

МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ І НАУКИ УКРАЇНИ

Полтавський національний технічний університет  
імені Юрія Кондратюка

Кафедра автоматики та електропривода

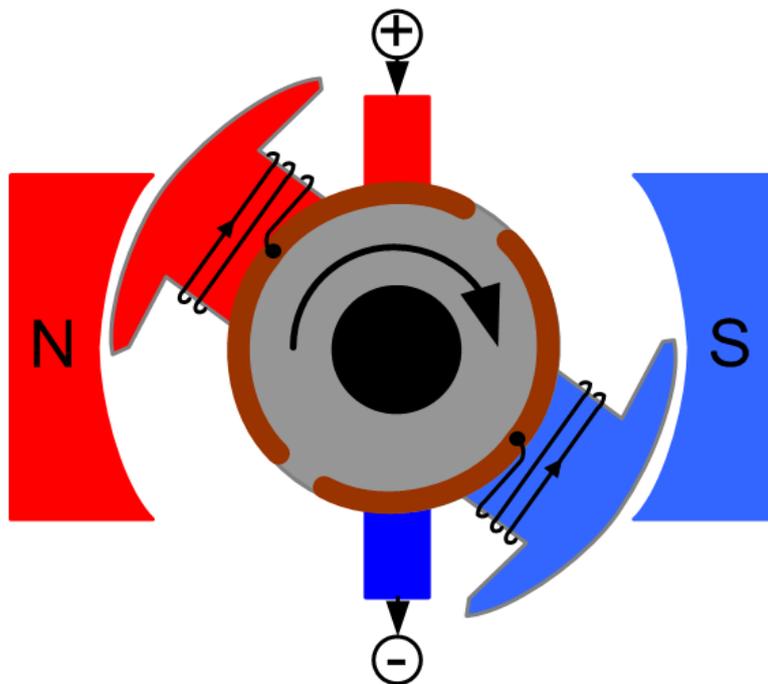
# НАВЧАЛЬНИЙ ПОСІБНИК

з дисципліни

“ЕЛЕКТРОТЕХНІКА ТА ЕЛЕКТРОПОСТАЧАННЯ”

для студентів спеціальності 185

«Нафтогазова інженерія та технології»



Полтава 2019

Навчальний посібник з дисципліни "Електротехніка та електропостачання" для студентів спеціальності 185 «Нафтогазова інженерія та технології». – Полтава: ПолтНТУ, 2019. – 177 с.

Укладач: Н.В. Єрмілова, кандидат технічних наук, доцент.

Відповідальний за випуск: в.о. завідувача кафедри автоматичної та електропривода О.В. Шефер, доктор технічних наук, доцент.

Рецензент: Г.В. Тамахін, кандидат технічних наук, доцент.

Затверджено науково-методичною  
радою університету  
протокол № 5 від 14.06. 2019 р.

## Вступ

Сьогодні без електроенергії не можна уявити своє життя, хоча ще зовсім недавно, за історичними мірками, поняття «електрика» було невідомим і не зрозумілим для людства. Завдяки електроенергії забезпечується нормальний побут в оселях, вирощується врожай на сільській ниві, плавиться метал в печах; без електроенергії не зможе розвиватися практично жодна з сучасних галузей народного господарства: атомні станції, військові комплекси, фабрики, заводи, ферми, дослідні інститути, лікарні – всі вони використовують електричну енергію. Електрична енергія живить ЕОМ, верстати, освітлювальні прилади в хірургічних відділеннях, апарати, які підтримують штучне дихання, електропотяги і міський транспорт, банківська система і зв'язок, телебачення тощо. Раптове зникнення електрики в сучасному світі спричинило б величезну катастрофу.

Перші наукові узагальнення про магнітні та електричні явища, про існування магнітного поля Землі здійснено У. Гілбертом у 1600 році у праці «Про магніт, магнітні тіла та про великий магніт Землю». У 1650 році Отто Геріке побудував першу електростатичну машину. Приблизно через століття Дюфе відкрив існування двох родів електричних зарядів: скляного і смоляного, а Е.Ю. фон Клейст і П. ван Мушенбрук створили лейденську банку (перший конденсатор).

Найбільше фундаментальних відкриттів здійснено у 19 сторіччі плеядою науковців різних країн, у тому числі й вітчизняних. У 1785 році Кулон винайшов крутильну вагу, завдяки якій встановив закон взаємодії електричних зарядів (закон Кулона), Вольт створив гальванічний елемент. 1820 рік можна відзначити цікавими публікаціями Ерстеда про дію магнітного поля на магнітну стрілку; Ампера про взаємодію струмів (закон Ампера); Араго про створення магнітного поля провідником, у якому протікає струм та ін. Фундаментальні відкриття Фарадея, Ома, Ленца, Якобі, Джоуля, Кірхгофа, Максвелла, Зеєбека та ін. створили теоретичне підґрунтя для використання електромагнітних явищ у практичних цілях.

Саме практичному застосуванню законів електромагнетизму присвятили низку відкриттів вітчизняні науковці та інженери, до яких можна віднести Б.С. Якобі, А.Г. Столетов, А.Н. Лодигін, П.Н. Яблочков, М.О. Доліво-Добровольський та ін. Так, Доліво-Добровольський уперше в 1988-1989 р.р. здійснив відкриття системи трифазного струму, створив трифазний трансформатор та асинхронний двигун, якими користується людство по цей день.

Електроенергія має переваги серед інших видів енергії завдяки зручності її виробництва, передачі, керуванню, екологічності та ін. Її використовують у промисловості, сільському господарстві, транспорті,

побуті, соціальній сфері тощо. Без електрики неможливі успіхи в медицині, біології, екології інших галузях науки.

Навчальний посібник підготовлено відповідно до програми навчальної дисципліни “Електротехніка та електропостачання” для студентів вищих навчальних закладів, які навчаються за освітньо-кваліфікаційним рівнем бакалавра за галуззю знань 18 «Виробництво та технології» спеціальності 185 «Нафтогазова інженерія та технології» денної та заочної форм навчання.

Навчальний посібник «Електротехніка та електропостачання» призначений допомогти студентам в опануванні законів електричних, магнітних та електромагнітних процесів, отриманні теоретичних та практичних знань з використання електричної енергії в техніці.

Основним призначення посібника є необхідність дати студентам основи знань у галузі сучасних систем електротехніки, електроприводу та електропостачання об'єктів нафтогазової промисловості.

В результаті вивчення курсу студенти повинні знати призначення, технічні характеристики, склад, принцип дії різних електричних машин, електрообладнання та приладів вимірювальної техніки; методи розрахунку типових електроприводів та систем електропостачання. Студенти повинні вміти аналізувати режими роботи електричних машин, розраховувати й вибирати прості електричні та електромеханічні пристрої і системи; розраховувати типові системи електропостачання; проводити експериментальні дослідження з використанням різної вимірювальної апаратури.

Матеріали посібника систематизовано у 14 тем. Лаконічність і доступність наведеного матеріалу дозволить без будь-яких зусиль усвідомити проблемний характер окремих положень предмету.

Матеріал, викладений у посібнику, дозволить активізувати пізнавальну діяльність при вивченні дисципліни, а також вивільнити час для практичної підготовки.

# ТЕМА 1: ОСНОВНІ ПОНЯТТЯ ТА ЗАКОНИ ЕЛЕКТРОТЕХНІКИ. ЕЛЕКТРИЧНІ КОЛА ПОСТІЙНОГО СТРУМУ

## 1.1 Основні поняття електротехніки

**Електротехніка** – галузь науки і техніки, що вивчає питання отримання, розподілу і споживання електричної енергії.

### **Переваги електричної енергії:**

1. Електроенергія універсальна, тому що легко перетворюється в інші види енергії (теплову або механічну).

2. Можливість економічної передачі електроенергії на великі відстані, простота розподілу між різноманітними споживачами.

3. Екологічність, надійність, відносна простота обслуговування, постійна готовність до роботи, високі техніко-економічні показники електричних машин і апаратів електроустановок.

**Напруга (U)** – енергія, яку витрачає кожний електричний заряд у приймачі електричної енергії. Одиниця виміру Вольт (В).

**ЕРС (електрорушійна сила) (E)** – енергія, яку одержує кожний електричний заряд у джерелі електричної енергії. Одиниця виміру Вольт.

**Струм (I)** – спрямований рух носіїв електричних зарядів. Одиниця виміру Ампер (А).

Схеми заміщення реальних електротехнічних пристроїв подаються за допомогою трьох ідеальних елементів, які позначають  $R$ ,  $L$  і  $C$ .

**Опір (R)** – характеризує спроможність елемента перетворювати енергію на тепло. Опір вимірюється в Омах (Ом). **Електрична провідність (G)** є величиною, оберненою опору. Одиниця виміру провідності – Сіменс (См).

**Індуктивність (L)** характеризує спроможність елемента збуджувати магнітне поле. Індуктивність вимірюється в Генрі (Гн).

**Ємність (C)** характеризує спроможність елемента накопичувати електричні заряди. Ємність вимірюється в фарадах (Ф).

**Електричний ланцюг** – сполучення елементів або приладів, призначених для генерування, передачі і використання електроенергії. Основними елементами електричного ланцюга є джерела, приймачі і єднальні проводи.

**Джерела** – прилади, що перетворюють енергію будь-якого роду в електричну. До них відносяться генератори, акумулятори, термоелементи, фотоелементи, сонячні батареї.

**Приймачі** – в них електрична енергія перетворюється в інші види енергії. Це електродвигуни, електронагрівачі, освітлювальні прилади і т. п.

Графічне зображення електричного ланцюга називається **електричною схемою**. В ланцюг включаються активні і пасивні елементи ланцюга. **Активні** елементи – це джерела ЕРС, струму, напруги.

**Пасивні** елементи - споживачі електричної енергії.

**Лінійними** називають ланцюги, електричні опори, індуктивності і ємності елементів яких не залежать від значень або від напрямлення струмів і напруги в ланцюзі. Залежність струму від напруги має назву **вольтамперної характеристики (ВАХ)** ланцюга.

## **1.2 Закони електротехніки**

Зв'язок між струмом і напругою ідеального резистивного елемента  $R$  описується **законом Ома**:

$$u = R i, \text{ або } i = u/R.$$

Сила струму  $i$  в однорідній ділянці кола прямо пропорційна напрузі  $u$ , яку прикладено до ділянки і обернено пропорційна характеристикі ділянки, яку називають електричним опором провідника  $R$ .

Для одноконтурного кола, яке містить джерело електричної енергії з електрорушійною силою (ЕРС)  $E$  та внутрішнім опором  $R_0$ , споживача електричної енергії з опором  $R$  та з'єднуючої лінії з опором  $R_n$  (опором з'єднуючої лінії зазвичай нехтують), електрорушійна сила  $E$  викликає струм того ж напрямку, який визначають за законом Ома:

$$I = \frac{E}{R + R_n + R_0}.$$

Струм в лінійному одноконтурному електричному колі прямо пропорційний ЕРС джерела і обернено пропорційний загальному опору кола.

**Закони Кірхгофа.** Перший закон Кірхгофа формулюють двояко:

1. Алгебраїчна сума струмів у будь-якому вузлі електричного кола дорівнює нулю (при цьому струми направлені у вузол враховують з одним знаком, а від вузла – з протилежним):  $\Sigma I = 0$ .

2. Сума струмів, що направлені у будь-який вузол електричного кола, дорівнює сумі струмів, що направлені від вузла.

Другий закон Кірхгофа також формулюється двояко:

1. Алгебраїчна сума ЕРС, які діють в будь-якому контурі електричного кола, дорівнює алгебраїчній сумі падіння напруг на всіх опорах цього контуру:  $\Sigma E = \Sigma IR$ . (коли обчислюються  $\Sigma E$ ,  $\Sigma IR$  зі знаком "+" враховують складові, яких напрямки ЕРС  $E$  і струму  $I$  співпадає з напрямком обходу контуру).

2. Алгебраїчна сума напруг, які діють у будь-якому контурі електричного кола, дорівнює нулю:  $\Sigma U = 0$ .

Для оцінки енергетичних умов в електричних колах важливо знати, як швидко виконується робота. Відношенням роботи  $A$  до відповідного проміжку часу  $t$  визначають потужність. Одиницею виміру потужності в системі СІ є *ват* (Вт)

$$P = A/t = UI = R I^2.$$

### 1.3 Електричні кола постійного струму

**Режими роботи джерела електричної енергії.** В залежності від опору споживача  $R$ , розрізняють такі режими роботи джерела напруги: неробочого ходу, номінальний, короткого замикання та узгоджений.

Режим **неробочого (холостого)** ходу встановлюється, якщо вимкнути опір  $R$  або ввімкнути безмежно великий опір. При цьому струм  $I=0$ , тобто струму в колі не буде, а напруга між затискачами джерела стане максимальною:  $U_n = \varphi_1 - \varphi_2 = E$ .

**Номінальним** називають такий режим роботи, на який розраховують коло. У цьому режимі опір споживача має номінальне значення  $R=R_n$ . Відповідно будуть номінальними струм  $I_n$ , напруга  $U_n$  та потужності джерела  $P_{1n}=EI_n$  і споживача:  $P_{2n}=U_n I_n$ .

Режим **короткого замикання** виникає, коли  $R=0$ . Це аварійний режим, що виникає внаслідок пошкодження ізоляції чи з інших причин. Струм у колі обмежується тільки внутрішнім опором джерела  $R_0$  і зазвичай перевищує в десятки разів номінальний струм:  $I_{кз}=E/(R_0+0)=E/R_0$ ;  $I_{кз} \gg I_n$ . В цьому випадку напруга між затискачами джерела  $U_n$  та потужність споживача  $P_2$  знижуються до нуля, але в коло надходить від джерела найбільша потужність  $P_1=EI_{кз}$ , що затрачується на нагрівання з'єднуючих проводів.

Погодженим режимом роботи кола називають такий режим, при якому опір споживача дорівнює внутрішньому опору джерела  $R=R_0$ . У цьому режимі потужність споживача дорівнює половині потужності джерела. Це означає, що половина потужності джерела перетворюється в теплову енергію на його внутрішньому опорі.

**Прості та складні електричні кола.** Електричні кола прийнято поділяти на прості та складні. Прості електричні кола мають лише одне джерело енергії і будь-яку кількість послідовно або паралельно з'єднаних споживачів енергії (елементів електричного кола), які можна звести поступовим перетворенням до одного еквівалентного. Простому колу відповідають схеми заміщення, які містять джерело енергії і еквівалентний опір кола,  $R=R_{ЕК}$ .

В послідовно з'єднаних елементах кола завжди один і той самий струм  $I$  (рис. 1.1).

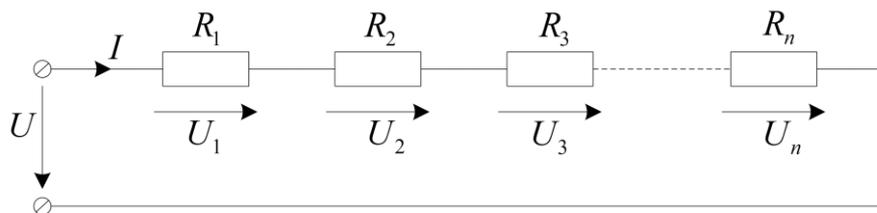


Рис. 1.1 Послідовне електричне коло

Згідно до другого закону Кірхгофа, маємо:

$$U = U_1 + U_2 + U_3 + \dots + U_n = R_1 \cdot I + R_2 \cdot I + R_3 \cdot I + \dots + R_n \cdot I = \\ = (R_1 + R_2 + R_3 + \dots + R_n) \cdot I = R_{EK} \cdot I, \text{ де}$$

$$R_{EK} = \sum_{i=1}^n R_i .$$

**Висновок:** при послідовному з'єднанні еквівалентний опір дорівнює сумі з'єднаних опорів.

Паралельне – це таке з'єднання елементів кола, коли вони ввімкнені до однієї пари вузлів і, таким чином, знаходяться під однаковою напругою, рис. 1.2.

Згідно до першого закону Кірхгофа маємо:

$$I = I_1 + I_2 + I_3 + \dots + I_n = \frac{U}{R_1} + \frac{U}{R_2} + \frac{U}{R_3} + \dots + \frac{U}{R_n} = \\ = \left( \frac{1}{R_1} + \frac{1}{R_2} + \frac{1}{R_3} + \dots + \frac{1}{R_n} \right) \cdot U = (g_1 + g_2 + g_3 + \dots + g_n) \cdot U = g_{EK} \cdot U, \text{ де}$$

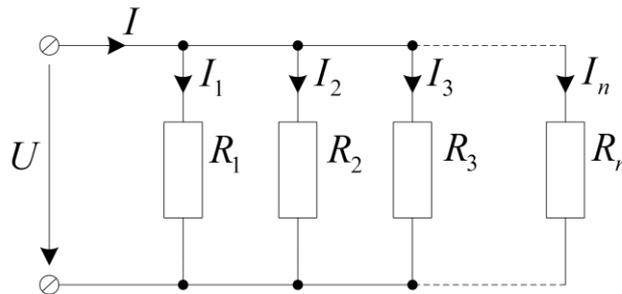


Рис. 1.2 Паралельне електричне коло

$$g_{EK} = \sum_{i=1}^n \frac{1}{R_i} .$$

**Висновок:** при паралельному з'єднанні еквівалентна провідність  $g_{EK}$  дорівнює сумі провідностей з'єднаних опорів.

Сукупність послідовного і паралельного з'єднань елементів називають змішаним з'єднанням.

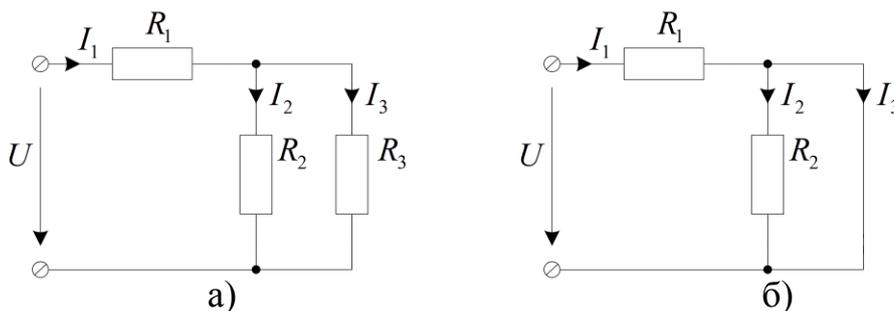


Рис. 1.3 Змішане з'єднання елементів кола

Якщо обчислюються струми в двох паралельно з'єднаних гілках (рис. 1.3, а), зручно користуватися формулами "чужого опору", які легко виводяться за законом Ома і першим законом Кірхгофа:

$$I_2 = I_1 \cdot \frac{R_3}{R_2 + R_3}, \quad I_3 = I_1 \cdot \frac{R_2}{R_2 + R_3}.$$

Коли в одній гілці опір відсутній, наприклад у схемі рис. 1.3, б  $R_3 = 0$ , тоді формули "чужого опору" набувають вигляду:

$$I_2 = I_1 \cdot 0 = 0, \quad I_3 = I_1 \cdot \frac{R_2}{R_2 + 0} = I_1.$$

Для зменшення кількості гілок або вузлів у схемі застосовують еквівалентні перетворення, що веде до зменшення числа розрахункових рівнянь і скорочення обчислювальної роботи.

**Баланс потужностей.** Суть балансу потужностей: сума потужностей, що генеруються джерелами енергії, дорівнює сумі потужностей, які споживаються приймачами енергії і потужностей втрат на внутрішніх опорах джерел.

Баланс потужностей описують рівнянням:

$$\sum EI + \sum UJ = \sum rI^2,$$

де  $E \cdot I$  – потужності джерел напруги (якщо напрями ЕРС і струму в гілці збігаються, джерело працює як генератор, тобто віддає енергію в коло і у рівняння балансу входить зі знаком "+", а якщо напрямки ЕРС і струму в гілці протилежні, джерело споживає енергію з кола і у рівняння балансу входить із знаком "-");

$UJ$  – потужності джерел струму ( $U$  – напруга на його затискачах);

$rI^2$  – потужності споживачів електричної енергії.

## ТЕМА 2: ЛІНІЙНІ ОДНОФАЗНІ КОЛА ЗМІННОГО СТРУМУ

### 2.1 Поняття та характеристики змінного струму

**Змінним** називають струм, який змінюється в часі за законом синуса (синусоїдальний струм). Доцільність застосування синусоїдального струму полягає в наступному:

- 1) ККД генераторів, двигунів, трансформаторів і ліній передач – максимальний;
- 2) Значно спрощено розрахунок електричних ланцюгів;
- 3) При інших формах струму внаслідок ЕРС самоіндукції можуть виникати значні втрати енергії на окремих ділянках.

Розглянемо процес обертання рамки в магнітному полі постійного магніту (рис.2.1):

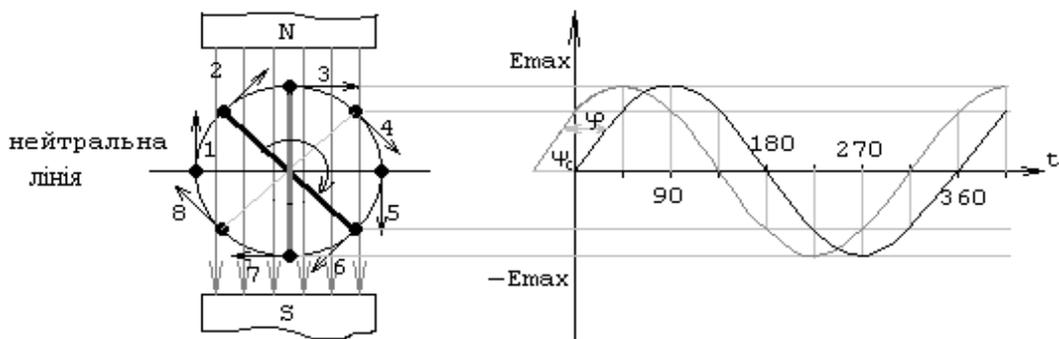


Рис.2.1 Процес створення змінного струму

При рівномірному обертанні рамки в однорідному й рівномірному магнітному полі у ній по закону електромагнітної індукції буде виникати ЕРС, яка змінюється в часі за законом синуса. При куті повороту  $\alpha = 90^\circ$  значення цієї ЕРС буде максимальним. В загальному випадку рівняння миттєвих синусоїдальних електричних величин мають вигляд:

$$\begin{aligned}e &= E_m \cdot \sin(\omega \cdot t + \psi_e) ; \\i &= I_m \cdot \sin(\omega \cdot t + \psi_i) ; \\u &= U_m \cdot \sin(\omega \cdot t + \psi_u),\end{aligned}$$

де  $e$ ,  $i$ ,  $u$  – миттєві значення ЕРС, струму і напруги в даний момент часу  $t$ ;

$E_m$ ,  $I_m$ ,  $U_m$  – їх амплітудні (максимальні за період) значення.

