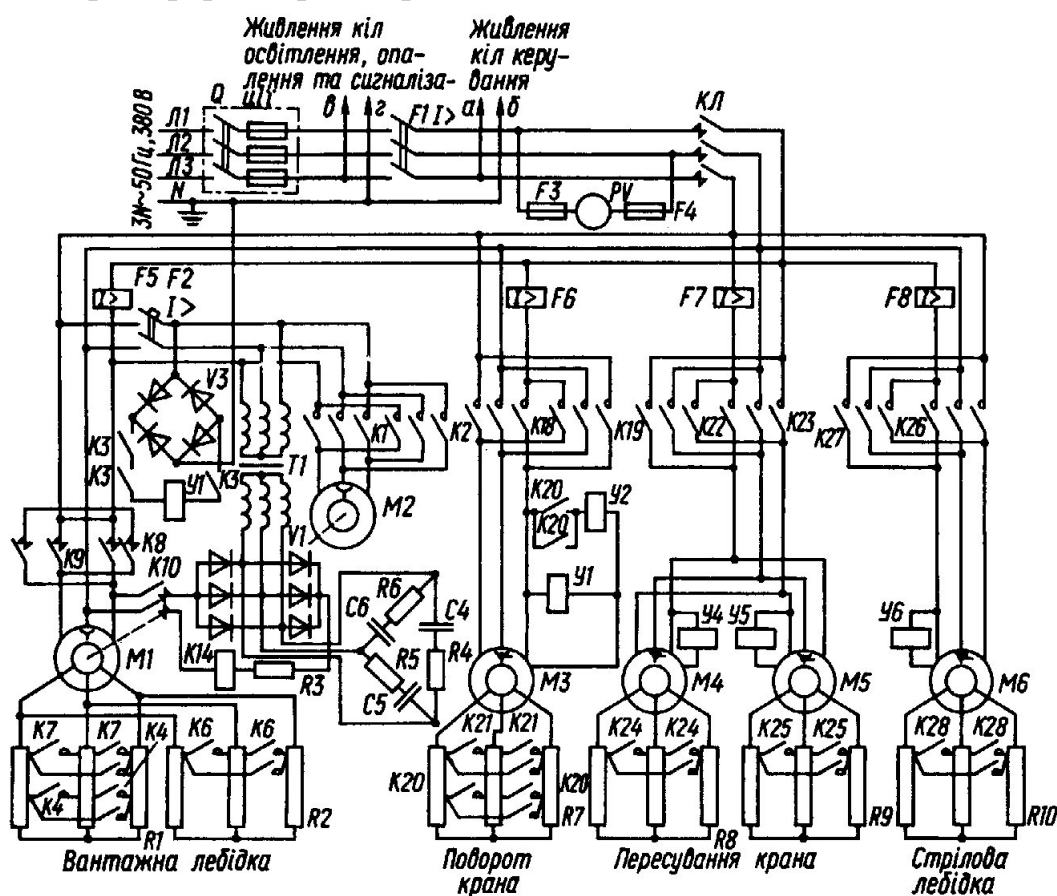


Рис.17.12 - Схема силових кіл крана КБ-401А

Живлення електродвигунів (рис. 17.12) здійснюється через вхідний рубильник Q, автоматичний вимикач F1, контакти лінійного контактора КЛ 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 ванта-

жу, 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 *VI* постійного струму.