**Кутова частота  $\omega$**  – це швидкість зміни змінної величини, де шлях, пройдений цією змінною, виражений в радіанах:

$$\omega = \frac{\alpha}{t} = \frac{2 \cdot \pi}{T} = 2 \cdot \pi \cdot f \quad \left( \frac{\text{рад}}{\text{сек}} \right).$$

**Фазою** називається кут  $(\omega t + \psi_e)$ , що характеризує значення електричної величини в даний момент часу  $t$ .

**Початковою фазою** називається кут  $\psi_e$ , що визначає значення фази синусоїдальної величини в початковий момент часу ( $t=0$ ). Початкова фаза  $\psi$  – це постійний кут, на який синусоїда своїм початком зміщена відносно початку координат ліворуч ( $\psi > 0$ ) або праворуч ( $\psi < 0$ ).

**Зсувом фаз**  $\phi$  називається різниця початкових фаз двох будь-яких синусоїдальних величин однієї частоти.

**Періодом T** називається час, за який змінна величина здійснить повне коливання.

**Частота** – число періодів за одиницю часу, ця величина зворотно пропорційна періоду:

$$f = \frac{1}{T} \quad \begin{array}{l} \text{країни СНД, Європа} - f = 50 \text{ Гц;} \\ \text{США, Канада} - f = 60 \text{ Гц.} \end{array}$$

Для оцінки енергетичної дії синусоїдального струму (наприклад, теплового або електродинамічного) використовують поняття діючого значення струму.

**Діючим** значенням змінного струму називається середньоквадратичне значення за період. Воно по силі рівне постійному струму, що в опорі R за той же час здійснює таку ж роботу, що і даний змінний струм. Діюче значення струму розраховують по формулі (аналогічно для ЕРС і напруги):

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

$$U = \sqrt{\frac{1}{T} \cdot \int_0^T u^2 dt} \quad .$$

Для синусоїдального струму діюче значення в  $\sqrt{2}$  разів менше, ніж амплітудне значення  $I_m$  (аналогічно для ЕРС і напруги):

$$\begin{aligned} I_{sin} &= I_m / \sqrt{2} \approx 0.707 I_m \quad , \\ E_{sin} &\approx 0,707 E_m \quad , \\ U_{sin} &\approx 0,707 U_m \quad . \end{aligned}$$

Також визначають наступні параметри електричних сигналів як синусоїдальної, так і несинусоїдальної форми:

– постійну складову сигналу – **середнє значення** за період T

$$U_{cep} = U_o = \frac{1}{T} \int_0^T u(t) dt;$$

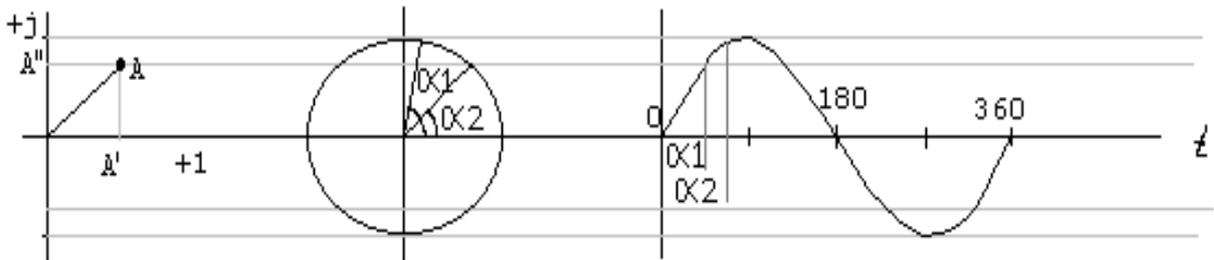
– **середньовипрямлене** значення сигналу за період – середнє значення модуля сигналу (таке значення використовують лише для сигналів, симетричних відносно вісі часу)

$$U_{cep.в} = \frac{1}{T} \cdot \int_0^T |u(t)| dt.$$

## 2.2 Комплексний метод аналізу і розрахунку ланцюгів синусоїдального струму

Цей метод також називається символічним.

Він заснований на заміні синусоїдальних ЕРС, напруг і струмів комплексними векторами, що можуть бути записані в показовій, тригонометричній або алгебраїчній формах. Користуючись цим методом, оперують не з дійсними числами, а з їх комплексними векторами. Якщо обертати вектор довжиною  $A$ , починаючи від дійсної осі, проти стрілки годинника, то можна отримати малюнок:



Комплексне число  $A$  виражається алгебраїчно у вигляді суми дійсної  $A'$  та уявної  $A''$  частин, які є координатами точки  $A$  на комплексній площині.

$$A = A' + jA'' \quad \text{– алгебраїчна форма.}$$

**Тригонометрична форма**

$$A = A (\cos \alpha \pm j \sin \alpha).$$

**Показова форма**

$$A = A e^{j\alpha},$$

Тут  $A$  – модуль (довжина) вектору,

$e$  – основа натурального логарифма,

$\alpha$  – кут між дійсною віссю і вектором, що зображує комплексне число:

$$\alpha = \arctg(A''/A'),$$

$j$  – уявна одиниця, поворотний множник.

Множення на  $j$  рівносильне повороту вектору на кут  $90^\circ$  проти годинникової стрілки.

$$j^0 = 1; \quad j^1 = \sqrt{-1}; \quad j^2 = -1; \quad j^3 = j^2 \cdot j = -j.$$

Для комплексних чисел застосовують всі основні математичні дії: додавання, віднімання, множення, ділення, піднесення до ступеня, витяг коренів.

**Додавання і віднімання** чисел проводиться тільки в алгебраїчній формі, потрібно скласти (відняти) окремо їхні дійсні і уявні частини.

$$(A_1 + j B_1) + (A_2 + j B_2) = (A_1 + A_2) + j (B_1 + B_2),$$

$$(A_1 + j B_1) - (A_2 + j B_2) = (A_1 - A_2) + j (B_1 - B_2).$$

**Множення** комплексних чисел в алгебраїчній формі проводиться як два біному:

$$A \cdot B = (A_1 + jA_2) \cdot (B_1 + jB_2) = A_1 \cdot B_1 - A_2 \cdot B_2 + j A_1 \cdot B_2 + A_2 \cdot B_1 .$$

Значно простіше проводити множення в показовій формі:

$$A \cdot B = A e^{j\alpha} \cdot B e^{j\beta} = A \cdot B e^{j(\alpha+\beta)}$$

**Ділення** також можна поводити у двох формах:

$$\frac{A}{B} = \frac{(A_1 + jA_2)}{(B_1 + jB_2)} \cdot \frac{(B_1 - jB_2)}{(B_1 - jB_2)} = \frac{(A_1 + jA_2)(B_1 - jB_2)}{B_1^2 + B_2^2} = C_1 + jC_2.$$

Простіше ділити в показовій формі:

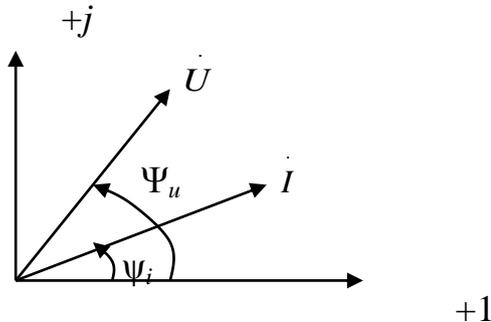
$$\frac{A}{B} = \frac{A e^{j\alpha}}{B e^{j\beta}} = \frac{A}{B} \cdot e^{j(\alpha-\beta)}$$

### 2.3 Подання синусоїдальних електричних величин комплексними числами

Синусоїдальний струм і напруга в момент часу  $t=0$  можуть бути представлені векторами  $I_m$  та  $U_m$  на комплексній площині. Комплексна амплітуда струму і напруги в показовій формі:

$$\dot{I} = I_m \cdot e^{j\psi_i}, \quad \dot{U} = U_m \cdot e^{j\psi_u},$$

де  $I_m, U_m$  – модулі струму та напруги;  
 $\psi_i, \psi_u$  – початкова фаза для  $t = 0$ .



Різниця початкових фаз синусоїдальних напруги і струму є різницею аргументів комплексних чисел  $\varphi = \psi_u - \psi_i$ .

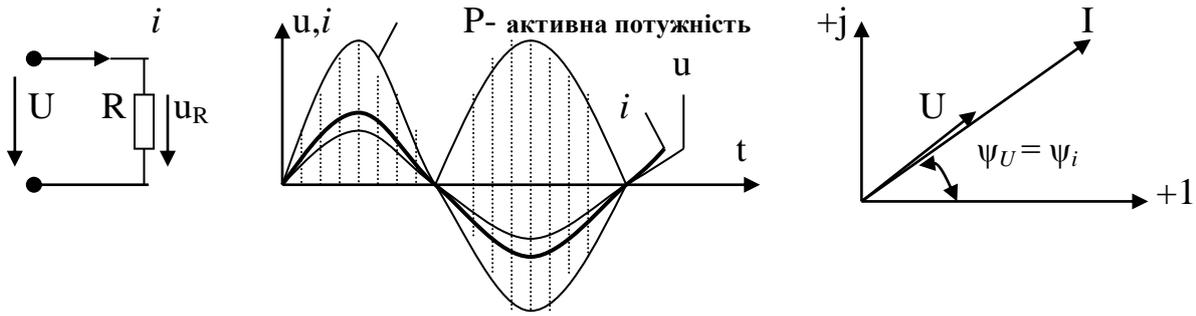
При розрахунках звичайно користуються комплексними діючими струмом і напругою.

$$\dot{I} = \frac{I_m}{\sqrt{2}} \cdot e^{j\psi_i} = I \cdot e^{j\psi_i} ; \quad \dot{U} = \frac{U_m}{\sqrt{2}} = U \cdot e^{j\psi_u}$$

### 2.4 Аналіз ланцюгів змінного струму

#### **2.4.1 Ланцюг з активним опором**

Розглянемо роботу ідеалізованого ланцюга, в якого навантаженням є змінний опір  $R$  (рис.2.2)



Ланцюг

Графік зміни струму й напруги

Векторна діаграма

Рис.2.2 Характеристики ланцюга з активним опором

Якщо до полюсів джерела з напругою  $U=U_m \sin(\omega t + \psi_U)$  підключити резистивний елемент з активним опором  $R$ , то за законом Ома в ланцюзі створюється струм:

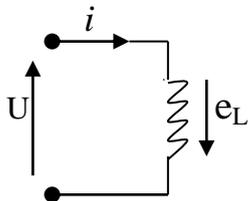
$$i = \frac{u}{R} = \frac{U_m}{R} \cdot \sin(\omega t + \psi_U) = I_m \sin(\omega t + \psi_i),$$

таким чином в ланцюзі змінного струму з активним опором струм змінюється за тим же законом, що й напруга, і вони збігаються по фазі (зсув фаз  $\varphi=0$ ).

В комплексній формі:

$$\dot{U} = U e^{j\psi_U}; \quad \dot{I} = \frac{U}{R} \cdot e^{j\psi_U} = I e^{j\psi_i}.$$

#### 2.4.2 Ланцюг з індуктивністю



Розглянемо ідеальну котушку з активним опором  $R=0$ . В ній створюється змінна ЕРС самоіндукції  $e_L = -L \frac{di}{dt}$ , що перешкоджає зміні струму, котрий її викликав (рис.2.3). Співвідношення між миттєвими значеннями електричних величин в ланцюзі змінного струму з ідеальною індуктивною котушкою визначається 2 законом Кірхгофа і законом електромагнітної індукції:

$$u = u_L = -e_L = L \frac{di}{dt}.$$

Ця рівність показує, що в ідеальній котушці прикладена змінна напруга  $u=u_L$  і ЕРС самоіндукції  $e_L$  в будь-який момент часу однакові, але направлені зустрічно, тобто знаходяться в протифазі. Напруга пропорційна диференціалу від струму, таким чином, якщо струм змінюється за законом  $i = I_m \sin \omega t$ , то напруга буде рівна  $u = U_m \sin(\omega t + 90^\circ)$ .

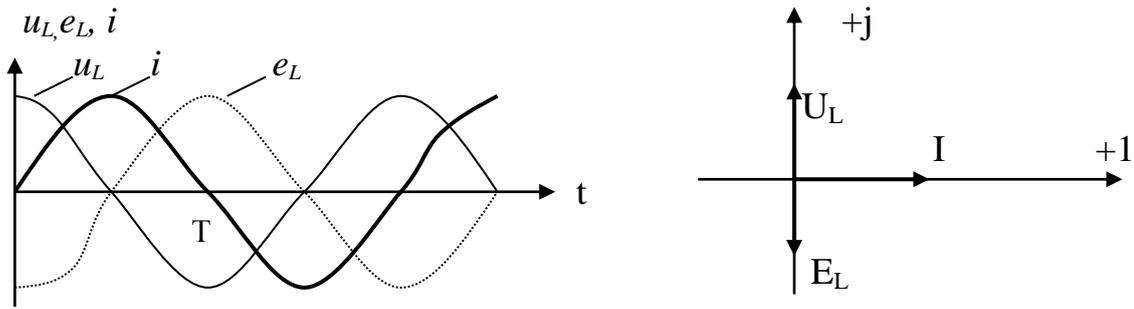


Рис.2.3 Характеристики ланцюга з індуктивним опором

Таким чином, в ланцюзі з ідеальною індуктивністю вектор струму відстає від вектору напруги на кут  $90^\circ$ .

Діюче значення змінного струму

$$I = U_L / (L\omega) = U_L / X_L$$

Отриманий вираз нагадує закон Ома для ланцюга постійного струму.

У цій рівності величина  $X_L$  називається **індуктивним опором** або реактивним опором індуктивності

$$X_L = 2\pi fL = \omega L.$$

Комплексні напруги і струм зв'язані співвідношенням:

$$\dot{U}_L = U_L e^{j(\psi+90)} = X_L e^{j\psi} I e^{j90} = jX_L I,$$

де  $jX_L = j\omega L$  називаються комплексним індуктивним опором.

В ланцюзі з ідеальною  $L$  відбувається періодичний обмін енергією між джерелом і магнітним полем без перетворення в теплову або механічну енергію. Швидкість обміну оцінюється реактивною потужністю, що рівна

$$Q_L = I^2 X_L \text{ [вар]}.$$

### 2.4.3 Ланцюг з ємністю

В реальному конденсаторі, що ввімкнений на синусоїдальну напругу, є втрати енергії в діелектрику. Однак, на промисловій частоті 50 Гц вони відносно малі і ними зазвичай нехтують, вважаючи, що конденсатор характеризується лише ємністю  $C$ .

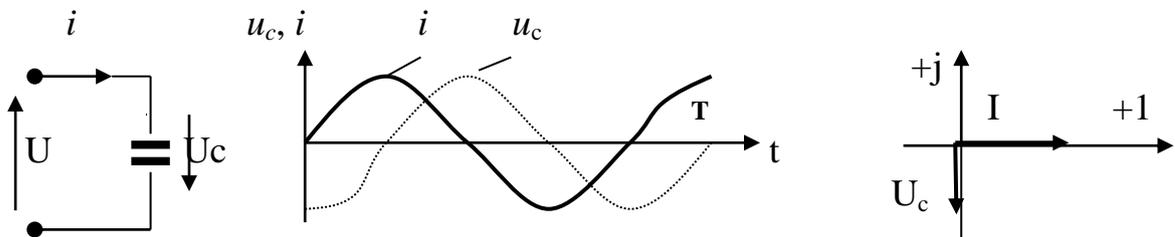


Рис.2.3 Характеристики ланцюга з ємнісним опором

Якщо конденсатор ввімкнути в коло з синусоїдальною напругою  $u = U_m \sin \omega t$ , то він буде перезаряджатися в такт зміни поданої напруги ( $U_c = U$ ). Перезаряд супроводжується появою в ланцюзі синусоїдального

струму  $i$ , контур якого замикається в діелектрикові конденсатора струмом зміщення, рівним струму провідності. Струм в колі змінюється за законом:

$$i = C du_c/dt = \omega C U_m \cos \omega t = I_m \cos \omega t.$$

Таким чином в ланцюзі з ідеальною ємністю вектор струму випереджає вектор напруги на кут  $90^\circ$  або чверть періоду.

Величина  $X_c = 1/\omega C$  називається **ємнісним опором** або реактивним опором конденсатора.

$$X_c = \frac{1}{\omega C} = \frac{1}{2\pi f C}.$$

Комплексні напруга і струм в такому ланцюзі зв'язані співвідношенням:

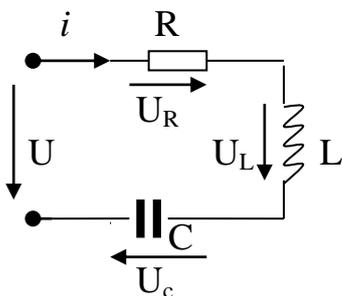
$$I = I e^{j(\psi_u + 90^\circ)} = \frac{U_c}{X_c} \cdot e^{j\psi_u} \cdot e^{j90^\circ} = j \frac{U_c}{X_c}, \quad U_c = -j X_c I.$$

В комплексній формі опір конденсатора записують таким чином

$$X_c = -j \frac{1}{\omega c} = \frac{1}{j\omega c}.$$

В ланцюзі з ємністю відбувається тільки періодичний обмін енергією без перетворення енергії джерела в теплову або механічну.

#### 2.4.4 Послідовне з'єднання елементів R, L, C. Резонанс напруг



Згідно 2 закону Кірхгофа при послідовному з'єднанні елементів мають місце такі співвідношення для миттєвих, діючих значень та комплексів напруг

$$\begin{aligned} u &= u_R + u_L + u_C, \\ U &= U_R + U_L + U_C, \\ \dot{U} &= \dot{U}_R + \dot{U}_L + \dot{U}_C. \end{aligned}$$

Якщо комплекси напруг  $\dot{U}_R, \dot{U}_L, \dot{U}_C$  замінити добутками комплексів опорів ділянок кола і струму, то рівняння можна записати у такому вигляді :

$$\dot{U} = R\dot{i} + jX_L\dot{i} - jX_C\dot{i} = [R + j(X_L - X_C)] \cdot \dot{i} = Z\dot{i},$$

де  $Z = R + j(X_L - X_C)$  – повний опір кола;

$R$  - активний опір;

$X_L$  - індуктивний опір;  $X_C$  - ємнісний опір.

Величину  $jX = j(X_L - X_C)$  називають реактивним опором кола.

У колі з послідовним з'єднанням резистора, котушки індуктивності і конденсатора можуть бути три варіанти співвідношень індуктивного і ємнісного опорів:

$X_L > X_C$  - активно-індуктивний характер кола;

$X_L < X_C$  - активно-ємнісний характер кола;

$X_L = X_C$  - чисто активний характер кола, резонанс напруг.

Векторні діаграми напруг, що відповідають трьом зазначеним випадкам, представлені на рис. 2.4.

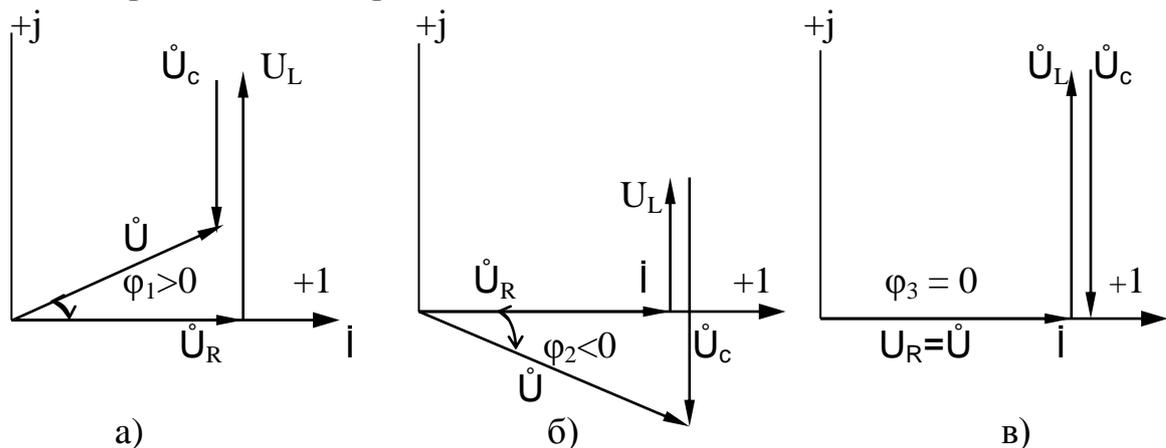


Рис.2.4 Векторні діаграми

Із векторних діаграм видно, що вектор струму  $i$  відстає на кут  $\varphi_1$  від вектора напруги  $\dot{U}$  при  $X_L > X_C$  (рис. а), випереджає напругу на кут  $\varphi_2$  при  $X_L < X_C$  (рис. б) і збігається за напрямом  $\varphi_3 = 0$  при  $X_L = X_C$  (рис. в).

Явище, при якому в послідовному колі реактивні опори рівні, а вектор напруги і струму збігається по фазі  $\varphi = 0$ , називається **резонансом напруги**.

При резонансі напруги  $X_L = X_C$ ;  $Z = R$ ;  $U_L = U_C$ ;  $\varphi = 0$ ;  $\cos \varphi = 1$ .

Таким чином, при резонансі напруг повний опір рівний активному і є мінімально можливим.

$$Z_{рез} = \sqrt{R^2 + (X_L - X_C)^2} = R = Z_{min}$$

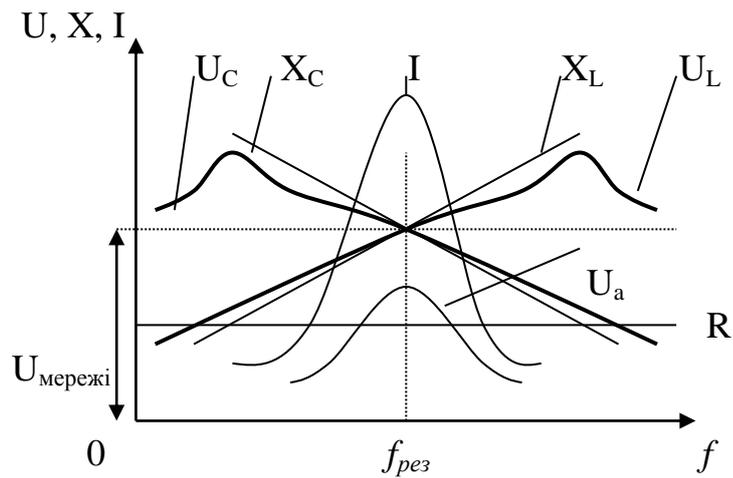
Струм в ланцюзі

$$I_{рез} = \frac{U}{Z_{рез}} = \frac{U}{R} = I_{max}; \quad \cos \varphi = 1; \quad \varphi = 0.$$

Важлива ознака резонансу напруг – максимально можливий в даному ланцюзі струм.