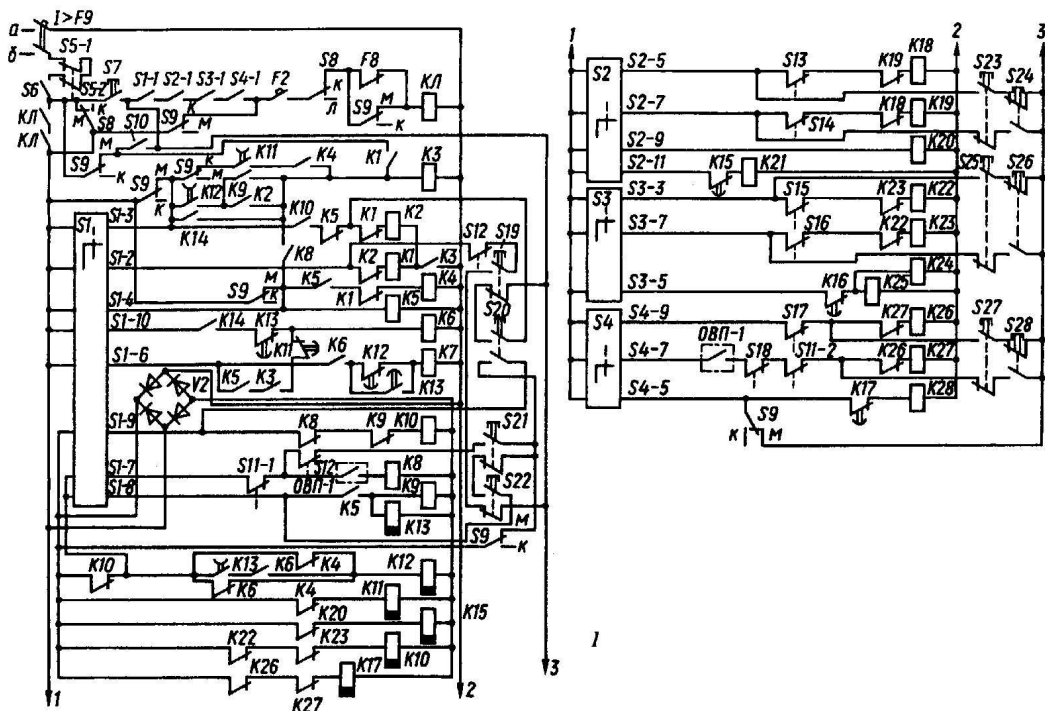


Рис.17.13 - Схема кіл керування краном КБ-401А

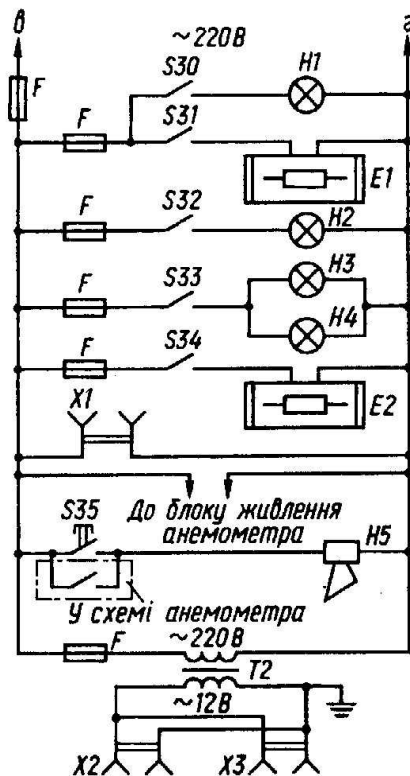


Рис.17.14 - Схема кіл освітлення, опалення і сигналізації крана КБ-401А

Таблиця 17.1 - Замикання контактів командоконтролера вантажної лебідки крана КБ-401А

Контакт	Положення ручки						
	Підйом				Опускання		
	3	2	1	0	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		

Захист випрямлячів від перенапруги забезпечується трьома ланцюжками, кожний з яких містить послідовно ввімкнені резистори (*R4, R5, R6*) і конденсатори (*C4, C5, C6*), з'єднані «трикутником» і включені до трьох фаз випрямного містка *VI*.

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.

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 розмикання контакту (в результаті перевищення вантажопідйомності) вимикається контактор підняття вантажу й електросхема 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 кабіни 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 кабіни.

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**

### **ЕЛЕКТРОПРОГРІВ БЕТОНУ І 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.

#### **18.1. 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 спеціаль-

них 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 розміщується у змінного магнітного 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 води і в міру твердіння бетону зменшується. Для підтримки розрахункового тепловиділення до бетону вводять різні домішки - CaCl<sub>2</sub>, NaCl, що прискорюють твердіння і зменшують опір бетону.

Застосовувані при прогріві електроди підрозділяються на пластинчасті, смугові, стрижневі і струнні (рис. 18.1). 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. 18.1.

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 попереми́нним відключенням струму. Максимальна температура процесу обмежується гранично припустимою для певної марки бетону (звичайно 40-80°C).

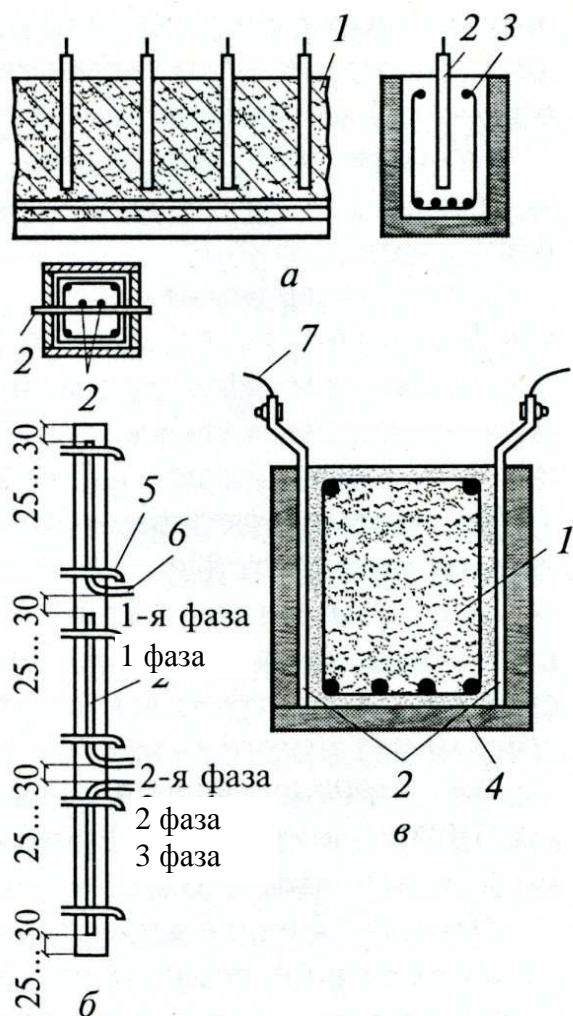


Рис.19.1 - Електродний метод електропрогріву бетону:

*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* - проводи.

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 ізолюваний 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 підтримується на рівні 80-90°C. Необхідна потужність в період підйому температури 7-8 кВт на 1 м<sup>3</sup> 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 м<sup>3</sup> 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

$$W = W_{\text{пит}} V; \quad P = \rho V, \quad (18.1)$$

де  $W_{\text{пит}}$  - питома витрата електроенергії, кВт·год/м<sup>3</sup>;  $\rho$  - питома потужність на 1 м<sup>3</sup> бетону, кВт/м<sup>3</sup>;  $V$  — обсяг бетону, м<sup>3</sup>.

Питома витрата електроенергії  $W_{\text{пит}}$  (кВт·год/м<sup>3</sup>) при прогріванні бетону різними способами:

електродний спосіб прогріву .... 80... 120,  
індукційний - // - .....120...150,  
інфрачервоний - // - .....100...200.

Таблиця 18.1 - Питома потужність для електропрогріву бетонних конструкцій, кВт/м<sup>3</sup>

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.

## 18.2. 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 процесів у ньому, значно впливають на його електричний опір.

Поверхню ділянки ґрунту, що прогрівається, засипають на 15-25 см шаром тирси, змоченої водяним розчином солі (повареної, хлористого кальцію) або соляної кислоти, що мають призначення проводити струм і утеплювати ґрунт; навіть при напрузі 380 В струм практично не проходить через мерзлий ґрунт.

При електропрогріві ґрунту горизонтальними електродами (рис. 18.2,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 щебенями.

Відігрівання вертикальними електродами (рис. 18.2,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 (глинисті 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).