Якщо опори  $X_{Lрез} = X_{Cрез} \gg R$ , то напруги  $U_{Lрез} \approx U_{Cрез}$  будуть значно перевищувати загальну напругу  $U$ , прикладену до ланцюга.

Явище резонансу – небажане. Підвищення напруги може призвести до аварій (пробою ізоляції і наступному короткому замиканню).

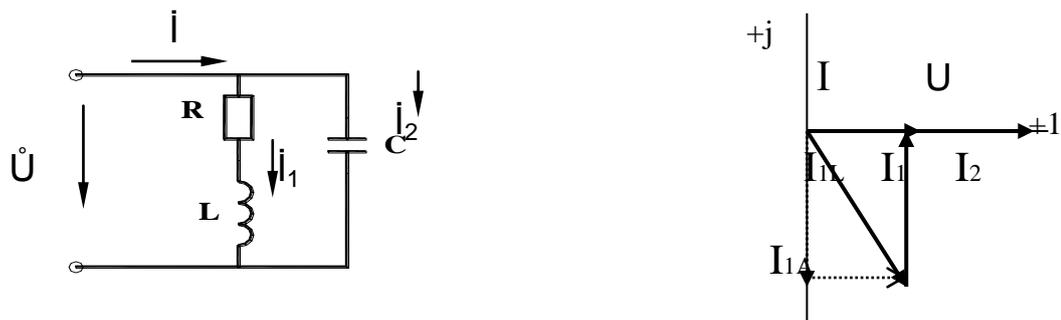


При незмінних параметрах  $L$  та  $C$  умову резонансу можна виконати зміною частоти струму. Резонансну частоту визначають

$$\omega L = 1/\omega C,$$

$$\omega_{рез} = 1/\sqrt{LC}.$$

#### 2.4.5 Паралельне з'єднання елементів $R, L, C$ . Резонанс струмів



При паралельному з'єднанні елементів рівняння за першим законом Кірхгофа для миттєвих, діючих значень та комплексів струмів мають вигляд:

$$i = i_1 + i_2,$$

$$I = I_1 + I_2,$$

$$\dot{I} = \dot{I}_1 + \dot{I}_2.$$

Значення струму першої і другої гілок за законом Ома визначимо як

$$I_1 = \frac{U}{\sqrt{R^2 + X_L^2}}; \quad I_2 = \frac{U}{X_C}.$$

З векторної діаграми видно, що вектор струму  $I_1$  відстає від прикладеної напруги на деякий кут  $\varphi_1$ , а вектор струму  $I_2$  випереджає прикладену напругу на кут  $\varphi_2 = 90^\circ$ , тому що має виключно ємнісний характер.

При рівності реактивної складової струму першої гілки і струму другої гілки ( $I_{1L} = I_2$ ) загальний струм, споживаний колом, стає рівним активній

складовій струму першої гілки  $I = I_{1A}$  і співпадає по фазі з напругою живлення кола.

Явище, при якому в колі з паралельно з'єднаними активно-індуктивним і ємнісним опорами реактивні провідності гілок рівні, а, отже, вектори струму і напруги збігаються по фазі, називається **резонансом струмів**.

При резонансі струмів коло являє собою виключно активний опір. Активна потужність  $P$ , споживана колом, дорівнює повній потужності, реактивна потужність  $Q$  дорівнює 0.

Умовою виникнення резонансу струмів є **рівність реактивних провідностей першої і другої гілки**  $B_1 = B_2$ , або

$$\frac{X_L}{\sqrt{R^2 + X_L^2}} = \frac{1}{X_C}.$$

При цьому  $\varphi=0$ ;  $\cos \varphi = 1$ .

Струми у гілках з реактивними елементами можуть значно перевищувати струм у нерозгалуженій ділянці кола, що представляє небезпеку для експлуатації електричних кіл.

В реальному коливальному контурі з рівності реактивних провідностей гілок можна отримати вираз резонансної частоти

$$f_{рез} = \frac{1}{2\pi\sqrt{LC}} \sqrt{1 - \frac{R^2}{L/C}},$$

таким чином резонанс струмів в контурі з  $R$  можливий лише за умови  $R < \sqrt{L/C}$ . Величина  $\sqrt{L/C}$  називається характеристичним опором ланцюга [Ом].

## **2.5 Потужність кола синусоїдного струму**

Миттєва потужність кола синусоїдного струму визначається добутком миттєвого струму та миттєвої напруги

$$P = i \cdot u.$$

Повна потужність у символічному вигляді визначається добутком комплексу напруги та **спряженого** комплексу струму

$$\underline{S} = \underline{U} \underline{I}^*.$$

В тригонометричній та алгебраїчній формах:

$$\underline{S} = S \cos \varphi + jS \sin \varphi = P + jQ,$$

де  $S = UI$  – модуль повної потужності, В·А,

$P = UI \cos \varphi$  – активна потужність, Вт,

$Q = UI \sin \varphi$  – реактивна потужність, вар.

Величина  $\cos \varphi$  називається **коефіцієнтом потужності**. Він характеризує ступінь використання електричної енергії, тобто ефективність роботи даного пристрою або системи:

$$\cos \varphi = \frac{P}{S} .$$

## 2.6 Підвищення коефіцієнта потужності

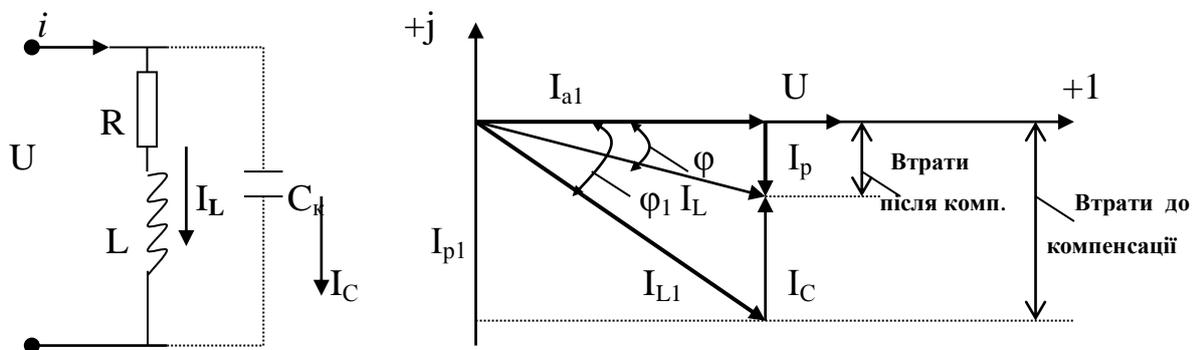
Значне зниження  $\cos \varphi$  в ланцюгах змінного струму призводить до небажаних наслідків – великого недовикористовування в електричних мережах встановленої потужності генераторів електростанцій і силових трансформаторів підстанцій. Номінальна активна (корисна) потужність прямо пропорційна коефіцієнту потужності  $\cos \varphi$ :

$$P_{ном} = U_{ном} I_{ном} \cos \varphi = S_{ном} \cos \varphi$$

$$I = \frac{P}{U \cos \varphi} .$$

Збільшення струму в навантаженні, викликане зменшенням  $\cos \varphi$  призводить до додаткових втрат електроенергії на нагрівання обмоток генераторів, трансформаторів, кабелів електричних мереж, таким чином знижується ККД системи.

Для підвищення  $\cos \varphi$  електроустановки часто до активно-індуктивного навантаження підключають паралельно компенсаційні батареї конденсаторів (ємностей).



Так як ємнісний струм  $I_C$  знаходиться у протифазі з індуктивною складовою струму котушки  $I_{p1}$ , то після підключення конденсатору ця реактивна складова зменшується до  $I_p$ , зменшується і кут  $\varphi_1$  до  $\varphi$ , тому підвищується  $\cos \varphi$  електроустановки. Таким чином частина реактивної потужності індуктивного навантаження компенсується ємнісним. На практиці досягається підвищення  $\cos \varphi$  до величин (0.9 - 0.95). Подальше підвищення  $\cos \varphi$  є економічно недоцільним.

## ТЕМА 3: ТРИФАЗНІ ЕЛЕКТРИЧНІ КОЛА

### 3.1 Основні поняття та властивості трифазних мереж

**Трифазна система** – сукупність трьох однакових по частоті і амплітуді змінних ЕРС, що мають зсув по фазі на  $120^\circ$  та створюваних спільним джерелом енергії.

#### Переваги трифазної системи

1. Можливість простого отримання електричного поля, що обертається і, завдяки цьому, трифазного асинхронного двигуна.

2. Менша витрата кольорового металу на проводи при передачі електроенергії на більші відстані (економія міді на 14% за рахунок виключення або зменшення перетину нейтрального проводу, а алюмінію, заліза – до 30%).

3. Можливість отримання в одній установці двох технологічно необхідних рівнів напруги.

Розрізняють симетричні та несиметричні трифазні системи.

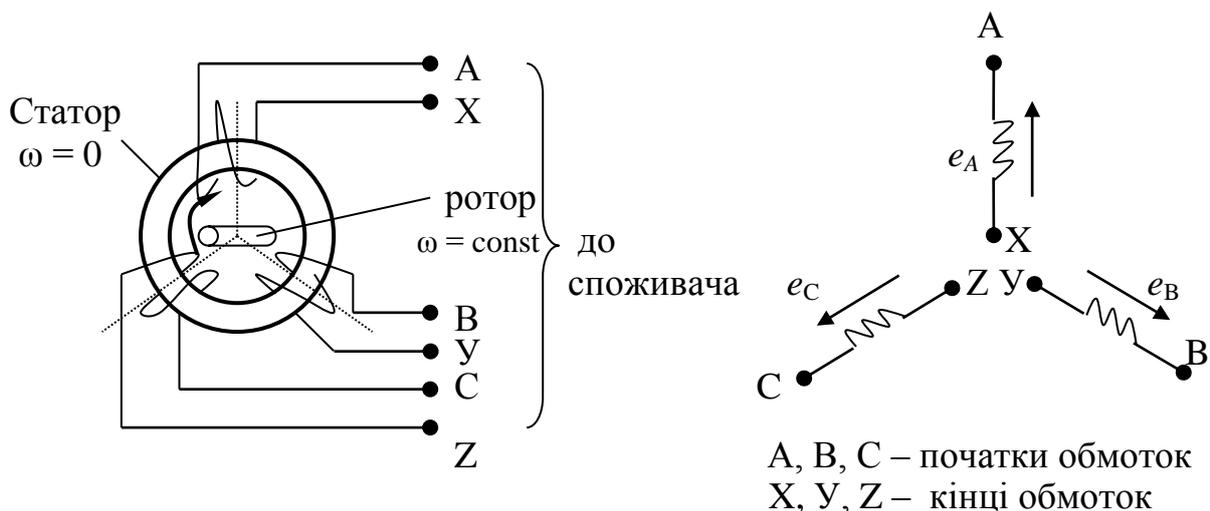
**Симетрична система** – система, у якої амплітуда і зсув фаз між ЕРС окремих обмоток однакові:

$$\alpha = \frac{2\pi}{m}, \text{ де } m - \text{число фаз; при } m=3 \text{ зсув } \alpha = 120^\circ.$$

**Несиметрична система** – система, у якої амплітуда або зсув фаз між ЕРС окремих обмоток неоднакові.

Трифазну систему ЕРС одержують в генераторах.

#### Умовні позначення обмоток



При обертанні ротора з постійною швидкістю  $\omega$  в обмотках статора, які розташовані під кутом  $120^\circ$ , наводиться синусоїдальна ЕРС. Приймавши ЕРС будь-якої фази (наприклад, фази А) за нульову при  $t=0$ , можна отримати рівняння миттєвих значень ЕРС для кожної фази

$$\begin{cases} e_A = E_m \sin \omega t, \\ e_B = E_m \sin(\omega t - 120^\circ), \\ e_C = E_m \sin(\omega t - 240^\circ), \end{cases}$$

де  $E_m$  – амплітудне значення ЕРС.

Для діючих значень ЕРС в комплексному вигляді:

$$E_A = E e^{j0};$$

$$E_B = E e^{-j120};$$

$$E_C = E e^{-j240} = E e^{j120}; \text{ тут } E = E_m / \sqrt{2} .$$

Графік зміни миттєвих ЕРС та векторна діаграма має вид (рис.3.1):

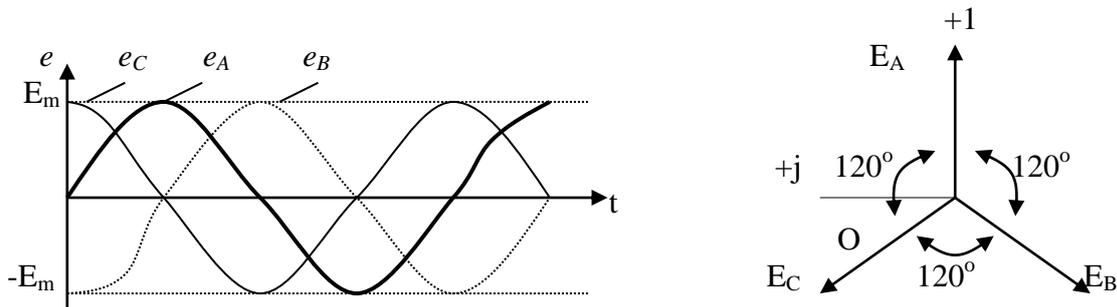


Рис. 3.1 Графік зміни ЕРС та векторна діаграма

Таким чином, трифазну систему можна представити як сукупність електрично зв'язаних між собою трьох однакових однофазних кіл змінного струму. Кожне з цих кіл називають **фазою**.

### Властивості трифазної системи

1) Алгебраїчна сума миттєвих значень ЕРС в будь-який момент часу рівна нулю:

$$e_A + e_B + e_C = 0 .$$

2) Геометрична сума комплексних ЕРС рівна нулю (при додаванні векторів на векторній діаграмі):

$$\vec{E}_A + \vec{E}_B + \vec{E}_C = 0 .$$

3) Алгебраїчна сума діючих значень рівна 0:

$$E_A + E_B + E_C = 0 .$$

4) Обертання векторів в послідовності

$E_A \rightarrow E_B \rightarrow E_C$  – називається прямою послідовністю,

$E_A \rightarrow E_C \rightarrow E_B$  – називається зворотною послідовністю.

Від порядку чергування фаз залежить напрямок обертання ротора електричної машини.

### Види навантажень трифазних систем

Навантаження (приймачі) електричної енергії бувають симетричними та несиметричними.

**Симетричне навантаження** – у якого комплексні опори всіх 3-х фаз однакові, для цього повинні виконуватися умови:

$$Z_A=Z_B=Z_C \text{ – опори фаз рівні,}$$

$$\cos \varphi_A = \cos \varphi_B = \cos \varphi_C \text{ – характер навантаження фаз однаковий.}$$

**Несиметричне навантаження** (нерівномірне) – навантаження, в якому є порушення цих умов. Причинами такого порушення може бути різний характер навантажень, обрив однієї з фаз, коротке замикання фази.

Трифазні системи з'єднуються „зіркою” та „трикутником”.

### 3.2 З'єднання фаз «зіркою»

При такому з'єднанні всі кінці обмоток генератора і приймача з'єднують в один вузол (нейтральна або нульова точка), а провід, що з'єднує нейтральні точки генератора та приймача, називається **нейтральним або нульовим**.

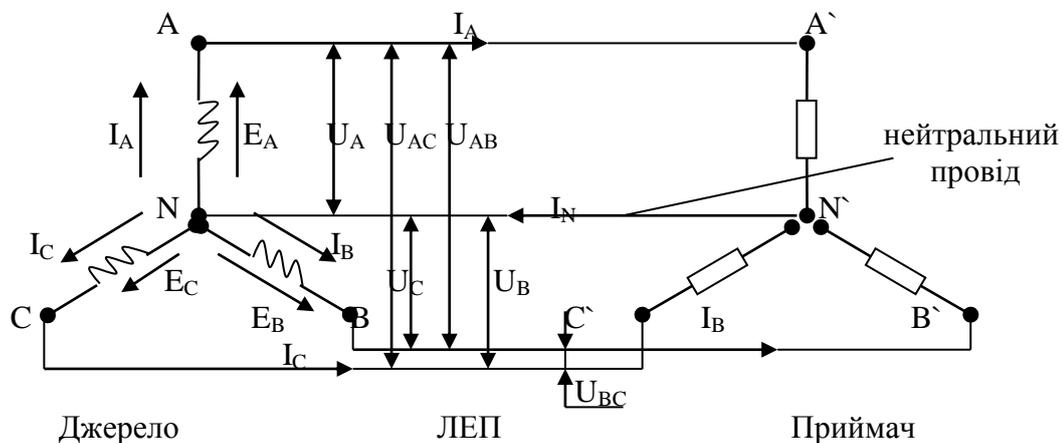


Рис. 3.2 З'єднання фаз «зіркою»

Провід, що з'єднує початки фаз джерела та приймача, має назву **лінійного проводу**. Струм у лінійних проводах називають **лінійним струмом** ( $I_A, I_B, I_C$ ). Струм у обмотках фаз або фазних навантаженнях – це **фазний струм**.

При симетричному навантаженні амплітуди струмів в усіх трьох фазах однакові, струми зсунуті по фазі на  $120^\circ$ , їх алгебраїчна сума в будь-який момент часу рівна 0:

$$i_A + i_B + i_C = i_N = 0,$$

$$I_A + I_B + I_C = I_N = 0 \text{ (діючі комплексні струми).}$$

Таким чином, якщо навантаження симетричне, струм у нейтральному проводі відсутній. Із схеми випливає, що для зірки завжди  $I_L = I_\phi$  (**лінійний струм дорівнює фазному**).

Напруга в генераторі (або навантаженні) між початком і кінцем фази обмотки має назву **фазної напруги** ( $U_A, U_B, U_C$ ). Також цю напругу можна визначити як напругу між лінійним та нульовим приводом.

Напруга між кінцями 2-х будь-яких фаз генератора або приймача має назву **лінійної напруги** ( $U_{AB}, U_{AC}, U_{BC}$ ). На лінії – це напруга між двома

лінійними проводами. Лінійні напруги є різницею відповідних фазних напруг:

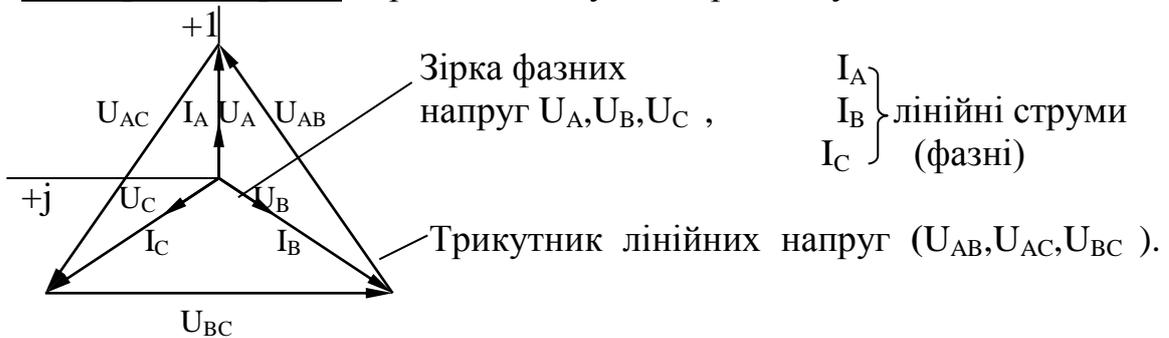
$$U_{AB} = U_A - U_B \quad U_{AC} = U_A - U_C \quad U_{BC} = U_B - U_C.$$

Фазні напруги зсунуті на третину періоду одна відносно одної.

При симетричному навантаженні

$$U_l = \sqrt{3} \cdot U_\phi.$$

**Векторна діаграма** при активному симетричному навантаженні:



При несиметричному навантаженні симетрія фазних напруг порушується незначно за наявності нульового проводу і сильно за його відсутності.

Струм за законом Кірхгофа:

$$I_N = I_A + I_B + I_C$$

Застосовують трипровідну та чотиріпровідну схему з'єднання приймачів зіркою. Трифазні приймачі, що мають гарантоване симетричне навантаження, умикають за трипровідною схемою (без нульового проводу). Звичайні приймачі електричної енергії умикаються за чотиріпровідною схемою. Нульовий провід забезпечує однакові фазні напруги на приймачах навіть при несиметричному навантаженні. При обриві нульового проводу може виникнути небажане явище – „перекіс фаз”, коли в деяких фазах буде підвищена, а в деяких – знижена напруга.

### 3.3 З'єднання фаз «трикутником»

При цьому обмотки фаз з'єднуються таким чином, щоб початок кожної наступної обмотки з'єднувався з кінцем попередньої.

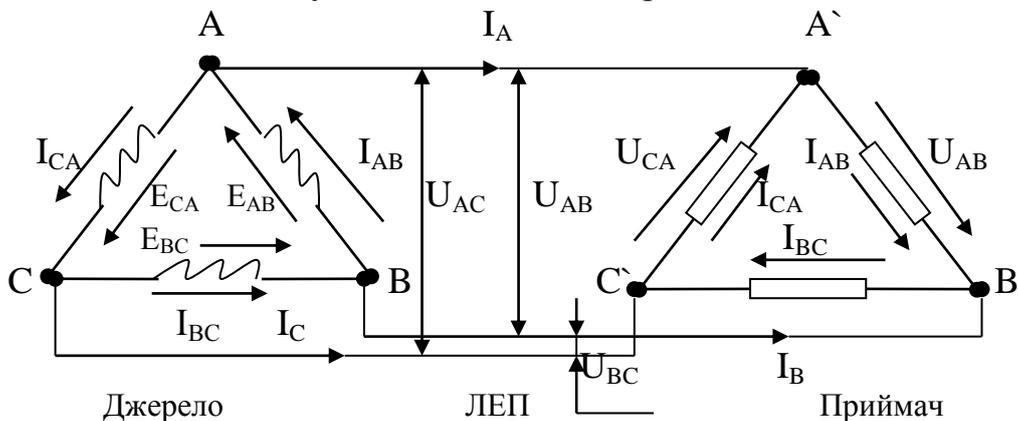


Рис. 3.3 З'єднання фаз «трикутником»

Із схеми з'єднання трикутником випливає, що лінійна напруга завжди є фазною напругою:

$$\begin{aligned} U_L &= U_\Phi, \text{ тобто} \\ U_{AB} &= U_A, \\ U_{BC} &= U_B, \\ U_{CA} &= U_C. \end{aligned}$$

За законом Кірхгофа лінійні струми зв'язані з фазними співвідношеннями:

$$\begin{aligned} I_A &= I_{AB} - I_{CA}, \\ I_B &= I_{BC} - I_{AB}, \\ I_C &= I_{CA} - I_{BC}. \end{aligned}$$

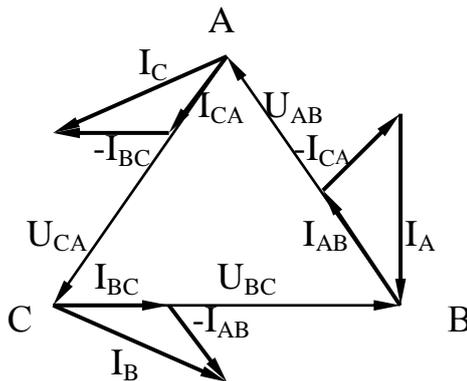
При симетричному навантаженні можна записати

$$I_L = \sqrt{3} \cdot I_\Phi$$

При з'єднанні трикутником завжди справедлива рівність

$$I_A + I_B + I_C = 0$$

**Векторна діаграма** при активному симетричному навантаженні:



При несиметричному навантаженні симетрія фазних і лінійних струмів порушується:

$$I_L \neq \sqrt{3} \cdot I_\Phi$$

Перевагою з'єднання трикутником є відсутність четвертого провода. Крім того, при такому з'єднанні явище перекосу фаз не виникає.