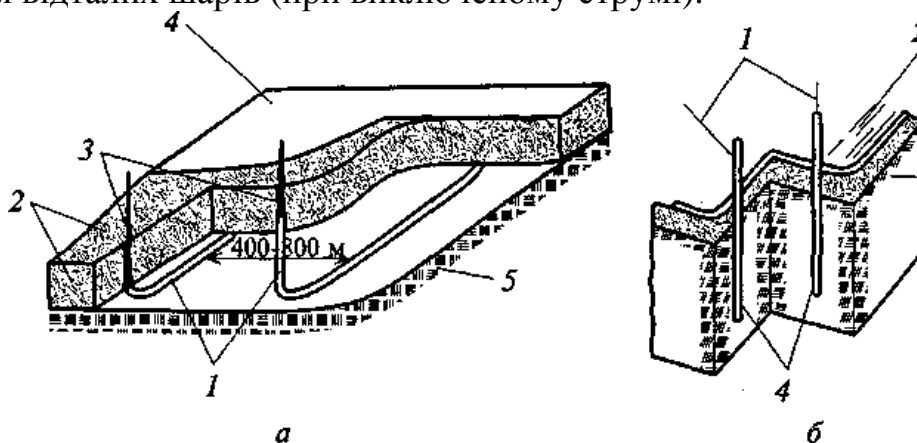


Рис. 18.2 - Електропрогрів ґрунту:

- 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 по-

критті 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 прогрівається, 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 відігривання 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 прогрівається до негативної температури, близької до 0°C за рахунок теплової енергії, акумульованої біля електродів. Ґрунт прогрівається знизу вгору, за рахунок чого зменшуються втрати тепла до атмосфери. Прогрів мерзлого ґрунту до температури -1,5...-0,5°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.

### ***18.3. 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 багаторушного 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 18***

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 19

### ЕЛЕКТРООСВІТЛЮВАЛЬНІ УСТАНОВКИ

#### 19.1. 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 (СНіП) 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. 19.1).

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 19.1** - 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.

## **19.2. Джерела світла і освітлювальна арматура**

**19.2.1. 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 відкачене 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 електромережі. 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.

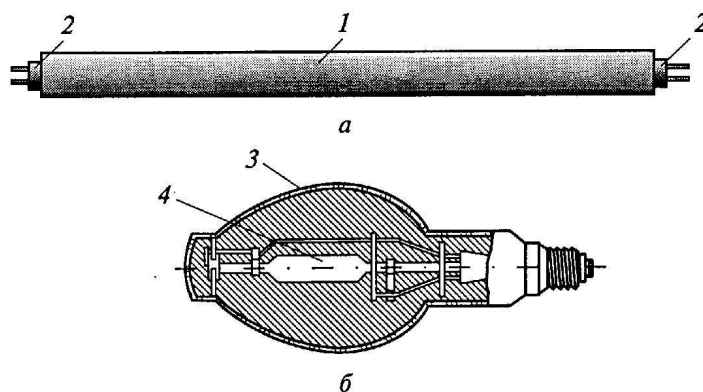
При зниженні напруги проти номінальної світловий потік і світловіддача ламп розжарювання різко знижуються. Підвищення напруги понад 105% номінальної значно зменшує термін служби лампи.

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. 19.1,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. 19.1 - 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 кольірних відтінків.

**Ртутна лампа** високого тиску типу ДРЛ за зовнішнім виглядом схожа на велику лампу розжарювання. Її будова показана на рис. 19.1,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. 19.1,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 люмінесцентні, 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.

**19.2.2. 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).

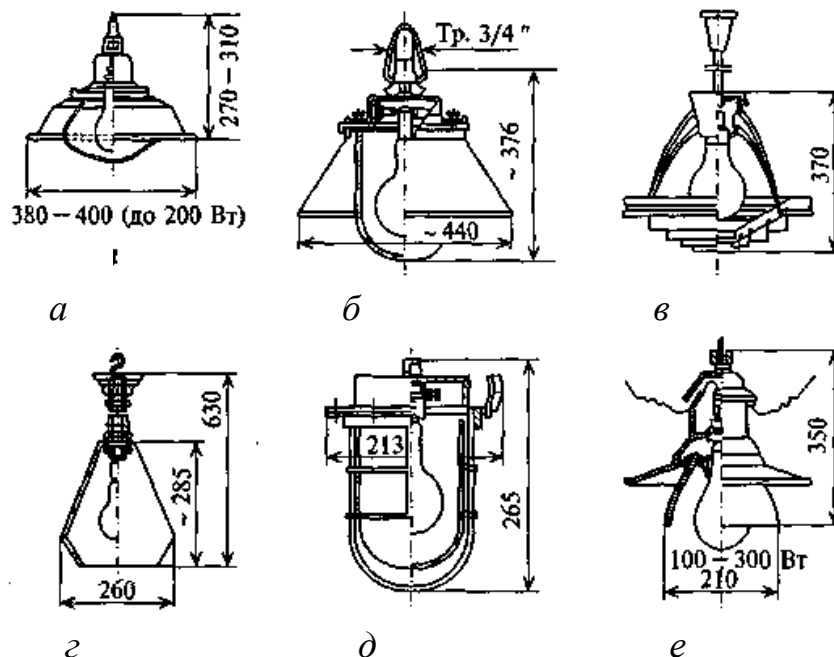


Рис. 19.2 - Світильники з лампами розжарювання:

*а* – "Універсаль"; *б* - промисловий ущільнений (ПУ);

*в* - кільцевий типу ПМ-1; *г* – "Люцетта"; *д* – рудничний нормальний (РН-100);

*е* - зовнішнього освітлення типу СПО

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. 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.19.5).

### 19.3. 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.

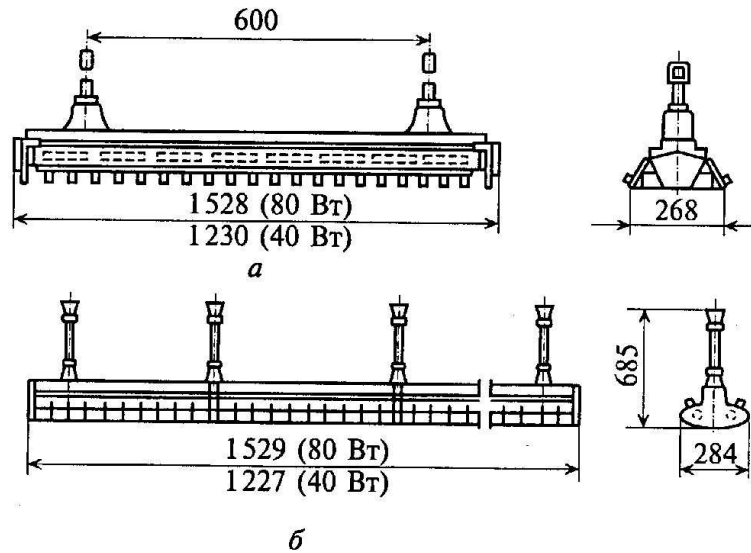


Рис.19.3 - Світильники з люмінесцентними лампами:  
а - типу ОДР і ОДОР з двома лампами по 40 або 80 Вт;  
б- типу ШЛД з двома лампами по 40 або 80 Вт.

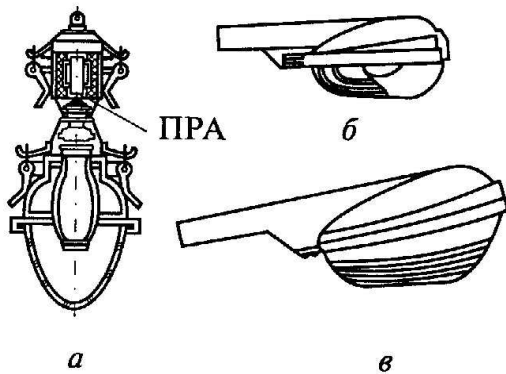


Рис.19.4 - Світильники для ртутних ламп типу ДРЛ:  
а – підвісного типу;  
б, в – консольного типу

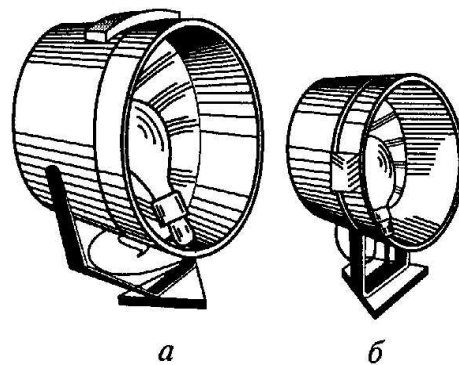


Рис.19.5 - Прожектори заливного світла: а – типу ПЗС-45 з лампою 1000 Вт; б – типу ПЗС-35 з лампою 500 Вт

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. 19.6.