### **3.4 Потужність трифазної системи**

Повну потужність трифазного кола визначають як суму потужностей усіх фаз та потужності нейтрального проводу, тобто

$$S = S_A + S_B + S_C + S_N$$

Але потужністю, що виділяється у нейтральному проводі, зазвичай нехтують.

Потужність кожної фази у символічному вигляді визначається добутком комплексу напруги та спряженого комплексу струму

$$\underline{S} = \underline{U}_A \dot{I}_A^* + \underline{U}_B \dot{I}_B^* + \underline{U}_C \dot{I}_C^* .$$

Ця потужність складається з суми активних та реактивних потужностей кожної фази

$$\underline{S} = (P_A + P_B + P_C) + j(Q_A + Q_B + Q_C) .$$

Дійсна частина комплексу називається активною потужністю кола  $P$ , а уявна – реактивною потужністю  $Q$ .

Для симетричного навантаження можна записати спрощений вираз  $P = 3U_\phi I_\phi \cos \varphi = \sqrt{3} \cdot U_\ell I_\ell \cos \varphi$  – активна потужність, визначається у Вт.

$Q = 3U_\phi I_\phi \sin \varphi = \sqrt{3} \cdot U_\ell I_\ell \sin \varphi$  – реактивна потужність, визначається у вар.

$S = 3U_\phi I_\phi = \sqrt{3} \cdot U_\ell I_\ell$  – повна потужність, визначається у ВА.

Повна потужність пов'язана з активною та реактивною виразом:

$$S = \sqrt{P^2 + Q^2} .$$

Співвідношення для потужності (активної, реактивної чи повної) не залежать від виду з'єднання – зірка або трикутник. Але з цих формул не можна робити висновок, що потужність зовсім не змінюється зі зміною способу з'єднання навантаження тому, що при цьому змінюються лінійні та фазні величини.

## ТЕМА 4: ТРАНСФОРМАТОРИ

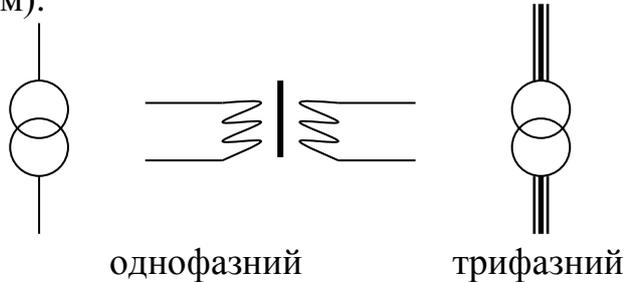
### 4.1 Призначення та класифікація трансформаторів

**Трансформатором** називається статичний електромагнітний прилад, призначений для перетворення енергії змінного струму з одними параметрами на енергію з іншими параметрами при незмінній частоті. У трансформаторі перетворюються напруга, струм та початкова фаза.

В залежності від призначення трансформатори діляться на силові і вимірювальні. **Силові** трансформатори виконують функцію проміжної ланки між генераторами електростанцій і приймачами електроенергії. **Вимірювальні** трансформатори струму і напруги застосовують в ланцюгах змінного струму для підключення електровимірювальних приладів з метою розширення їх меж вимірювання.

За числом фаз силові трансформатори поділяються на одно- та трифазні, за способом охолодження – на сухі (охолоджуються повітрям) й масляні (охолоджуються мастилом).

Умовні позначення  
трансформаторів



однофазний

трифазний

### 4.2 Будова та принцип дії однофазного трансформатора

Трансформатор складається з магнітної системи (замкнутого сталевих магнітопроводу), обмоток і системи охолодження. За кількістю обмоток трансформатори бувають двообмоткові та багатообмоткові. Розглянемо будову найпростішого двообмоткового трансформатора (рис.4.1).

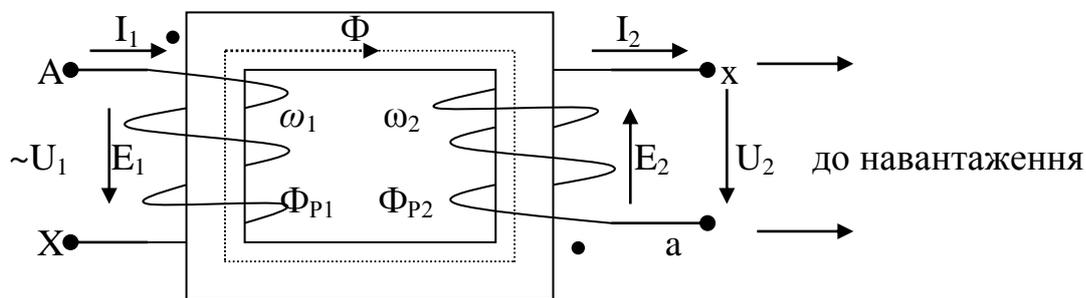


Рис. 4.1 Будова однофазного трансформатора

Обмотки, первинна і вторинна з числами витків  $\omega_1$  і  $\omega_2$ , виготовляються з ізолюваного мідного або алюмінієвого (рідше) проводу.

Вони розташовуються на магнітопроводі і ретельно ізолюються одна від одної і від самого магнітопроводу.

**Первинною** називається обмотка, що з'єднана з джерелом змінного струму, **вторинною** – обмотка, до якої підключається навантаження. Виводи однофазного силового трансформатора позначаються таким чином: початок і кінець обмотки з високою напругою – літерами А, Х (великими), обмотки з низькою напругою – а, х (малими).

**Магнітопровід** трансформатора збирається зі штампованих прямокутних, ізолюваних один від одного спеціальним лаком листів електротехнічної сталі (0,35 і 0,5 мм), що зменшує втрати в осерді на гістерезис і вихрові струми, тим самим підвищуючи ККД.

У відповідності з конструкцією магнітопроводу трансформатори діляться на стержневі і броньові. В однофазному **стержньовому** трансформаторі осердя складається з двох вертикальних стержнів з обмотками і двох горизонтальних ярем того ж перерізу, що замикають магнітопровід (рис. 4.2). На кожному зі стержнів розташовуються напівобмотки низької (НН) і високої (ВН) напруги. При такому розташуванні покращуються умови для магнітного зв'язку обмоток, так як зменшується поле розсіювання.

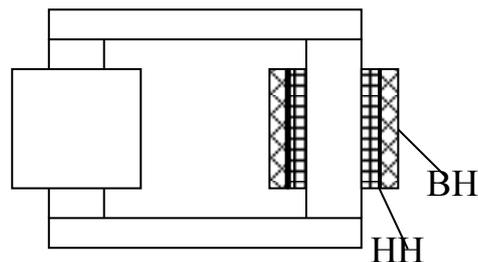


Рис. 4.2 Будова стержньового трансформатора

В однофазному **броньовому** трансформаторі обмотки високої і низької напруги розбиті на частини в формі дисків, що по чергово розташовуються тільки на середньому стержні і з боків закриваються двома ярмами (бронюються), замикаючими магнітопровід. У зв'язку зі складністю конструкції броньові трансформатори виготовляються на невеликі потужності.

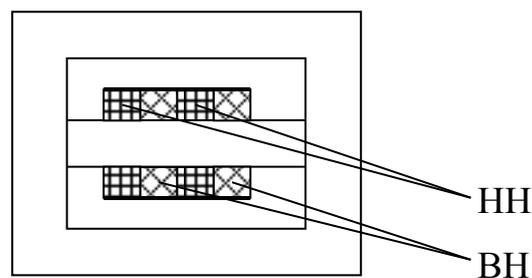


Рис. 4.3 Будова броньового трансформатора

**Принцип дії** трансформатора заснований на явищі електромагнітної індукції.

Змінний струм, що протікає по первинній обмотці, створює потік розсіювання  $\Phi_{P1}$ , що замикається навколо витків первинної обмотки у повітрі, його силові лінії не зчеплені з вторинною обмоткою. Основна частина магнітного поля трансформатора проходить через осердя і утворює в ньому змінний робочий потік  $\Phi$ , який зчеплений з обома обмотками і індуктує в обмотках ЕРС самоіндукції, миттєві значення яких рівні:

$$\begin{cases} e_1 = -w_1 \frac{d\Phi}{dt}; \\ e_2 = -w_2 \frac{d\Phi}{dt}. \end{cases}$$

Діючи значення цих ЕРС:

$$\begin{cases} E_1 = \frac{E_{1m}}{\sqrt{2}} = 4.44 f w_1 \Phi, \\ E_2 = \frac{E_{2m}}{\sqrt{2}} = 4.44 f w_2 \Phi, \end{cases}$$

де  $f$  – частота змінного струму,  $w_1, w_2$  – кількість витків обмоток.

При підключенні до вторинної обмотки приймача виникає струм  $I_2$ , що створює потік розсіювання  $\Phi_{P2}$ , котрий замикається навколо витків вторинної обмотки у повітрі. Таким чином, в трансформаторі між первинною і вторинною обмотками немає електричного зв'язку. Напряга у навантаженні  $Z_H$

$$U_2 = Z_H I_2.$$

Основним параметром трансформатора є **коефіцієнт трансформації  $K$** , що являє собою відношення ЕРС або напруг обмоток (первинної до вторинної), а також співвідношення чисел їхніх витків  $w$

$$K = \frac{E_1}{E_2} = \frac{U_1}{U_2} = \frac{w_1}{w_2}.$$

Якщо  $U_1 > U_2$ , то трансформатор називають **знижуючим**, а при  $U_1 < U_2$  – **підвищуючим**.

Оскільки трансформатор передає енергію з первинної обмотки у вторинну з незначними втратами (ККД трансформатора  $\eta \approx 90 - 98\%$ ), то можна порівняти первинну і вторинну потужності:

$$\begin{aligned} S_1 &\approx S_2, \\ U_1 I_1 &\approx U_2 I_2. \end{aligned}$$

З цього рівняння випливає, що трансформатор підвищує напругу і разом з тим знижує струм і навпаки.

Тоді можна записати коефіцієнт трансформації:

$$K = \frac{U_1}{U_2} = \frac{I_2}{I_1}.$$

### 4.3 Схема заміщення трансформатора

Для зручності розрахунку і порівняння параметрів, які характеризують процеси в трансформаторі, застосовують схеми заміщення. Найпоширеніша – спрощена Г-подібна схема заміщення. Елементи схеми заміщення відповідають певним процесам, що відбуваються в трансформаторі (рис.4.4).

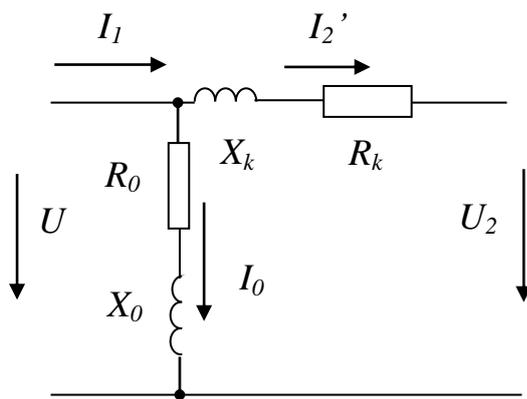


Рис.4.4 Схема заміщення

Так, величина індуктивного опору  $X_0$  визначається величиною робочого потоку, а величина опору  $R_0$  - втратами на нагрівання сталевого осердя. Величина опору  $X_K$  - потоками розсіювання первинної та вторинної обмоток, а величина  $R_K$  - активними опорами обмоток. Основні параметри та характеристики трансформатора легко визначаються за допомогою дослідів холостого ходу й короткого замикання.

### 4.4 Режими роботи трансформатора

**Номінальний режим роботи трансформатора** – це такий режим роботи, при якому на первинну обмотку подається номінальна напруга  $U_{1H}$ , а вторинна обмотка з напругою  $U_{2H}$  підключається до навантаження. Трансформатор працює в робочому (номінальному) режимі.

**Режимом (дослідом) холостого ходу** називається такий режим роботи трансформатора, при якому на первинну обмотку подається номінальна напруга  $U_{1H}$ , а вторинна обмотка залишається розімкненою (тобто  $I_2=0$ ). При цьому вимірюються струм живлення трансформатора  $I_0$ , споживана ним потужність  $P_0$  і напруга на вторинній обмотці  $U_{20}$ .

З дослідів холостого ходу визначаються:

– коефіцієнт трансформації по напрузі

$$K = \frac{U_{1H}}{U_{20}};$$

– параметри намагнічувальної (паралельної) гілки схеми заміщення

$$Z_0 = \frac{U_{1H}}{I_0}; \quad R_0 = \frac{P_0}{I_0^2}; \quad X_0 = \sqrt{Z_0^2 - R_0^2};$$

– втрати потужності трансформатора в сталевому осерді (**втрати в сталі**), обумовлені гістерезисом і вихровими струмами в магнітопроводі

$$\Delta P_{CT} = P_0.$$

Остання рівність приймається на тій підставі, що, по-перше, основний магнітний потік  $\Phi$  при всіх навантаженнях і холостому ході залишається постійним і, отже, втрати в сталі не залежать від навантаження, а по-друге, втрати в обмотках малі, оскільки струм холостого ходу у порівнянні з номінальним струмом дуже малий

$$I_0 \leq 0,1 I_{1H}.$$

**Режимом (дослідом) короткого замикання** називається такий режим роботи трансформатора, при якому вторинна обмотка замикається накоротко, а на первинну подається така знижена напруга  $U_{1K}$ , при якій струми в обмотках дорівнюють номінальним значенням. При цьому вимірюються напруга короткого замикання (для силових трансформаторів звичайно  $U_{1K} = 0,05 \cdot U_{1H}$ ), струми короткого замикання  $I_{1K} = I_{1H}$  та  $I_{2K} = I_{2H}$ , а також споживана трансформатором потужність  $P_K$ .

З дослідів короткого замикання визначаються:

– **коефіцієнт трансформації по струму**

$$K = \frac{I_{2H}}{I_{1H}};$$

– параметри послідовної гілки схеми заміщення

$$Z_k = \frac{U_{1k}}{I_{1k}}; R_k = \frac{P_{1k}}{I_{1k}^2}; X_k = \sqrt{Z_k^2 - R_k^2};$$

– втрати потужності трансформатора в мідних обмотках (**втрати у міді**) при роботі в номінальному режимі

$$\Delta P_M = P_K.$$

Остання рівність приймається на тій підставі, що під час дослідів короткого замикання робочий магнітний потік, пропорційний величині напруги первинної обмотки, малий (близько 5% від номінального). Отже, втрати в сталі також малі, й ними можна знехтувати, а потужність  $P_K$ , яку в досліді короткого замикання показує ватметр, ввімкнений у ланцюг первинної обмотки, дорівнює електричним втратам в обмотках трансформатора при його номінальному режимі навантаження, оскільки струми в обмотках рівні номінальним.

Потужність втрат в міді трансформатора залежить від струму навантаження, Вт

$$\Delta P_M = I_1^2 \cdot R_k = \beta^2 \cdot I_{1H}^2 \cdot R_k = \beta^2 \cdot P_K,$$

де  $\beta = \frac{I_2}{I_{2H}} = \frac{I_1}{I_{1H}}$  – коефіцієнт завантаження трансформатора.

#### 4.5 ККД трансформатора

ККД трансформатора дорівнює відношенню потужності, що віддається у вторинний ланцюг  $P_2$ , до потужності, споживаної з мережі  $P_1$ , і може бути легко обчислений за даними дослідів холостого ходу й короткого замикання

$$\eta = \frac{P_2}{P_1} = \frac{P_2}{P_2 + \Delta P_{CT} + \Delta P_M} = \frac{P_2}{P_2 + P_0 + \beta^2 P_k}.$$

Потужність, котра віддається трансформатором у навантаження

$$P_2 = U_2 I_2 \cos \phi_2 = U_2 \beta I_{2H} \cos \phi_2 = \beta S_H \cos \phi_2,$$

де  $S_H$  - номінальна потужність трансформатора;  $\cos \phi_2$  - коефіцієнт потужності навантаження.

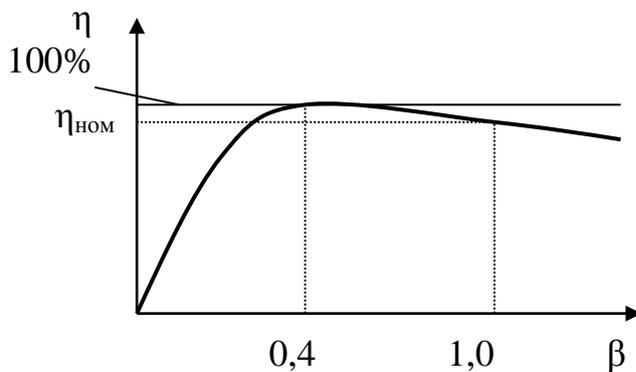
Сумарні втрати в трансформаторі дорівнюють сумі втрат у міді та втрат у сталі:

$$\Delta P_M = \Delta P_M + \Delta P_C.$$

Коефіцієнт потужності однофазного трансформатора

$$\cos \phi = \frac{P_1}{U_1 I_1}.$$

Коефіцієнт корисної дії трансформатора залежить від величини коефіцієнту  $\beta$  і характеру навантаження. Для трансформаторів потужністю менше 1000 ВА ККД зазвичай становить  $\eta = 85-90\%$ , а для потужних трансформаторів (при  $S > 1000\text{ВА}$ ) ККД мають значення  $\eta = 90-99,5\%$ .



Зі збільшенням навантаження коефіцієнт корисної дії стрімко зростає, але при перевантаженні помітно зменшується. Номінальний ККД трохи менше максимального.

#### 4.6 Трифазні трансформатори

Перевага трифазного трансформатора перед групою з трьох однофазних при експлуатації трифазних мереж полягає в тому, що він дешевший, легший і менший за розмірами.

#### 4.6.1 Будова трифазного трансформатора

Трифазний стержньовий трансформатор за конструкцією мало відрізняється від однофазного. Його магнітопровід складається з трьох стержнів і двох ярів однакового перерізу.

На кожному стержні 3-х стержневого магнітопроводу містяться первинна і вторинна обмотки, що відносяться до однієї і тієї же фази. За принципом дії трифазний трансформатор також не відрізняється від однофазного.

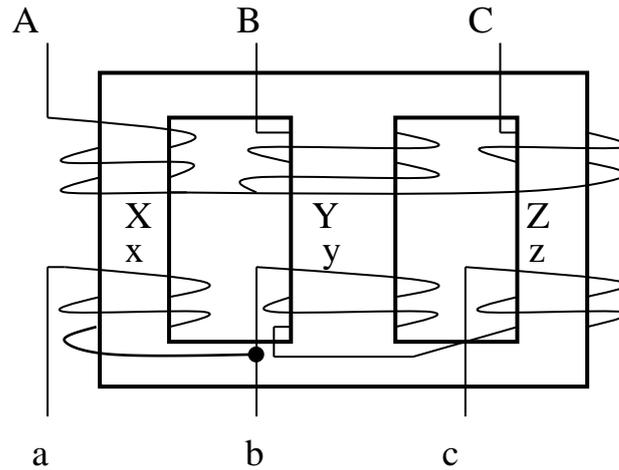


Рис. 4.5 Будова трифазного трансформатора

Початок обмоток високої напруги (ВН) позначають А, В, С, низької напруги (НН) – а, в, с.

Кінці обмоток ВН позначають X, Y, Z, НН – x, y, z.

#### 4.6.2 Групи з'єднань трифазних трансформаторів

На практиці застосовують різні схеми з'єднань: обмотки ВН найчастіше з'єднуються Y, а обмотки НН можуть бути з'єднані зіркою ( $Y/Y$ ), зіркою з нульовим проводом ( $Y/Y_0$ ) або трикутником ( $Y/\Delta$ ). Можливі і інші схеми з'єднань, наприклад, вторинна обмотка може бути з'єднана „зігзагом” (Z). При такому з'єднанні кожна фазна обмотка розбивається на дві частини, котрі з'єднуються між собою частково – зіркою, а частково – трикутником. Цей спосіб з'єднання використовують при великих струмах у вторинній обмотці ( $Y/Z$ ). В чисельнику завжди вказується спосіб з'єднання обмоток ВН, а в знаменнику – обмоток НН.

Велике значення, особливо при включенні трансформаторів на паралельну роботу, має кут зсуву фаз між однойменними векторами лінійних напруг первинної та вторинної обмоток трансформатора, цей кут може дорівнювати  $330^\circ$  або  $360^\circ$ . Його прийнято позначати кутом між годинною та хвилинною стрілками у визначений час, наприклад, коли група є 12, кут зсуву фаз дорівнює  $360^\circ$ , а для 11 групи –  $330^\circ$ .

Розглянемо випадок зміни кута зсуву фаз між лінійними ЕРС  $E_{AB}$  і  $E_{ab}$  для різних схем з'єднання.

Якщо обмотка ВН з'єднана зіркою, а обмотка НН – трикутником ( $Y/\Delta$ ), то з векторної діаграми можна побачити, що кут між векторами однойменних ЕРС  $E_{AB}$  і  $E_{ab}$  складає  $330^\circ$ .

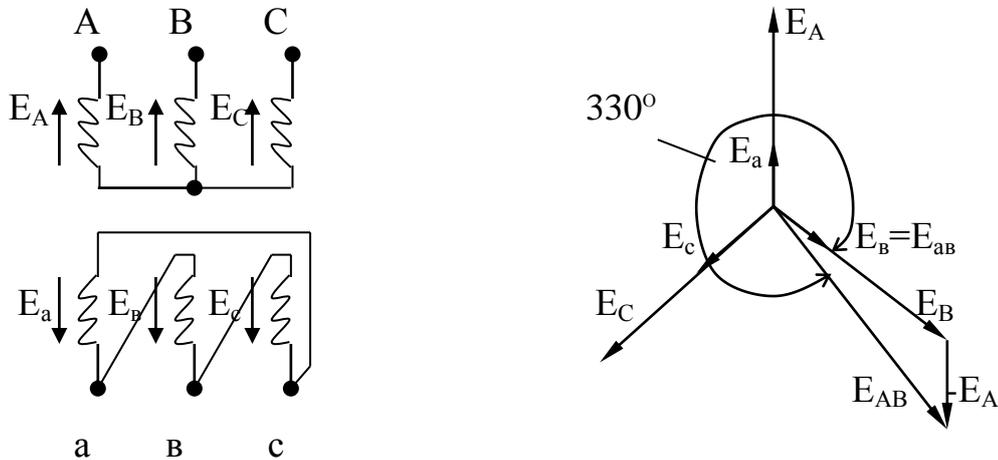


Рис.4.6 З'єднання обмоток  $Y/\Delta$

При з'єднанні  $Y/Y$  кут між однойменними ЕРС рівний  $360^\circ$ , тобто ЕРС  $E_{AB}$  і  $E_{ab}$  співпадають по фазі.

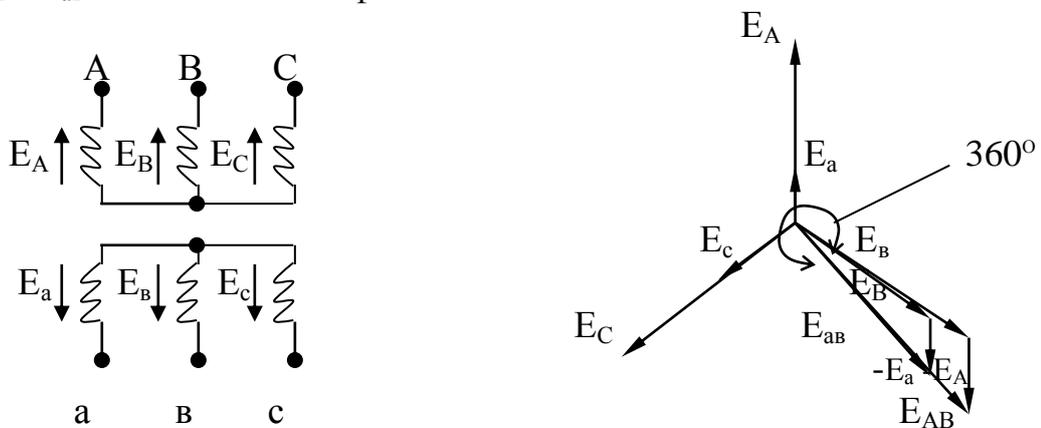


Рис.4.7 З'єднання обмоток  $Y/Y$

Найбільш поширені наступні схеми з'єднання й групи обмоток трифазних трансформаторів:  $Y/Y_0 - 12$ ,  $Y/Y - 12$ ,  $Y/\Delta - 11$ ,  $Y/Z - 11$ .

#### 4.6.3 Коефіцієнти трансформації

У трифазних трансформаторах розрізняють два коефіцієнта трансформації: фазний та лінійний.

**Фазним коефіцієнтом трансформації** називають відношення фазних напруг первинної та вторинної обмоток в режимі холостого ходу, тобто:

$$K_{\Phi} = \frac{U_{1\Phi}}{U_{2\Phi}} .$$

**Лінійний коефіцієнт трансформації** – це відношення лінійних напруг первинної та вторинної обмоток в режимі холостого ходу:

$$K_L = \frac{U_{1Л}}{U_{2Л}} .$$

У разі з'єднання обмоток за однаковими схемами  $Y/Y$  та  $\Delta/\Delta$  коефіцієнти трансформації рівні ( $K_L = K_{\Phi}$ ). Якщо схема з'єднання обмоток  $Y/\Delta$ , то  $K_L = \sqrt{3}K_{\Phi}$ , а при з'єднанні  $\Delta/Y$  буде  $K_L = \frac{K_{\Phi}}{\sqrt{3}}$ .

Трансформація великих потужностей трифазних мереж частіше здійснюється групами з трьох однакових однофазних трансформаторів внаслідок складності транспортування великих трифазних трансформаторів.

#### **4.7 Потужність трансформатора**

**Номинальна потужність** трансформатора розраховується таким чином, щоб він, працюючи невизначено довго при номінальній напрузі, найбільшому можливому навантаженню, умовній температурі навколишнього середовища  $Q_{нав.}=40^{\circ}C$  і висоті над рівнем моря  $\leq 100m$ , не перегрівався вище допустимої температури  $Q_{доп.}$ .

$Q_{доп}$  визначається класом теплостійкості ізоляції трансформатора:

**клас А**  $\rightarrow Q_{доп}=105^{\circ}C$ , **Б**  $\rightarrow Q_{доп}=90^{\circ}C$ , **В**  $\rightarrow Q_{доп}=120^{\circ}C$ , **С**  $\rightarrow Q_{доп}=130^{\circ}C$ ,  
**Д**  $\rightarrow Q_{доп}=155^{\circ}C$ , **Е**  $\rightarrow Q_{доп}=180^{\circ}C$ , **С**  $\rightarrow Q_{доп} > 180^{\circ}C$ .

Номинальна паспортна потужність однофазного трансформатора

$$S_{ном} = U_{1ном} \cdot I_{1ном} = U_{2ном} \cdot I_{2ном} .$$

Для трифазного трансформатора номінальна потужність

$$S_{ном} = \sqrt{3}U_{1ном} \cdot I_{1ном} = \sqrt{3}U_{2ном} \cdot I_{2ном} .$$

Так як нагрів трансформатора практично визначається струмом в навантаженні ( $U_2 \approx U_{2ном}$ ), то допустима його активна потужність  $P_{2доп}$  залежить від коефіцієнта потужності вторинного ланцюга:

$$P_{2доп} = S_{ном} \cos \varphi_2 .$$

Так, трансформатор потужністю  $S_{ном}=100kVA$  при  $\cos \varphi_2=1$  можна навантажувати до 100 кВт, а при  $\cos \varphi_2 = 0,5$  – тільки до 50 кВт.

#### **4.8 Автотрансформатори**

**Автотрансформатором** називають трансформатор, у якого обмотка низької напруги є частиною обмотки високої напруги (рис.4.7).

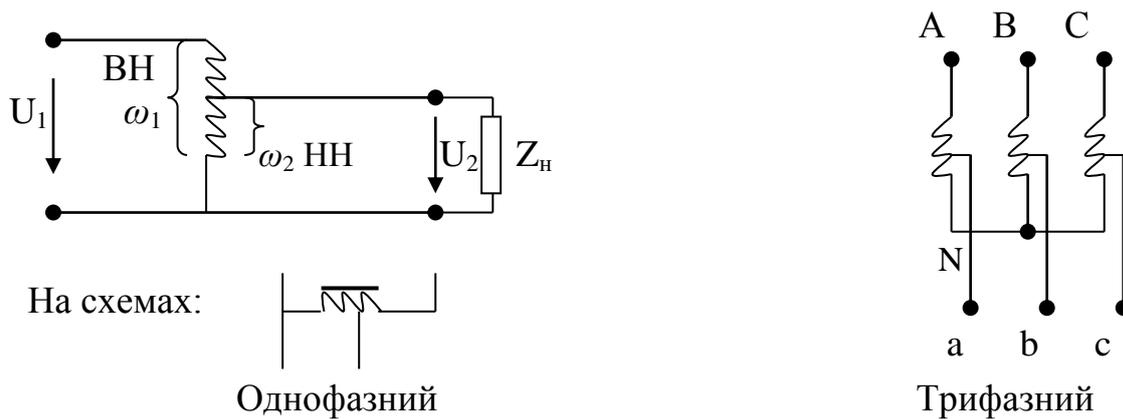


Рис.4.7 Автотрансформатори

Конструктивно автотрансформатор не відрізняється від звичайного трансформатора, тільки на магнітопроводі розташовується лише одна обмотка з числом витків  $\omega_1$ . Ця обмотка підключається до мережі змінного струму з напругою  $U_1$ . З частини цієї обмотки з числом витків  $\omega_2$  знімається вторинна напруга  $U_2$ , котра подається на навантаження  $Z_H$ .

У автотрансформаторів (АТ) з коефіцієнтом трансформації  $K$ , що мало відрізняється від одиниці, в порівнянні зі звичайним трансформатором на ту ж потужність буде значна економія активних матеріалів і менші втрати енергії, а отже, менші розміри, маса, вартість і більш високий ККД (на практиці АТ вигідно застосовувати для мереж ВН з коефіцієнтами трансформації  $K=1,5 \div 2$ ; а для мереж НН з коефіцієнтом трансформації  $K$  не більше 3).

Основним недоліком АТ є електричний зв'язок між обмотками ВН і НН. Це вимагає значного підсилення ізоляції.

#### **4.9 Вимірювальні трансформатори**

У колах змінного струму для розширення меж вимірювання приладів застосовуються вимірювальні трансформатори, які поділяються на трансформатори струму і напруги. Вони використовуються як перетворювачі великих змінних струмів та напруг у відносно малі, які можна вимірювати приладами із невеликими стандартними номінальними значеннями. Цим досягається безпека персоналу та спрощується конструкція вимірювальних приладів.

Вимірювальні трансформатори складаються з осердя та двох ізольованих мідних обмоток (первинної з кількістю витків  $w_1$  та вторинної – з кількістю витків  $w_2$ ). Для розширення меж вимірювання по напрузі застосовуються вимірювальні трансформатори напруги (ВТН). Вони використовуються для підключення вольтметрів, частотомірів, обмоток напруги ватметрів, лічильників і інших приладів. Схема включення трансформатора напруги показана на рис. 4.8, а.

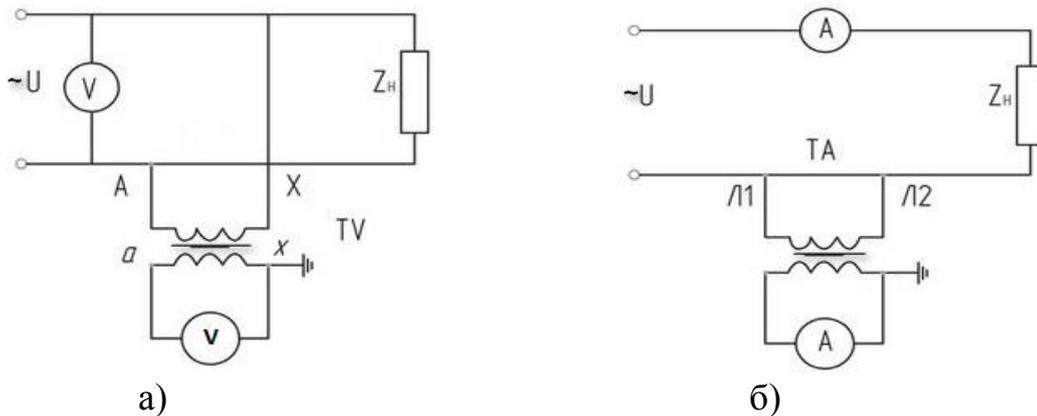


Рис. 4.8 Схеми підключення обмоток вимірювальних трансформаторів

Так як вторинна обмотка трансформатора замкнута на великі опори обмоток напруги приладів, то струм у вторинній обмотці малий, тобто трансформатор напруги працює в режимі, близькому до режиму холостого ходу. Це дає право нехтувати незначним падінням напруги в обмотках трансформатора, які складають близько 1 % від відповідних номінальних напруг обмоток, і прийняти рівність напруг та відповідних ЕРС

$$U_1 \approx E_1 \text{ і } U_2 \approx E_2.$$

Тоді коефіцієнт трансформації трансформатора напруги

$$K_U = U_1 / U_2 \approx E_1 / E_2 = w_1 / w_2.$$

Вторинна обмотка ВТН має стандарт : 100;  $(100/\sqrt{3})$  В при різних значеннях первинної напруги  $U_1$ .

У колах змінного струму для розширення меж вимірювання приладів по струму застосовуються вимірювальні трансформатори струму (ВТС). Вони використовуються для підключення амперметрів і струмових обмоток ватметрів, лічильників і інших приладів. Схема включення трансформатора струму показана на рис. 4.8,б.

Первинна обмотка трансформатора струму виконується із товстого дроту. У трансформаторах струму з первинним струмом  $I_1 > 500$  А вона складається з 1 витка у вигляді прямої мідної шини, яка проходить через вікно сердечника. Вторинна обмотка у всіх трансформаторів струму має невеликий переріз і розрахована на стандартні вторинні струми: 1; 2; 2.5; 5 А при первинних струмах  $I_1 = 1-40000$  А.

Оскільки вторинна обмотка трансформатора струму замкнута на малі опори струмових обмоток приладів, то трансформатор струму працює в режимі, близькому до режиму короткого замикання. Якщо знехтувати магніторушійною силою холостого ходу, яка складає (0,5–1)% від магніторушійної сили первинної обмотки, то  $I_1 \cdot w_1 \approx I_2 \cdot w_2$  й тоді коефіцієнт трансформації трансформатора струму:

$$K_I = I_1 / I_2 = w_2 / w_1.$$

Дійсне значення коефіцієнта трансформації внаслідок наведень зовнішніх полів, розміру навантаження, частоти струму, якості матеріалу сердечника завжди відрізняється від заданого, тому на практиці використовують нормовані значення  $K_{IH}$  і  $K_{UH}$  - номінальні коефіцієнти трансформації струму і напруги, що зазвичай вказуються на панелі приладу.

#### 4.10 Паралельна робота трансформаторів

При збільшенні потужності споживача паралельно працюючим встановлюються ще й додаткові трансформатори. Робота на підстанції одночасно декількох паралельних трансформаторів дозволяє:

- при аварійному виході одного замінити його іншим, забезпечивши електроенергією найбільш відповідальних споживачів;
- при зниженні навантаження частина трансформаторів відключається, проте інші працюють в номінальному режимі, чим забезпечується збільшення ККД установки.

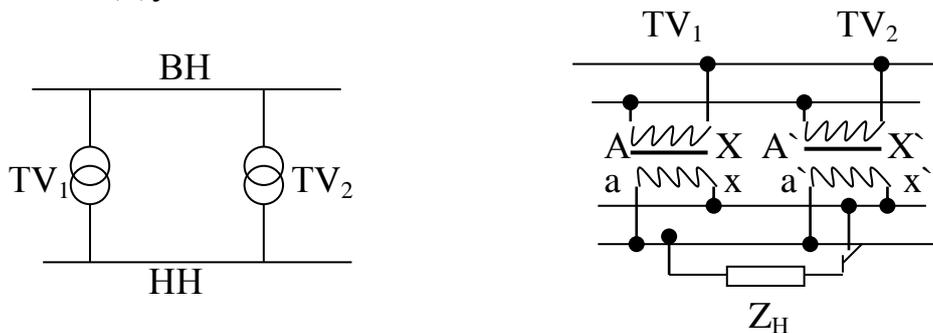


Рис. 4.9 Схеми підключення паралельних трансформаторів (ВН – висока напруга, НН – низька напруга,  $Z_n$  – навантаження)

Нормальна робота можлива тільки при рівних ЕРС трансформаторів (для двохтрансформаторної схеми  $E_1=E_2$ ). Для цього трансформатори повинні мати **однакові коефіцієнти трансформації** (за стандартом відхилення  $K_1$  і  $K_2$  допускається не більше 0,5%).

Для трифазних трансформаторів умова  $E_1=E_2$  накладає додаткову вимогу на вибір схеми з'єднання обмоток. **Схеми з'єднання** повинні бути однакові. Наприклад, неприпустимо, щоб у одного трансформатора була схема з'єднань  $Y/\Delta - 11$ , а у іншого  $Y/Y_0 - 12$ . Це пов'язане з тим, що між однойменною лінійною напругою буде виникати зсув фаз на  $30^\circ$ . Також при паралельному з'єднанні **напруги короткого замикання**  $U_{кз}$  трансформаторів повинні бути однакові (допускається відхилення не більше 10%).

## ТЕМА 5: ЕЛЕКТРИЧНІ АПАРАТИ

Електричні апарати – це електротехнічні пристрої, призначені для керування електричними і неелектричними об'єктами, а також для захисту цих об'єктів при ненормальних режимах роботи. Електричні апарати відіграють важливу роль на всіх етапах виробництва, передачі, розподілу і споживання електроенергії.

### 5.1 Електричні апарати ручного керування

**Кнопки керування** – призначені для подачі оператором керуючої дії на електричний об'єкт. Їх розрізняють за розмірами – нормальні та малогабаритні, кількістю замикаючих і розмикаючих контактів. Дві, три і більше кнопки, змонтовані в одному корпусі, утворюють кнопочну станцію. Кнопки керування випускають з замикаючим і розмикаючим контактами:

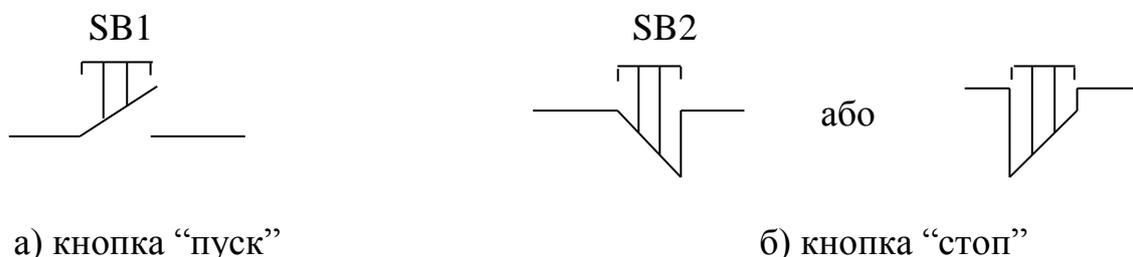


Рис. 5.1 Зображення кнопок на електричних схемах

Такі кнопки називаються одноколовими. На схемах кнопки позначаються літерами SA або SB (незалежно від того, це кнопка пуск чи стоп).

Двоколові кнопки мають дві пари вказаних контактів з єдиним приводом. Існують також багатокілові кнопки. Особливістю кнопок керування є їхня здатність повертатися у вихідне положення після зняття впливу (самоповернення). Вони призначені для роботи в мережах змінного та постійного струму, використовуються здебільшого в ланцюгах керування, де струми й напруги невеликі.

Кнопки керування вибирають за родом і величиною напруги, значенням струму, числом ланцюгів, що перемикаються, ступенем захисту, кліматичними умовами, механічною і електричною зносостійкістю.

**Універсальні перемикачі** – призначені для подачі керуючого впливу на електропривод і мають два або більше фіксованих положень рукоятки та кілька замикаючих і розмикаючих контактів. На схемах позначаються літерами SM (відповідно, нумерація ланцюгів SM1, SM2 ...SM<sub>n</sub>). Визначити, яке коло замкнене, можна по чорній крапці, яка стоїть під даним колом.

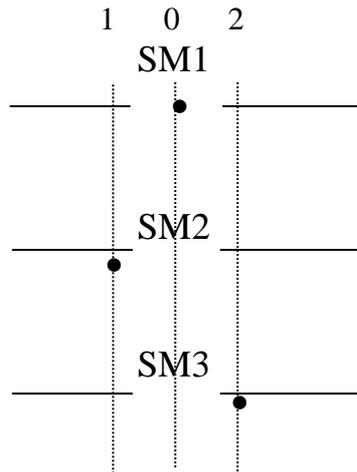


Рис. 5.2 Зображення універсальних перемикачів на електричних схемах

В середньому положенні рукоятки (позиція 0) замкнутий контакт SM1, що позначається точкою на схемі, а контакти SM2 і SM3 розімкнуті. В положенні 1 замикається контакт SM2, розмикається SM1. В положенні 2 замкнутий тільки контакт SM3.

Універсальні перемикачі (УП) використовуються для комутації ланцюгів котушок контакторів, масляних вимикачів, керування багатошвидкісними асинхронними двигунами та ін. Вони можуть комутувати до 32 мереж і мати до 8 положень рукоятки керування. Застосовуються на струми до 20 А в мережах невеликої потужності.

УП вибирають за родом і значенням напруги, струму навантаження, кількістю ланцюгів та числом положень рукоятки, механічною і електричною зносостійкістю, а також за конструктивним виконанням.

**Контролери** – багатопозиційні електричні апарати з ручним або ножним приводом для безпосередньої комутації силових мереж двигунів постійного та змінного струму. В електроприводах використовуються контролери двох видів – кулачкові і магнітні. На схемах контролери, як і УП, позначаються SM.

В кулачкових (також їх називають барабанными) контролерах перемикачів забезпечується змонтованими на барабані кулачками, поворот яких здійснюється за допомогою рукоятки, маховичка або педалі. За рахунок профілювання кулачків забезпечується необхідна послідовність комутації контактних елементів. Контролери працюють на напругах до 500 В і струмах до 300 А. Число позицій їх рукояток може досягати шести в кожену сторону від середнього положення.

Магнітні контролери являють собою комутаційні пристрої, до складу яких входить контролер і силові електромагнітні апарати – контактори. Контролер за допомогою своїх контактів керує котушками контакторів, які, в свою чергу, здійснюють комутацію силових мереж двигунів.

Строк служби магнітних контролерів при одних і тих же умовах експлуатації суттєво вище, ніж кулачкових, що пояснюється високою

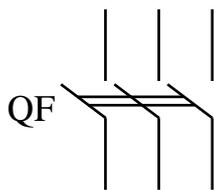
комутаційною здатністю і стійкістю до спрацювання електромагнітних контакторів.

Вибір контролерів здійснюється аналогічно вибору універсальних перемикачів.

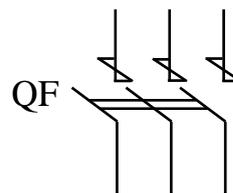
**Рубильники** – найпростіші силові комутаційні апарати, які призначені для ручного замикання і розмикання силових електричних мереж постійного та змінного струму напругою до 500 В і струмом до 10000 А з малим числом включень за годину (до 6-10). По конструкції розрізняють одно - полюсні, двополюсні і триполюсні рубильники. Також вони розрізняються за силою струму, числом комутованих мереж, видом приводу рукоятки (центральна і бічна рукоятка) та числом її положень (два або три). Рубильник має контактну систему ножового типу, при замиканні якої металеві ножі входять в нерухомі елементи у вигляді скоб. Така система не дозволяє самовільно під власною вагою розривати контакт.

Найбільш важливою частиною всіх комутаційних апаратів є контакти, котрі здійснюють розрив кола. При відключенні навантаження комутаційним апаратом відбувається розрив струму в навантаженні. В ланцюзі з індуктивним навантаженням при цьому виникає ЕРС самоіндукції. Під дією цієї ЕРС в проміжку між контактами виникає електрична дуга, котра викликає перегрівання й швидке руйнування контактної системи. Для усунення цього явища в рубильниках на великі струми застосовують спеціальні дугогасильні камери. В них електрична дуга розділяється спеціальними пластинками на частини, інтенсивно охолоджується і швидко деіонізується до повного затухання. Застосування дугогасних камер забезпечує гашення дуги при відключенні номінальних струмів рубильниками постійного струму 220В і змінного струму 380В. При напрузі 440 і 500В струми відключення складають  $0,5 I_{ном}$ .