Відстань між прожекторними щоглами вибирають звичайно від 80-100 до 200-250 м (менші цифри відносяться до прожекторів меншої потужності).

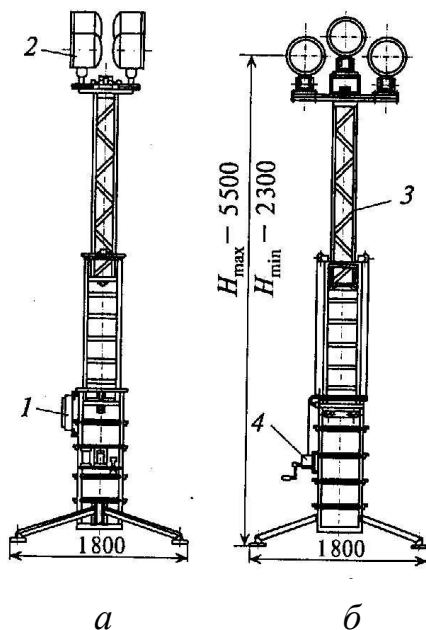


Рис. 20.6 - Інвентарна телескопічна прожекторна щогла типу ТПМ-6:

*а* - вигляд збоку; *б* - вигляд спереду;

*1* - розподільний щиток; *2* - прожектори; *3* - металоконструкція; *4* - ручна лебідка

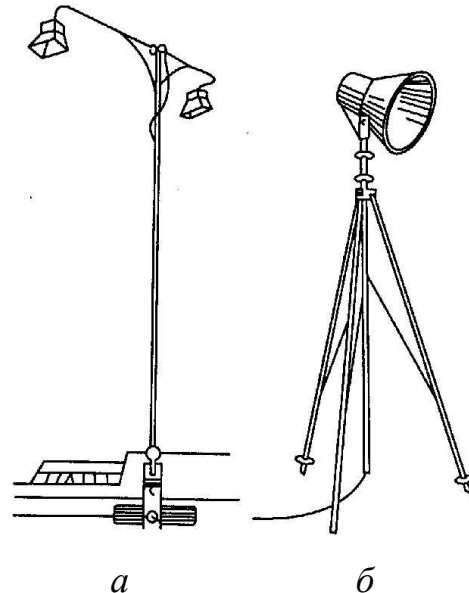


Рис. 20.7 - Інвентарні стояки із світильниками:

*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

Для додаткового освітлення робочих зон застосовуються інвентарні переносні стояки з прожекторами малої потужності (з лампами 200 Вт) або із світильниками. На рис. 19.7 представлені такі інвентарні стояки. Крім того, на екскаваторах та інших великих будівельних машинах також встановлюють прожектори малої потужності, які додатково освітлюють зону роботи.

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 засто-

совуватися 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.

#### **19.4. 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. 19.2.

**Зовнішнє прожекторне освітлення.** Число прожекторів, необхідне для освітлення заданої площі, за методом питомої потужності визначають за формулою

$$N = \omega \cdot E \cdot S / P_{\text{л}}, \quad (19.1)$$

де  $\omega$  - питома потужність ламп прожекторів, що доводиться на 1 м<sup>2</sup> освітлюваної площі й 1 лк освітленості (її слід приймати: для прожекторів ПЗС-35 - рівною 0,25÷0,4 Вт/(м<sup>2</sup>·лк), а для прожекторів ПЗС-45 - рівною 0,2÷0,3 Вт/(м<sup>2</sup>·лк));  $E$  - освітленість, лк (див. табл. 19.1);  $S$  - площа, що підлягає освітленню, м<sup>2</sup>;  $P_{\text{л}}$  - 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 ( $\omega$ ) приймаємо рівною 0,30 Вт/(м<sup>2</sup>·лк).