На схемах рубильники позначаються літерами QF або QS.



триполюсний замикаючий



триполюсний замикаючий  
дугогасильний

Рис. 5.3 Зображення рубильників на електричних схемах

**Пакетні вимикачі** – різновид рубильників. Їх контактна система набирається з окремих пакетів – ізоляційних шайб, закріплених ззовні шпильками, та перемикаючого механізму. Пакетні вимикачі, які випускаються промисловістю, призначені для комутації електричних мереж постійного струму до 400 А, напругою до 220В та змінного струму до 250 А і напругою до 380 В.

## 5.2. Електричні апарати дистанційного керування

До апаратів дистанційного керування відносяться контактори, магнітні пускачі та реле, перемикання контактів яких здійснюється при подачі на їх котушки електричного сигналу і знятті цього сигналу.

**Контактори** – електромагнітні апарати, які призначені для частих дистанційних комутацій силових мереж двигунів. Позначаються літерами КМ.

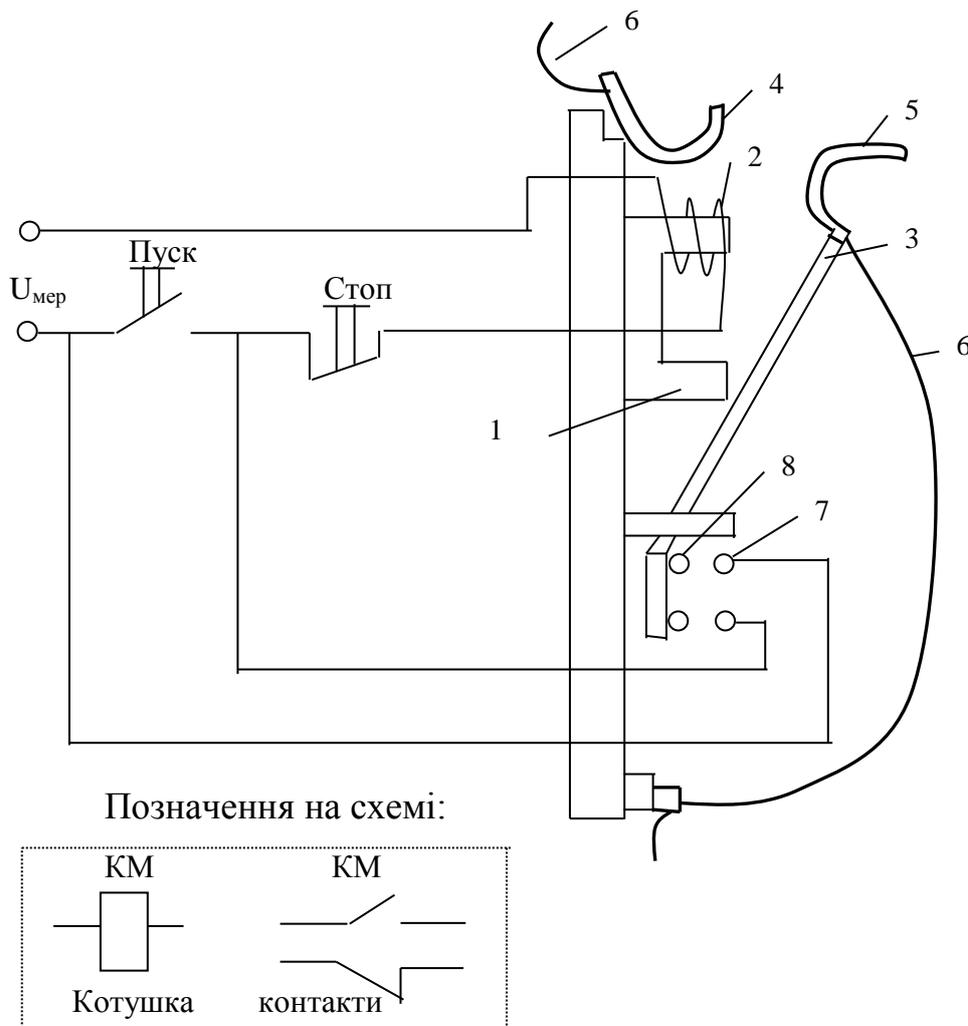


Рис. 5.4 Будова та зображення контакторів на електричних схемах

Контактор керується дистанційно за допомогою кнопкового пускача. Він складається з двох основних частин: котушки та контактної системи. При натисканні кнопки “пуск” замикається ланцюг котушки 2 електромагніта 1, рухомий сталевий якір 3 контактора притягується до осердя електромагніта, замикаються головні контакти 4 і 5. При цьому через гнучкий провід 6 замкнеться силовий ланцюг мережі. Одночасно інший кінець якоря замикає блок-контакти 7 і 8, які блокують пускову кнопку. Відключення контактора досягається натисненням кнопки “Стоп”.

що призводить до розмагнічування котушки і повернення контактів у вихідне положення..

Контактори виготовляються на номінальні напруги до 6000 В та струми головних контактів до 2500 А. Головні контакти здатні відключати струми перевантаження, котрі 10-кратні номінальному струму. Блокувальні контакти можуть відключати струми до 20 А при напругах до 500 В.

Контактори, як і рубильники, забезпечуються дугогасильною системою, можуть виконувати до 600 включень на годину.

Їх розрізняють за родом струму, числом головних контактів, величинами номінального струму і напруги мереж, що перемикаються, конструктивним виконанням та ін.

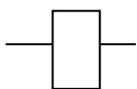
**Магнітні пускачі** – комплексні апарати для керування трифазними асинхронними двигунами. В цей апарат можуть входити контактор, кнопки керування, теплові реле захисту, сигнальні лампи, розміщені в одному корпусі. Принцип дії і схемне позначення аналогічне контактору. Допустиме число включень 2400 – 3600 за годину.

**Електромагнітні реле** – апарати, які призначені для комутації слабострумних мереж керування електроприводами. Діє електромагнітне реле аналогічно контактору. Електромагнітні реле застосовують в схемах керування в якості реле струму, напруги, часу і проміжних реле. Випускаються на струми 5...10 А і напруги 12...220 В.

Реле часу призначене для організації часової затримки при комутації контактів, якщо це необхідно для даного технологічного процесу.

Схемне зображення реле аналогічне контактору, але використовуються інші літерні позначення:

KV, KA, KT

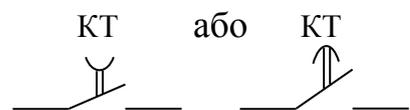
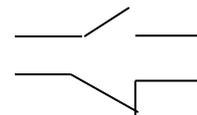


Котушка

KV – реле напруги; контакти:

KA – реле струму;

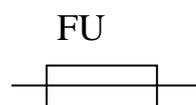
KT – реле часу, контакти:



### **5.3 Апарати захисту, блокування і сигналізації**

**Запобіжники** – це електричні апарати, які призначені для автоматичного захисту електрообладнання від струмів короткого замикання. Позначаються літерами FU.

На схемі зображують таким чином



Основним елементом запобіжника є калібрована плавка вставка, яка вставляється всередину патрона і розплавляється при надвеликих струмах.

Плавкі вставки розділяються на малоінерційні (мідні, цинкові) та інерційні (зі свинцю), які можуть витримувати значні короточасні перевантаження по струму. Запобіжники вмикаються в електричне коло послідовно. В електроприводах вони вмикаються в кожен ліній (фазу), яка живить двигун, мережі між вимикачем напруги і контактами лінійних контакторів, а також в мережі керування. Вибір запобіжників здійснюється за номінальною напругою та струмом таким чином, щоб плавка вставка не перегоріла від пускового струму електродвигуна. Наприклад, для асинхронного двигуна з короткозамкненим ротором струм плавкої вставки  $I_{ПВ}$  при часі пуску до 5с розраховують:

$$I_{ПВ} = I_{ПВСК} / 2,5 \quad ,$$

а при часі пуску більше 5 с :

$$I_{ПВ} = I_{ПВСК} / (1,6...2).$$

Плавкі вставки запобіжників калібруються на струми від 6 до 1000 А при напругах до 35 кВ.

**Реле максимального струму (РМС)** використовуються в електроприводах середньої і великої потужності для захисту від струмів короткого замикання. Котушки цих реле FA1 і FA2 вмикаються в дві фази трифазних двигунів змінного струму і в один або два полюси двигуна постійного струму. Контакти цих реле включаються в мережі керування. При виникненні надструмів в контрольованих мережах, які перевищуватимуть струми спрацьовування реле, контакти РМС розмикаються і двигун через контактор КМ відключається від живлення.

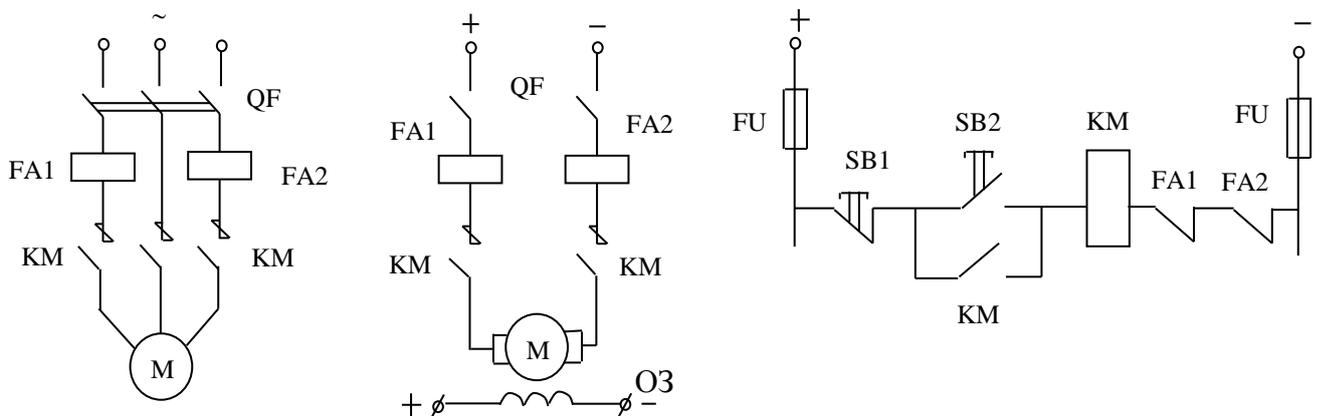


Рис. 5.5 Схема захисту електроприводу за допомогою РМС

В якості РМС застосовують реле миттєвої дії для мереж постійного струму на струми від 0,6 до 1200 А, для мереж змінного струму – від 0,6 до 630 А.

Максимальний струмовий захист не повинен спрацювувати при пускові двигуна, для чого його уставку  $I_{VM}$  необхідно вибрати зі співвідношення:

$$I_{VM} \geq k_n I_{ПУСК} ,$$

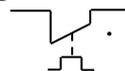
де  $I_{ПУСК}$  - пусковий струм двигуна,  $k = 1,5 \dots 2,2$  – коефіцієнт, який враховує вид розчеплювача і можливий розкид струму його спрацювання відносно струму уставки.

На схемах РМС позначаються літерами FA (іноді КА).

**Тепловий захист** – здійснюється за допомогою теплових реле, які вимикають двигун від джерела живлення, якщо внаслідок протікання по його ланцюгах підвищених струмів відбувається значне нагрівання його обмоток.

На схемах теплові реле позначаються літерами FP або КК.

Їх контакти зображують таким чином



Котушки реле вмикаються в 2 фази трифазних двигунів безпосередньо (рис.5.6, схема а) або через понижувальні трансформатори струму ТА (схема б). Для захисту двигунів постійного струму теплові реле вмикаються в один чи два полюси ланцюга їх живлення (схема в). Розмикаючи контакти теплових реле вмикаються в ланцюги керування (не зображено).

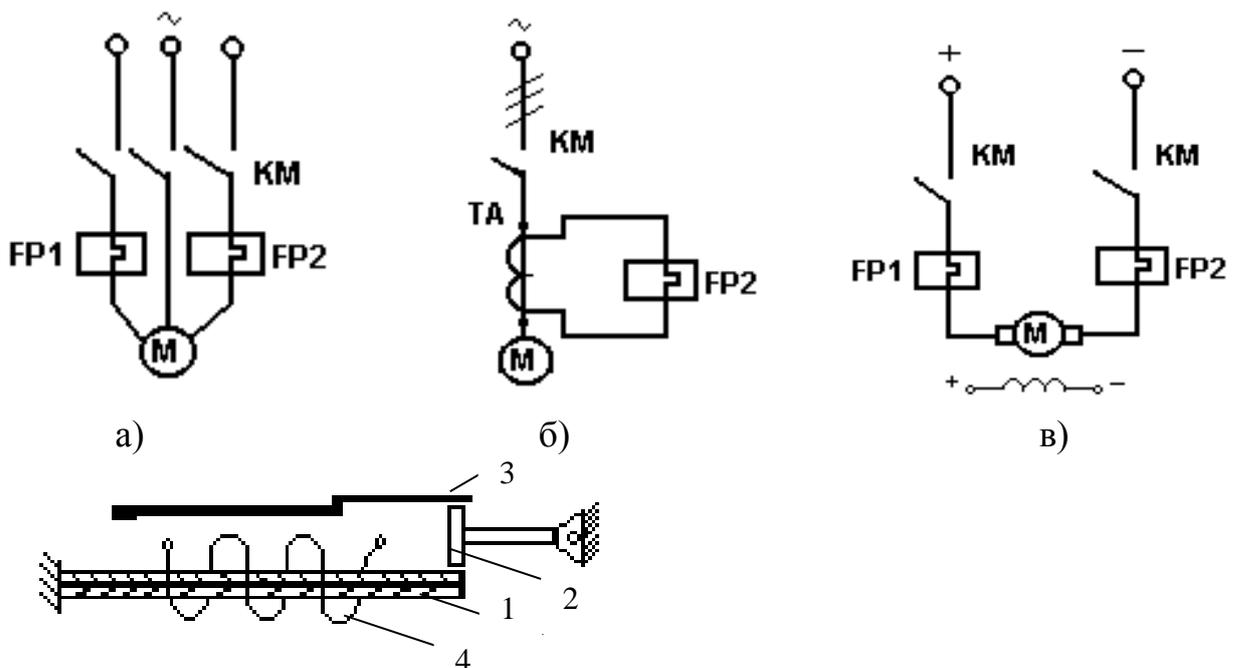


Рис. 5.6 Схема підключення та будова теплових реле

Дія теплового реле заснована на ефекті згинання біметалевої пластини 1 через різні температурні коефіцієнти лінійного розширення двох утворюючих цю пластину металів при її нагріванні обмоткою провідника 4. При цьому вільний кінець пластини 1 вигинається і через спеціальний важіль 2 відкриває засувку 3, викликаючи розмикання контактів у схемі керування, які за допомогою контактора або магнітного пускача зупиняють двигун.

Після охолодження біметалевої пластини протягом 3-5 хвилин вихідне положення контактів може бути відновлене натисканням спеціальної кнопки, а в реле із самоповерненням – автоматично.

В електроприводах застосовують електротеплові реле на номінальні струми від 0,17 до 550А, також враховується величина номінальної напруги.

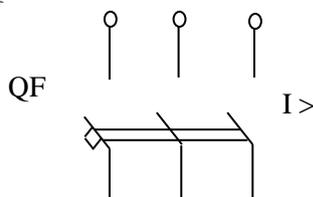
Ці реле мають регульовану уставку теплового захисту. При виборі теплового реле захист від перевантаження (тепловий захист) вважається ефективним при наступному співвідношенні струму уставки і номінального струму двигуна:

$$I_{устТ} = (1,2...1,4)I_{НОМ} .$$

При струмові  $1,2 \cdot I_{НОМ}$  час спрацьовування реле становить близько 20 хвилин.

**Автоматичні повітряні вимикачі** (автомати) – комплексні багатоцільові апарати, які забезпечують ручне ввімкнення та вимкнення двигунів, їх захист від надструмів, перевантажень і зниження напруги живлення. Для здійснення цих функцій автомат має контактну систему, замикання і розмикання якої виконується вручну за допомогою рукоятки або кнопки, а також максимальне реле струму і теплове реле.

Важливою частиною автомата є механізм вільного розчеплення, який забезпечує його відключення при надходженні керуючих або захисних впливів, наприклад, при проходженні струмів перевантаження, короткому замиканні, значному зниженні напруги мережі, а також при необхідності дистанційного відключення автомата. На схемах позначаються літерами QF.

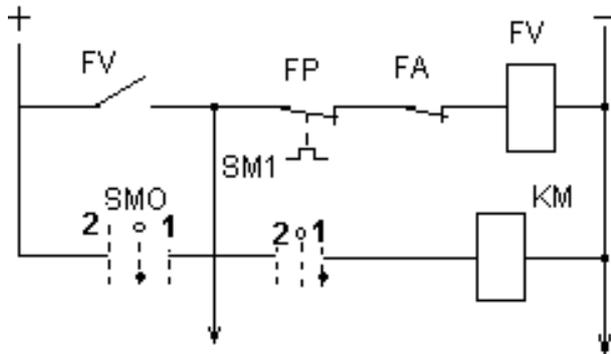


Діапазон номінальних струмів автоматів складає 10...10000А, а граничних струмів комутації 0,3...100 кА. Час спрацьовування таких автоматів 0,02...0,7 с.

Автоматичні вимикачі вибираються за номінальним струмом і напругою, родом струму, граничною комутаційною здатністю, електродинамічною і термічною стійкістю, власним часом включення. При наявності в автоматах теплового і максимального струмового захисту,

що забезпечуються за допомогою різного роду розчеплювачів, їх уставки повинні відповідати рівням відповідних струмів двигуна.

**Нульовий захист** – забезпечує відключення двигунів при значному зниженні напруги мережі або її зникненні і попереджує самовільне ввімкнення після відновлення подання напруги.



При ручному керуванні електроприводом від універсального перемикача або командоконтролера з фіксованим положенням їх рукояток нульовий захист здійснюється за допомогою додаткового реле напруги FV. В цій схемі реле напруги FV вмикається при нульовому

положенні командоконтролера через контакт SMO, після чого воно починає отримувати живлення через свій власний контакт FV, що замкнувся. При переведенні рукоятки SM в положення пуску 1 живлення схеми керування буде виконуватися через контакт SM1, тому при зникненні напруги реле FV вимкнеться, припинить живлення схеми, і контактор KM вимкне двигун від мережі (двигун не показаний). При відновленні напруги повторне включення можливе лише після встановлення рукоятки SM знову в нульове положення, чим виключається можливість самозапуску.

В розглянутій схемі реле FV є виконавчим елементом ще двох захистів - від струмів короткого замикання (через РМС FA) і теплового (через теплове реле FP), що часто практикується в схемах керування.

**Захисні реле напруги** - реагують на зниження чи підвищення напруги понад допустиме значення. Конструкція, схемне позначення і принцип дії цих реле такі самі, як і у реле струмів, тільки котушка вмикається в ланцюг паралельно, на повну напругу.

**Шляхові вимикачі (ШВ)** - призначені для автоматичного ввімкнення і вимикнення електричних ланцюгів керування в залежності від шляху, що пройшов виконавчий орган. **Кінцеві вимикачі (КВ)** конструктивно мало відрізняються від шляхових і служать для відключення привідного електродвигуна в крайньому положенні виконавчого органа.

В залежності від способу привода контактів механічні ШВ ділять на кнопові, важільні і шпindelльні.

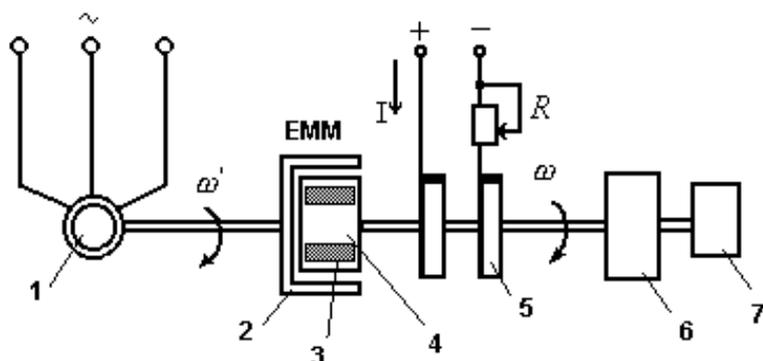
Також застосовуються ШВ, в конструкції яких використовуються фотоелементи та фоторезистори а також індукційні безконтактні перетворювачі. На схемах ШВ позначаються літерами SQ.

Схемне позначення шляхових вимикачів



## 5.4 Електромагнітні муфти та гальмівні пристрої

**Електромагнітні муфти (ЕММ)** - силові електромеханічні прилади, які дозволяють регулювати швидкість обертання виконавчого органа робочої машини при постійній швидкості обертання двигуна.



ЕММ складається з двох механічно нез'єданих частин - ведучої і веденої. Ведуча (якір) 2 з'єднується з валом електродвигуна 1 і обертається зі швидкістю  $\omega'$ .

Рис 5.7 Будова електромагнітної муфти

Ведена частина (індуктор) 4 розташовується всередині ведучої і з'єднується через редуктор 6 з виконавчим органом 7. На індукторі розташована обмотка збудження 3, яка через контактні кільця 5 підключається до джерела живлення. Струм збудження  $I$  може регулюватися за допомогою резистора  $R$ , за рахунок чого відбувається зміна швидкості ведучої частини муфти, а отже, і виконавчого органа 7. Розглянемо процес регулювання швидкості  $\omega'$ .

Якщо струм  $I=0$ , то між індуктором і якорем відсутній магнітний зв'язок і індуктор нерухомий. При протіканні струму по обмотці 3 в повітряному зазорі виникає магнітне поле, під дією якого в якорі 2, що обертається, будуть циркулювати вихрові струми. Взаємодія цих струмів з магнітним полем створює обертовий момент, під дією якого індуктор починає обертатися в той же бік з вихідною швидкістю  $\omega$ . Для отримання жорстких механічних характеристик використовуються замкнені схеми керування струмом збудження, наприклад зі зворотнім зв'язком по швидкості.

В ЕММ її частини зв'язані через магнітне поле. Також існують муфти з механічним зв'язком. В них передача обертового моменту від ведучої до веденої частини здійснюється за допомогою механічного тертя, або зачеплення за рахунок створення між ними магнітного поля електромагніту з нормальним тиском. В електроприводах застосовують і гідравлічні муфти.

**Гальмівні пристрої.** В більшості електроприводів застосовуються гальма з приводом від електромагнітів. Вони можуть бути постійного та змінного струму.

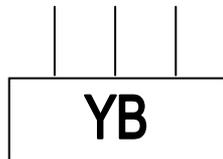
Принцип дії нормально замкнутого колодкового гальма з приводом від електромагніта полягає в наступному: у вихідному положенні, коли

електромагніт не підключений до джерела живлення, його колодки за допомогою пружини притискаються до гальмівного шківa, розміщеного на валу двигуна і загальмовують його. При ввімкненні двигуна напруга одночасно подається і на обмотку електромагніта. Якір електромагніта притягується до осердя, розгальмовує колодки гальма і двигун починає обертатися. При відключенні двигуна вимикається і електромагніт, і пружина знову притискає колодку до шківa. Обмотка електромагніта зазвичай підключається безпосередньо на якір двигуна постійного струму або статор асинхронного чи синхронного двигуна. Час ввімкнення таких гальм складає 0,15...2,5 с, а час вимкнення 0,1..1 с.

Гальма розрізняють за довжиною хода електромагніта – на короткоходові та довгоходові. Головним параметром для вибору електрогальма є його гальмівний момент ( $H \cdot m$ ). Наприклад, довгоходові гальма змінного струму серії КМТ розраховані на гальмівні моменти 450...4000  $H \cdot m$  і мають хід електромагніта в межах 50...80 мм. Час їх ввімкнення 0,1...0,5 с, а вимкнення – 0,15...0,6 с.

Крім гальм, що представляють собою окремі пристрої, в електроприводах знаходять широке застосування гальма, що вбудовуються в двигун, складаючи з ним єдиний конструктивний модуль. Такі приводи, як правило, виконуються дисковими і керуються від електромагнітів постійного і змінного струму.

На схемах електромагнітні гальма позначають літерами **УВ**:



Також в електроприводах застосовують електрогідравлічні штовхачі (ЕГШ), у склад яких входять: електродвигун змінного струму невеликої потужності, відцентровий насос і гідроциліндр з поршнем. Внутрішня порожнина ЕГШ заповнена маслом. Гальма, що випускаються з ЕГШ розраховані на моменти від 100 до 12500  $H \cdot m$  при ході колодок 1,2...1,8 мм.

## ТЕМА 6: АСИНХРОННІ МАШИНИ

До асинхронних відносяться машини змінного струму, частота обертання ротора  $n$  яких при постійній частоті змінного струму змінюється зі зміною навантаження і відрізняється від синхронної, тобто від частоти обертання магнітного поля статора  $n_0$ . Звідси і назва – «асинхронна машина».

Асинхронні машини можуть бути генераторами або двигунами. Характеристики асинхронних двигунів (АД) дуже добрі, і вони широко застосовуються в техніці. Понад 85% усіх електродвигунів – це трифазні асинхронні двигуни. Асинхронні генератори (АГ) практично не використовуються, тому що мають дуже низькі експлуатаційні якості.

### 6.1 Будова та принцип дії АД

Трифазний АД складається з нерухомого статора і ротора, що обертається. Статор і ротор скріплюються в одне ціле за допомогою підшипникових щитів, на підшипники яких спирається вал ротора. Двигуни із самовентиляцією в закритому виконанні з торця мають кришку - корпус, що прикриває вентилятор, котрий виступає зовні.

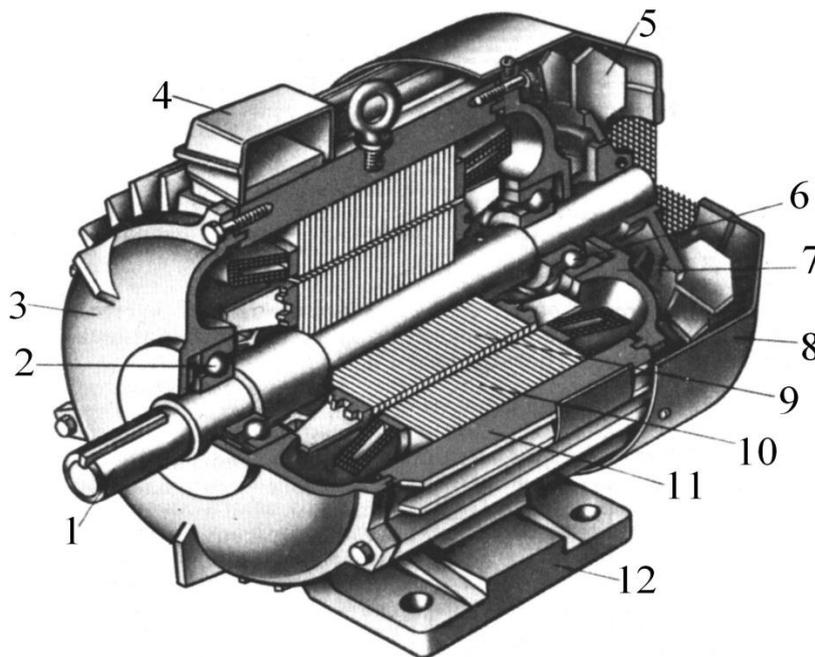


Рис.6.1 Будова асинхронного двигуна з короткозамкненим ротором  
1 – вал; 2,6 – підшипники; 3,7 – підшипникові щити; 4 – клемна коробка; 5 – вентилятор; 8 – корпус; 9 – осердя ротора; 10 – осердя статора з обмоткою; 11 – корпус; 12- станина

**Статор** АД складається з корпусу, сталевго осердя і трифазної обмотки. Корпус відливається з чавуну, сталі або алюмінію (при малих потужностях машини). Осердя має вигляд порожнистого циліндра,

набраного з тонких (0,3–0,5 мм) ізолюваних один від одного спеціальним лаком листів штампованої електротехнічної сталі. З внутрішньої сторони осердя симетрично по колу знаходяться пази для розміщення і закріплення в них трифазної обмотки.

Обмотка статора виготовляється з міді й складається з 3 фаз:  $C_1-C_4$  (фаза А);  $C_2-C_5$  (фаза В);  $C_3-C_6$  (фаза С). Початки  $C_1, C_2, C_3$  і кінці  $C_4, C_5, C_6$  фаз обмоток виведені на клемну коробку, закріплену на станині. Фази з'єднуються зіркою або трикутником.

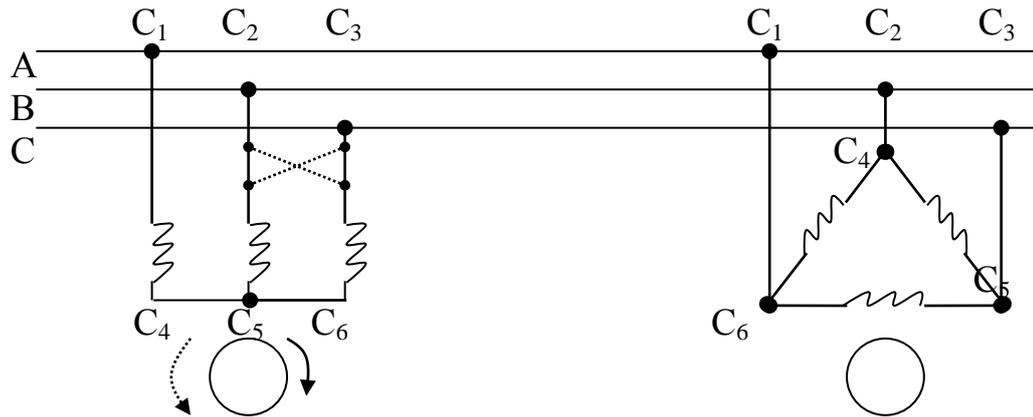


Рис.6.2 З'єднання фаз статора

**Призначення статора** – створювати обертове магнітне поле машини за допомогою трифазної обмотки, що живиться змінним струмом.

**Призначення ротора** – перетворювати електричну енергію в механічну обертового руху за допомогою індукованої ЕРС і струмів в його обмотці.

**Ротор** асинхронного двигуна складається з валу, сталевго осердя, побудованого аналогічно осердю статора, і прокладеної у ньому обмотки.

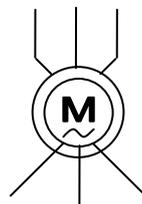
Ротор буває двох типів:

- короткозамкнений;
- фазний.

**Умовні позначення асинхронних машин:**



Асинхронний двигун з КЗ ротором



Асинхронний двигун з фазним ротором



Асинхронний генератор

**КЗ ротор** має обмотку типу «білячого колеса» з мідних або алюмінієвих стержнів, що без ізоляції вставляються в пази осердя ротора і з торців замикаються накоротко кільцями з того ж матеріалу. В двигунах єдиних серій потужністю до 100 – 200 кВт така обмотка разом з

вентиляційними лопатями виготовляється шляхом заливки пазів ротора розплавленим алюмінієм.

**Фазний ротор** або ротор з контактними кільцями має трифазну мідну обмотку, виконану аналогічно обмотці статора, кінці якої з'єднується зіркою. Початки її фаз (позначаються  $P_1, P_2, P_3$ ) виводяться на латунні або мідні контактні кільця, встановлені на валу ротора, надійно ізольовані одне від одного і від корпусу, котрі обертаються разом з валом. Кільця торкаються нерухомих графітних щіток, що з'єднуються з трифазним пусковим реостатом.

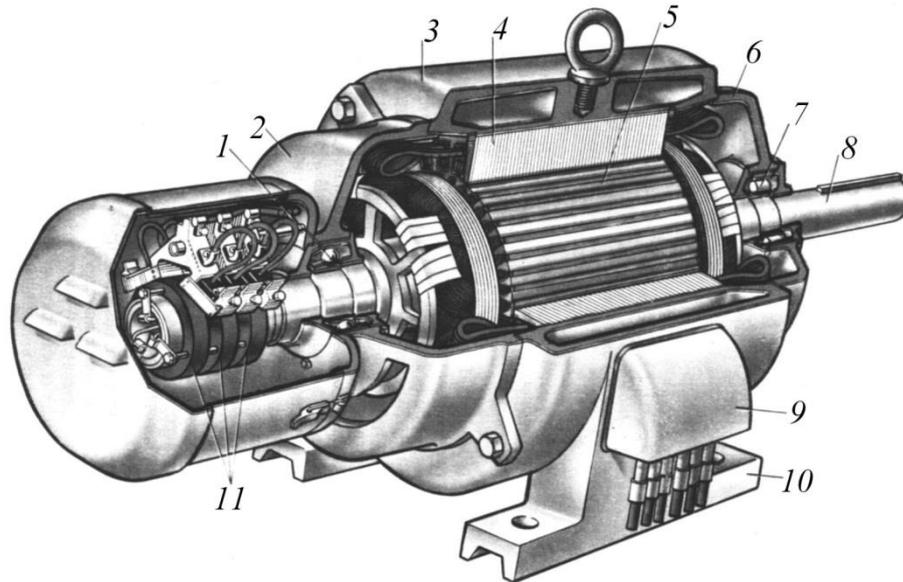


Рис.6.3 Будова асинхронного двигуна з фазним ротором  
1,7 – підшипники; 2– кришка; 3 – корпус; 4 – осердя статора з обмоткою; 5 – обмотка ротора; 6- кришка вентилятора; 8 – вал; 9 – клемна коробка; 10 – станина; 11 – контактні кільця зі щітками

**Обертове магнітне поле** – це багатополусне поле, що утворюється в повітряному зазорі струмами  $I_A, I_B, I_C$ , які протікають в пазах обмотки статора при її включенні в трифазну мережу. Це поле обертається з синхронною частотою:

$$n_0 = \frac{60f}{P} \frac{\text{об}}{\text{хв}},$$

де  $f$  - частота струму мережі;

$P$  - число пар магнітних полюсів, створених обмоткою статора.

При  $P=1$  поле обертається зі швидкістю  $n_0=3000\text{об/хв}$ .

Кутова швидкість обертання поля:

$$\omega_0 = \frac{2\pi f}{P}, \frac{\text{рад}}{\text{с}}.$$

**Принцип дії** асинхронного двигуна полягає в наступному: обертове магнітне поле, перетинаючи стержні обмотки ротора, наводить в них ЕРС. Під дією цієї ЕРС в обмотці ротора виникають індукційні струми. Взаємодія магнітного поля статора зі струмами в обмотці ротора призводить до виникнення сили  $F$ , що створює обертовий момент. Цей момент примушує ротор обертатися в ту саму сторону, що і магнітне поле з частотою  $n$ , яка завжди менша за частоту обертання поля  $n_0$ .

Величина  $n_s = n_0 - n$  – називається частотою ковзання.

Відносне відставання ротора від магнітного поля статора називають **ковзанням** (виражається як у відсотках, так і в частках):

$$S = \frac{n_0 - n}{n_0}, \quad \text{звідки} \quad n = (1 - S)n_0.$$

Зазвичай ковзання коливається в межах  $S_n = 1 \dots 5 \%$ , при холостому ході ковзання невелике  $S_{xx} = 0,01 \dots 0,05\%$ . Частота струму в обмотках ротора  $f_2$  пов'язана з частотою струму в статорі  $f_1$  таким рівнянням

$$f_2 = S \cdot f_1.$$

## **6.2 Механічна характеристика АД з КЗ ротором**

Повне рівняння механічної характеристики АД має вигляд:

$$M = \frac{3U_\phi^2 r_2'}{\omega_0 S \left[ \left( \frac{r_2'}{S} \right)^2 + (x_1 + x_2')^2 \right]},$$

де  $M$  – обертовий момент АД;

$U_\phi$  – фазна напруга, підведена до двигуна;

$r_2'$  – приведений активний опір кола фази ротора;

$x_1$  – реактивний опір фази обмотки статора (активний опір обмотки статора малий і ним нехтують);

$x_2'$  – приведений реактивний опір фази обмотки ротора.

Використовувати дану формулу для побудови механічної характеристики важко, так як в каталогах не вказуються параметри  $x_1$ ,  $x_2$  та  $r_2'$ . Тому на практиці частіше використовують спрощене рівняння механічної характеристики (формулу Клосса):

$$M = \frac{2M_{\max}}{\frac{S}{S_K} + \frac{S_K}{S}}.$$

Тут  $M_{\max}$  – максимально можливий (критичний) момент електродвигуна,

$S_K$  – критичне ковзання, яке визначається за формулою:

$$S_K = S_H (\lambda + \sqrt{\lambda^2 - 1}),$$

$\lambda = \frac{M_K}{M_H}$  – коефіцієнт перевантаження, його значення задається в

каталозі для кожного типу двигуна;

$$S_H = \frac{n_0 - n_H}{n_0} \text{ – номінальне ковзання ;}$$

$n_H$  – номінальна швидкість АД.

Механічна характеристика АД перетинає вісь ординат в точці  $M = 0$ ;  $S = 0$ . Ця точка відповідає синхронній частоті обертання  $n_0$ , являючись точкою ідеального холостого ходу.

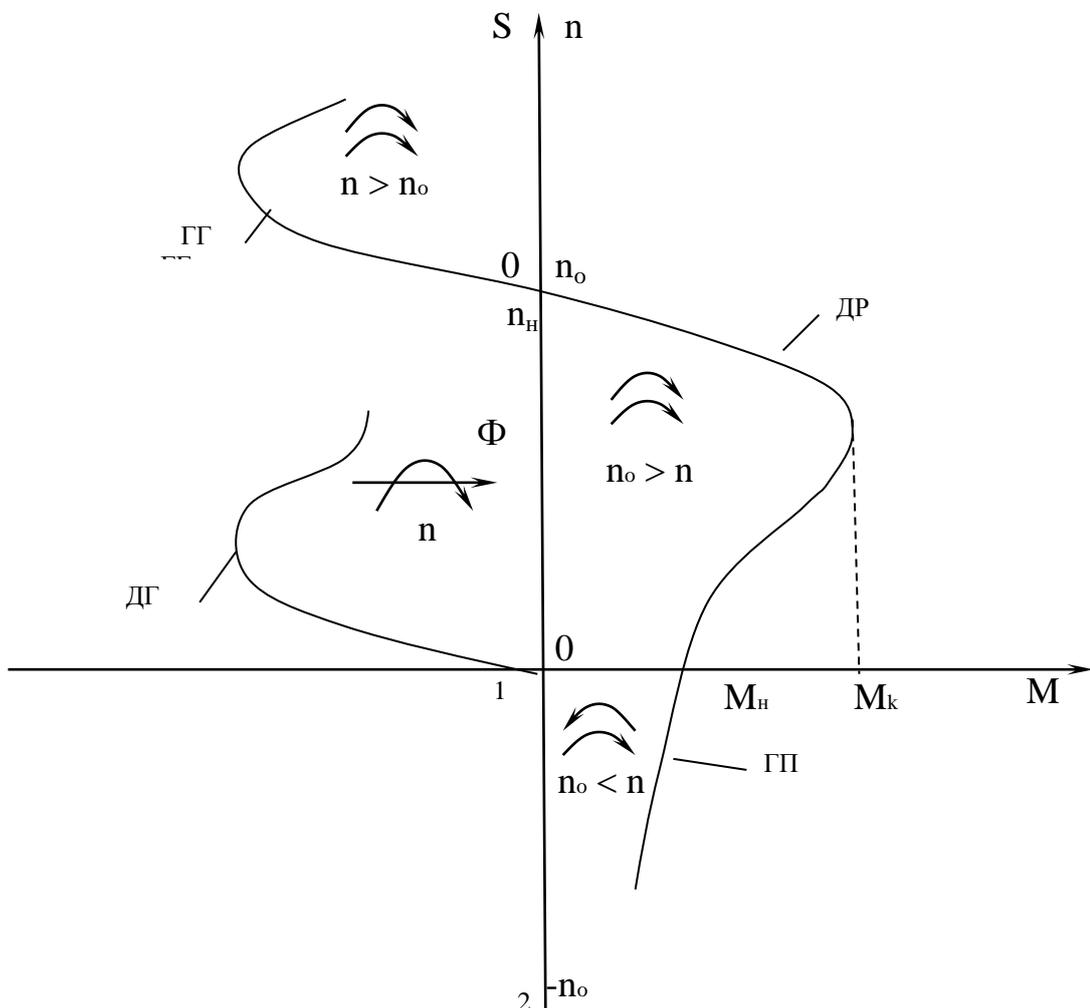


Рис. 6.4 Механічна характеристика АД з КЗ ротором з гальмівними режимами

Ділянка  $1 > S > 0$  і частоти обертання  $0 < n < n_0$  відповідає **двигунному режиму** (ДР). Це номінальний режим роботи двигуна, який характеризується його номінальними характеристиками  $n_H$ ,  $M_H$ .

Якщо, не відключаючи обмотку статора від живлення, привести ротор до обертання від стороннього джерела енергії в напрямку обертання поля, машина буде працювати в генераторному режимі, перетворюючи механічну енергію в електричну і віддаючи її в ланцюг. При цьому буде виконуватися **генераторне гальмування** (ГГ), відповідаючи ковзанню від  $S = 0$  до  $S = -1$ .

Якщо ж ротор двигуна привести до обертання в напрямку, протилежному обертанню поля, то утвориться гальмівний момент, який направлений проти руху ротора, що обертається по інерції, і асинхронна машина гальмує механізм. Такий режим називається **гальмуванням противмиканням** (ГП). Він може виникнути, наприклад, при спуску важких вантажів, коли двигун включений в бік підйому, а під дією моменту, який створюється вантажем, він обертається в бік спуску. В режимі ГП:  $-n_0 < n < 0$ ;  $2 > S > 1$ .

Якщо при цьому гальмуванні двигун не відключити від живлення, то станеться його розгін в зворотній бік (реверсування).

**Динамічне гальмування** (ДГ) двигуна виконується відключенням обмотки статора двигуна, що працює, від живлення і підключенням її до джерела постійного струму. При цьому фази обмоток статора можуть вмикатися різними способами, одна з фаз може зовсім не вмикатися. Дроти обмотки ротора, що обертається за інерцією, будуть перетинати нерухоме в просторі магнітне поле статора, в обмотках виникають індукційні струми, взаємодія яких з полем машини утворює гальмівний момент. Для обмеження великих струмів ротора обмотка фазного ротора на час гальмування замикається на реостат.

### 6.3 Механічна характеристика АД з фазним ротором

Двигун з фазним ротором має кращі умови пуску завдяки наявності пускового реостату. Його механічна характеристика має вигляд декількох кривих, число котрих відповідає числу ступенів пускового реостату. Для побудови природної механічної характеристики (при повністю вимкненому пусковому реостаті) використовують вже відому формулу Клосса

$$M = \frac{2M_{\max}}{\frac{S}{S_K} + \frac{S_K}{S}}$$

З цього рівняння можна визначити і штучні (реостатні) характеристики

$$M_{ui} = \frac{2M_{\max}}{\frac{S}{S_{K.ui}} + \frac{S_{K.ui}}{S}},$$

де  $i$  – порядковий номер штучної механічної характеристики ( $i=1,2,3,4\dots$ );

$S_{K.iii}$  – критичне ковзання  $i$ -ої штучної механічної характеристики

$$S_{K.iii} = S_K \cdot \frac{R_{rom} + R_i}{R_{rom}},$$

$R_{rom}$  – опір ротора,  $R_i$  – опір  $i$ -го ступеня пускового реостату.

При значенні сумарного приведенного активного опору ротора  $R_2' + R\delta' = X_1 + X_2'$  пусковий момент дорівнює максимальному (критичному). Тут  $R\delta$  – сумарний опір пускового реостату.

Таким чином, асинхронний двигун розвиває при пуску ( $S=1$ ) найбільший момент  $M_K$ , коли приведений активний опір фази обмотки ротора ( $R_2' + R\delta'$ ) рівний сумарному індуктивному опору обмоток статора й ротора ( $X_1 + X_2'$ ).

Пуск двигуна з фазним ротором здійснюється подачею напруги живлення мережі із заздалегідь уведеним у ланцюг ротора максимальним додатковим опором  $R\delta$ , котрий у цьому прикладі складається з двох ступенів  $R\delta_1 + R\delta_2$ .

Робоча точка на реостатній характеристиці 3 ( $R\delta = R\delta_1 + R\delta_2$ ) буде переміщуватися по ділянці  $a-b$  цієї характеристики. Досягнувши швидкості, яка відповідає точці  $b$ , опір пускового реостата зменшується ( $R\delta = R\delta_1$ ), і двигун починає працювати на ділянці  $b-z$  характеристики 2, розганяючись від швидкості, що відповідає точці  $b$ , до швидкості, котра відповідає точці  $z$ .