Визначаємо число прожекторів за формулою (19.1):  $n = 24,6$  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. 19.2.

Таблиця 19.2 - Питома потужність загального рівномірного освітлення світильником "Універсаль" без затінювача з лампами розжарювання

Розрахункова висота, м	Площа приміщення, м <sup>2</sup>	Питома потужність $\omega'$ (Вт/м <sup>2</sup> ) 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. 19.1 величину освітленості, що відповідає заданим умовам. Вибирають для даного приміщення тип світильника, намічають (відповідно до розмірів приміщення) розрахункову висоту підвісу світильників. Потім з табл. 19.2 знаходять для даного типу світильника, розрахункової висоти підвісу, площі приміщень і необхідної освітленості величину питомої потужності у Вт/м<sup>2</sup>. 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:

$$P_{\text{заг}} = \omega' \cdot S, \quad (19.2)$$

де  $\omega'$  - питома потужність ламп світильників, Вт/м<sup>2</sup>;  $S$  - площа приміщення, м<sup>2</sup>.

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<sup>2</sup>. Висота підвісу світильників над підлогою не повинна бути нижче за 3,5 м.

Для освітлення виберемо лампи розжарювання. Вибераємо для освітлення майстерні світильник "Універсаль"; висота підвісу над підлогою 3,5 м. Приймаючи висоту освітлюваних поверхонь (верстатів) над підлогою у 0,8 м, знаходимо розрахункову висоту підвісу світильника  $h_p$ , рівну  $3,5 - 0,8 = 2,7$  м.

З табл. 19.1 знаходимо для майстерні мінімальну освітленість - 50 лк (норма для групи «монтаж обладнання»).

З табл. 19.2 знаходимо для заданих умов величину питомої потужності - 10,2 Вт/м<sup>2</sup>. Загальну потужність ламп для освітлення майстерні визначаємо за формулою (19.2):

$$P_{\text{заг}} = 10,2 \cdot 190 = 1938 \approx 2000 \text{ Вт.}$$

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 19***

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 20**

### **ЕЛЕКТРОБЕЗПЕКА В БУДІВНИЦТВІ**

#### ***20.1. 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».

#### ***20.2. 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 залежить 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 20.1 - 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 теплого (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. Значним електричним опором володіє 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  $U = I \cdot R_{\text{люд}} = 0,05 \cdot 1000 = 50 \text{ В}$ , при цьому джерело повинно віддавати потужність  $P = U \cdot I = 50 \cdot 0,05 = 2,5 \text{ Вт}$ .

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 опиняється 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 кабіни, казани, приміщення з відносною вологістю 100%)  $U_{\text{дот}} = 12 \text{ В}$ .

### **20.3. 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 (дош, 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.

## **20.4. Заходи щодо забезпечення безпечного ведення робіт з електроустановками**

**20.4.1. 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 короткочасні 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 короткочасно (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, контак-

торів 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.

**20.4.2. 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 напрузі до 220 В.

*Заходи, що забезпечують безпеку робіт без зняття напруги.* Робоче місце електромонтера 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.

**20.4.3. 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.

## **20.5. 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 електроприводом, 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. 20.1). 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 установ-

ки автоматично відключається, оскільки під дією струму короткого замикання негайно перегорить плавка вставка запобіжника або відключиться автомат.

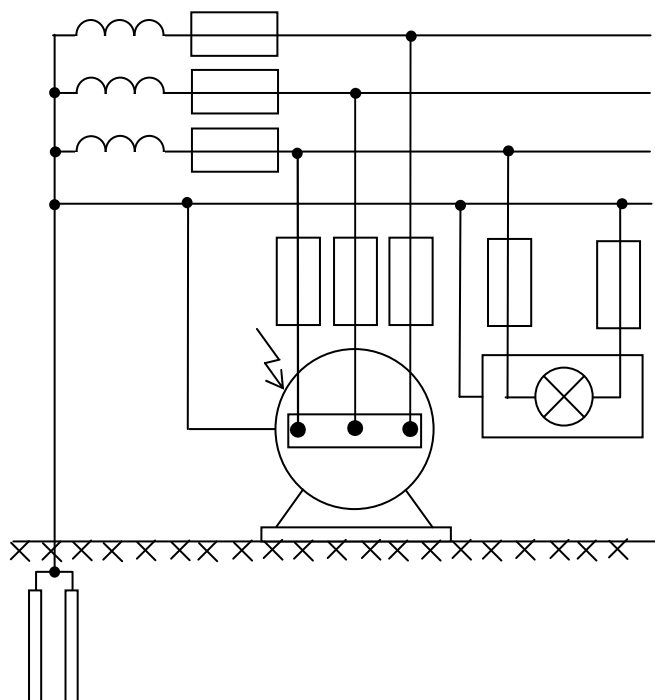


Рис. 20.1 - Схема захисного заземлення у чотирипровідній лінії

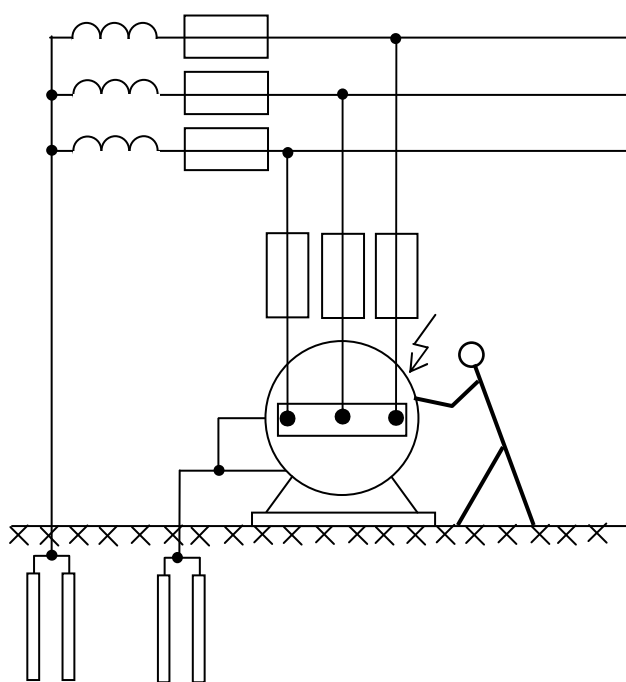


Рис.20.2 - Захисне заземлення у трипровідній лінії

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 металоконструкції) 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 металевих конструкцій і корпусів електрообладнання крана, що роблять за допомогою 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 ізольованою (незаземленою) нейтральною точкою силових трансформаторів. Такого роду мережі іноді будують на торфодобуваннях 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. 20.2). Місцевий заземлюючий пристрій при цьому повинен мати малий опір. Відповідно до правил опір такого заземлюю-

чого 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.

Як штучні заземлювачі 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 зварюванні. Заземлюючі провідники приєднують до заземлюючого контуру (до сталевієї 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 20***

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 ДЖЕРЕЛ

### 1. Основні джерела

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. Матвійів 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. Додаткові джерела**

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.: Энегоатомиздат, 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](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/](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».

## НАВЧАЛЬНЕ ВИДАННЯ

**Охріменко** Вячеслав Миколайович,  
**Воронкова** Тетяна Борисівна

Конспект лекцій з курсу «Електротехніка у будівництві»  
(для студентів 2 курсу та слухачів другої вищої освіти ФПО  
та ЗН напрямку підготовки 6.060101 "Будівництво",  
спеціальностей "ПЦБ", "МБГ", ТГПіВ)

Відповідальний за випуск *А.І. Кузнєцов*

Редактор: *М.З. Аляб'єв*

Комп'ютерне верстання *К. А. Алексанян*

План 2010, поз. 197Л

---

Підп. до друку 09. 03. 2010	Формат 60 х 84 /16
Друк на ризографі.	Ум. друк. арк. 12,4
Зам. №	Тираж 50 пр.

---

Видавець і виготовлювачі  
Харківська національна академія міського господарства,  
вул. Революції, 12, Харків, 61002  
Електронна адреса: rectorat@ksame.kharkov.ua  
Свідоцтво суб'єкта видавничої справи:  
ДК №4064 від 12.05.2011