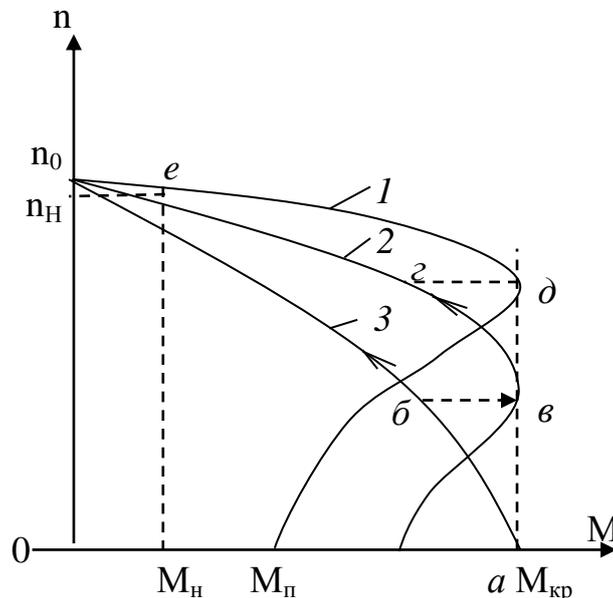


Рис. 6.5 Механічна характеристика АД з фазним ротором

При досягненні цієї швидкості відключається і опір  $R\delta_1$ , ротор двигуна стає короткозамкненим ( $R\delta = 0$ ), і двигун працює на ділянці  $d - e$  природної характеристики 1, розганяється до номінальної швидкості  $n_H$ , що відповідає номінальному моменту на валу  $M_H$  (точка  $e$ ).

Двигуни з фазним ротором мають гарні пускові характеристики, проте вони дорожчі у виготовленні і менш надійні в експлуатації, мають гірші енергетичні показники (ККД і  $\cos\phi$ ), ніж двигуни з короткозамкненим ротором. Тому вони застосовуються лише тоді, коли короткозамкнені двигуни не проходять за нагрівом (приводи з великою частотою включення), не забезпечують необхідний пусковий момент (приводи маховиків, приводи кранів та інших вантажопідйомних механізмів) або не можуть бути встановлені за умов роботи мережі.

Гальмівні режими такого двигуна не відрізняються від двигунів із короткозамкненим ротором.

#### **6.4 Пуск асинхронного двигуна**

При пуску асинхронного двигуна виникають великі пускові струми, які в 5-10 разів перевищують номінальні. Це призводить до зниження напруги в мережі і негативно відображається на роботі інших споживачів, включених в цю мережу. Тому при пуску намагаються знизити пусковий струм.

Способи пуску асинхронних двигунів зводяться до наступного:

а) для двигунів з фазним ротором:

- пуск за допомогою пускових реостатів. Для зменшення числа ступенів пускового реостата при пуску двигуна застосовують паралельне включення в ланцюг ротора активних і індуктивних опорів. Подібні схеми пуску знайшли застосування в станціях керування двигунами бурових лебідок.

б) для двигунів з короткозамкненим ротором:

- прямий пуск від мережі (виконується тільки для двигунів малої й середньої потужності внаслідок великих пускових струмів);
- пуск плавним підвищенням частоти або напруги;
- пуск за допомогою пускового трансформатора (рис. 6.6);

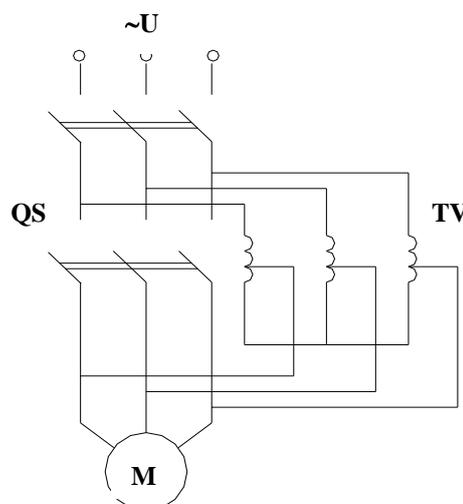


Рис. 6.6 Пуск АД за допомогою пускового трансформатора

Спочатку до статора через автотрансформатор TV підводиться знижена напруга, яку поступово підвищують зміною положення повзунка. Потім, коли ротор двигуна розженеться й досягне частоти обертання, близької до робочої, замикаються контакти вимикача QS, який закорочує (тобто фактично відключає) автотрансформатор і подає на статор повну напругу мережі;

– пуск за допомогою опорів у ланцюзі статора. Такий пуск застосовується в потужних двигунах, наприклад, при пуску бурових насосів. Схема аналогічна схемі автотрансформаторного пуску, тільки замість трифазного автотрансформатора підключаються три активних або індуктивних опори (реактори);

– пуск переключенням статорної обмотки з зірки на трикутник (рис. 6.7). Застосовується для двигунів середньої потужності. При такому пуску лінійний струм, момент і потужність двигуна зменшуються в три рази.

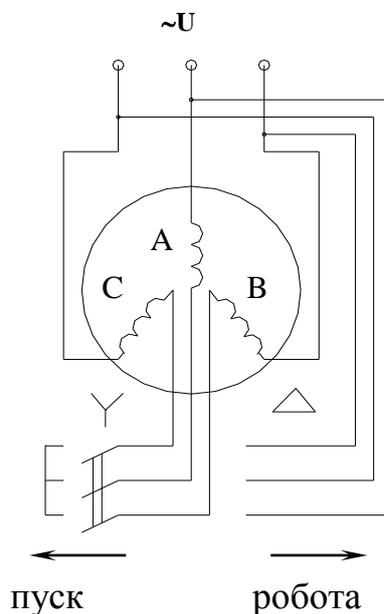


Рис 6.7 Пуск переключенням обмотки статора

### 6.5 Регулювання швидкості обертання та реверсування АД

Для регулювання частоти обертання АД у невеликих межах іноді застосовують **регулювання зміною напруги  $U$**  на обмотці статора. Таке регулювання вважається малоефективним, т. я. воно супроводжується різким зниженням моменту і перевантажувальної здатності:

$$M = 9550 \frac{P}{n} = 9550 \frac{U^2}{R \cdot n}$$

Регулювання виконується включенням в ланцюг статора резистора зі змінним активним опором, індуктивних котушок з висувними осерддями, а в потужних двигунах – за допомогою автотрансформатора.

**Полюсне регулювання швидкості** – найбільш простий і розповсюджений спосіб. Він заснований на зміні числа пар магнітних полюсів  $p$  поля статора, яке обертається

$$n = \frac{60f}{p} .$$

Мати дві і більше обмоток на статорі для зміни числа пар полюсів не вигідно, так як це збільшує вартість і розміри двигуна, тому це число змінюють, використовуючи різне з'єднання котушок фаз.

На практиці для зміни швидкості обертання широко застосовують дві схеми перемикання обмоток статора: з одинарної зірки на подвійну –  $Y/Y_Y$  і з трикутника на подвійну зірку  $\Delta/Y_Y$  (рис. 6.8).

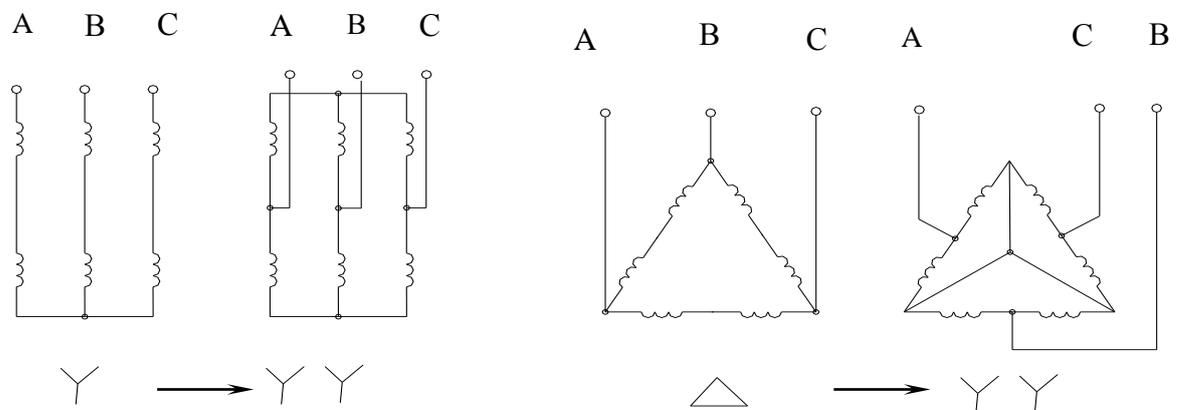


Рис. 6.8 Полісне регулювання швидкості обертання

Промисловістю виготовляють двош-, трьох-, і чотиришвидкісні АД, наприклад, чотиришвидкісні з двома незалежними обмотками й перемиканням кожної з них на різні частоти обертання  $n_0=500/750/1000/1500$  об/хв. Перемикання обмоток зазвичай виконується спеціальним електротехнічним перемикачем – контролером.

Для двигунів з фазним ротором введенням спеціально розрахованого регулювального реостата в ланцюг ротора можна в достатньо широких межах змінювати швидкість обертання, що вигідно відрізняє цю конструкцію двигунів порівняно з двигунами із короткозамкнутим ротором (**роторне регулювання швидкості**). Реостат при цьому повинен бути розрахований на тривале навантаження струмом ротора, а не на короткочасне, як при пуску. На практиці реостатне регулювання швидкості обертання застосовується рідко, оскільки пов'язане із збільшенням втрат потужності в реостаті.

Найбільш перспективним способом регулювання швидкості є **частотне регулювання**. Зміна частоти струму статора  $f$  дозволяє плавно

регулювати частоту обертання АД в широких межах – десятки і сотні разів від мінімальної швидкості.

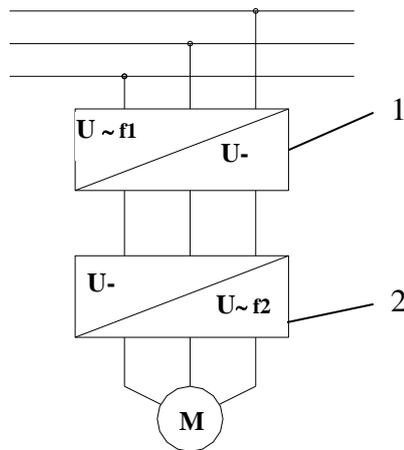


Рис. 6.9 Структурна схема частотного регулювання швидкості

Таку можливість дають напівпровідникові тиристорні перетворювачі частоти (ТПЧ), які вмикають між промисловою мережею частотою 50 Гц і двигуном. Спочатку змінна напруга  $U_{\sim f1}$  частотою  $f1=50$  Гц випрямляється за допомогою трифазного випрямляча 1, потім випрямлена напруга  $U-$  інвертується – перетворюється в змінну напругу потрібної частоти  $f2$  за допомогою спеціального пристрою – інвертора 2. Недоліком методу „Перетворювач частоти – АД” є значна вартість обладнання.

Для **реверсування** АД (зміни напрямку обертання) необхідно змінити напрям обертання магнітного поля. Це можна здійснити, якщо перемкнути два будь-які лінійні проводи, що з’єднують трифазну мережу із статором двигуна. Таким чином дві фази міняються місцями. Цей процес також має назву **перезафазування**.

### **6.6 Однофазні та двофазні асинхронні двигуни**

У системах керування та автоматичі використовують однофазні та двофазні АД малої потужності. Якщо на статорі двигуна розташувати однофазну обмотку, то змінний струм буде індукувати пульсуючий магнітний потік. У обмотці ротора будуть індукуватися струми та створяться сили, що протилежно спрямовані з обох боків ротора. Тобто результуючий електромагнітний момент дорівнюватиме нулеві. Таким чином, пусковий момент відсутній. Для створення початкового пускового моменту в однофазних двигунах на статорі передбачають додаткову обмотку, яка вмикається під час пуску через конденсатор, що забезпечує зсув фази струму відносно струму у робочій обмотці. Обертове магнітне поле стає круговим. Це дає можливість створити пусковий момент. У двофазних двигунах конденсатор вмикається постійно в одну з фаз. Ці двигуни також називають конденсаторними.

## ТЕМА 7: СИНХРОННІ МАШИНИ

Як і усі електричні машини, синхронна машина обернена і може використовуватися в промисловості як генератори та двигуни переважно великої потужності. Синхронні двигуни (СД) широко розповсюджені в НГП, особливо для електроприводів середньої і великої потужності (поршневі компресори, бурові установки, насоси).

**Частота обертання** ротора синхронної машини дорівнює частоті обертання магнітного поля, тобто  $n_0=n$ , а ковзання  $S=0$ .

**Умовні позначення** синхронних машин:



Синхронний двигун



Синхронний генератор

### 7.1 Будова та принцип дії синхронної машини

Синхронна машина складається зі статора і ротора. Конструкція статора принципово не відрізняється від конструкції статора асинхронного двигуна. Ротор являє собою електромагніт, обмотка якого живиться від джерела постійного струму (рис. 7.1). Ця обмотка збуджує постійний магнітний потік і називається обмоткою збудження (ОЗ).

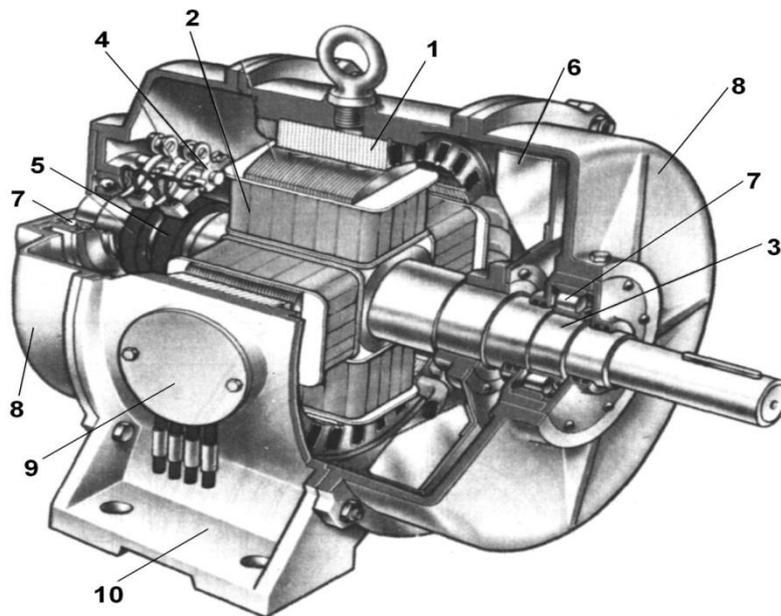


Рис. 7.1 Будова синхронної машини

- 1 – статор, 2 – обмотка збудження, 3 - вал, 4 – щітки з щіткотримачами,  
5 – контактні кільця, 6 – вентилятор, 7 – підшипники, 8 – корпус,  
9 – клемна коробка, 10 - станина

В деяких конструкціях ротор має дві обмотки: обмотку збудження 4 і пускову короткозамкнену обмотку у вигляді клітки для білки. В якості джерела живлення обмотки збудження частіше за все використовують генератор постійного струму 2 невеликої потужності (він споживає 0,3 – 3% від потужності всього СД), який називається збуджувачем і встановлюється на одному валу з синхронним двигуном 1 (рис. 7.2).

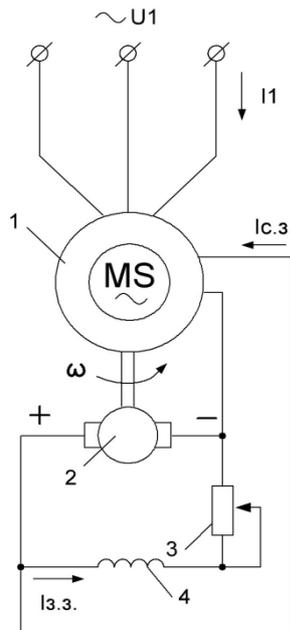


Рис. 7.2 Схема структурна синхронного двигуна

Регулювання струму збудження двигуна  $I_{сз}$  виконується зміною за допомогою резистора 3 струму  $I_{зз}$  збудження обмотки збуджувача 4. В даний час широко впроваджуються системи збудження синхронних двигунів із живленням ОЗ від мережі змінного струму через некеровані або керовані тиристорні напівпровідникові випрямлячі (тиристорні збуджувачі).

Обертовий момент СД обумовлений взаємодією магнітного поля обмотки статора і магнітного поля, яке створюється обмоткою збудження або постійними магнітами на роторі. Взаємодія цих полів може створити постійний по напрямку обертовий момент СД тільки в тому випадку, коли ротор буде обертатися зі швидкістю магнітного поля  $n_0$ , тобто синхронно з полем, що обертається.

## **7.2 Механічна характеристика синхронного двигуна**

Механічна характеристика СД представляє собою пряму горизонтальну лінію з ординатою  $n_0 = \frac{60f}{p}$ , яка має місце до деякого максимального моменту навантаження  $M_{\max}$ , перевищення якого

приводить до випадання СД із синхронізма, тобто до порушення синхронного обертання ротора і магнітного поля статора.

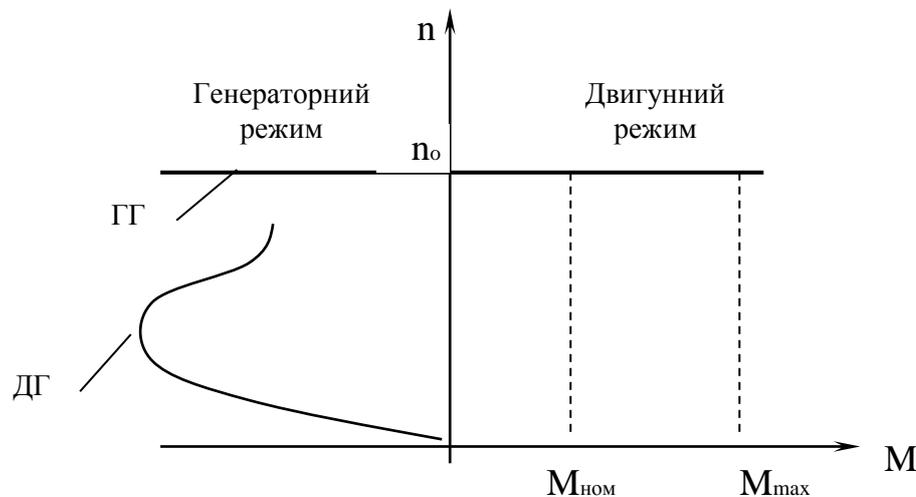


Рис. 7.3 Механічна та гальмівні характеристики СД

Ділянка механічної характеристики правіше осі ординат відповідає **двигунному режиму** роботи, а лівіше осі – режиму **генераторного** (рекуперативного) **гальмування** (ГГ). Для переведу СД в цей режим потрібно, щоб момент опору змінив свій знак, тобто став двигунним. Під дією цього моменту ротор починає прискорювати свій рух, а СД – віддавати енергію в коло. СД може працювати також в режимі **динамічного гальмування** (ДГ), для чого обмотку статора відключають від кола змінного струму і закорочують на додаткові резистори, а обмотка збудження залишається підключеною до джерела збуджування. Механічні характеристики в цьому випадку подібні характеристикам асинхронного двигуна при динамічному гальмуванні.

Гальмування противмиканням СД використовується рідко, так як переведення СД в цей режим супроводжується значними перепадами струму і моменту, потребує струмообмеження і застосування складних схем керування.

### **7.3 Пуск синхронного двигуна**

При вмиканні синхронного двигуна механічна інерція ротора велика і обертаючий момент на валу практично дорівнює нулеві. Тому для пуску треба спочатку розкрутити вал двигуна до швидкості, близької до синхронної. Такий складний пуск значною мірою обмежує використання синхронного двигуна.

Відомі наступні способи пуску синхронних двигунів:

- пуск без навантаження за допомогою додаткового розгінного двигуна. Синхронний двигун розганяється до „підсинхронної” частоти, коли ковзання не перебільшує 5%, потім виникає синхронний обертаючий

момент. Для цього моменту переводить двигун у режим синхронної роботи;

– частотний пуск від джерела електроенергії з плавно регульованою частотою. При такому пуску двигун живиться від окремого синхронного генератора, частота струму якого плавно підвищується від нуля. При цьому синхронний двигун починає синхронне обертання вже при достатньо малій частоті, потім частоту поступово підвищують. Обмотки збудження генератора і двигуна в цьому випадку необхідно живити від окремих джерел постійного струму, щоб отримати найбільш благоприємні для пуску співвідношення струмів збудження генератора й двигуна. Недоліком методу є повільний розгін двигуна, а також висока вартість обладнання;

– асинхронний пуск під навантаженням. Цей спосіб є основним способом пуску, який виконується вмиканням статорної обмотки в мережу живлення при номінальній або пониженій напрузі. Для розгону СД до підсинхронної частоти служить окрема пускова обмотка, аналогічна обмотці ротора АД з КЗ ротором, утворена стержнями, які закладені в полюси ротора. Обмотку збудження на період пуску замикають на великий розрядний опір, який вибирають із таким розрахунком, щоб напруга на ОЗ не перевищувала безпечно для ізоляції значення 1-2 кВ. Коли двигун досягає „підсинхронної” частоти, обмотка збудження відмикається від опору та вмикається на джерело постійного струму. СД втягується в синхронізм і продовжує працювати в синхронному режимі. Якщо ОЗ на час пуску залишити розімкненою, то велика ЕРС, що індукується у ній, призведе до пробивання ізоляції. Потужні СД пускають при зниженій напрузі на статорній обмотці.

Часто застосовують більш просту схему з наглухо підключеним збуджувачем З і без розрядного опору (рис. 7.4). Тут якір збуджувача сам виконує роль розрядного опору, і в його ланцюгу протікає змінний струм, який, однак, не чинить йому шкоди. При частоті обертання ротора, яка дорівнює 60-70 % синхронної частоти, збуджувач збуджується і збуджує СД, який втягується в синхронізм.

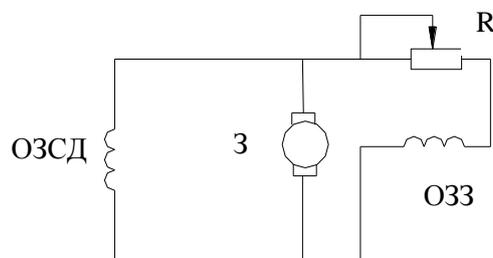


Рис. 7.4 Схема пуску СД  
З – збуджувач, ОЗЗ – обмотка збудження збуджувача,  
ОЗСД – обмотка збудження синхронного двигуна

## 7.4 Регулювання швидкості обертання та реверсування СД

Регулювання частоти обертання СД можливо тільки зміною частоти живлячої напруги. Звичайно СД мають порівняно велику потужність і живляться від мереж промислових підприємств разом з іншими споживачами, тому регулювання частоти струму є ускладненим. Виключення складають малопотужні СД і випадки живлення СД від автономного генератора з регульованою частотою струму.

Поява потужних статичних перетворювачів частоти (ПЧ) визначила практичні можливості створення регульованих синхронних електроприводів по системі ПЧ-СД, принцип роботи якої аналогічний вищерозглянутій системі ПЧ-АД.

Реверсування СД здійснюють перефазуванням аналогічно АД.

## 7.5 Переваги та недоліки синхронної машини

**Переваги** синхронних машин такі:

- високі ККД та коефіцієнт потужності;
- абсолютно жорстка механічна характеристика синхронного двигуна;
- незалежність частоти ЕРС від навантаження машини.

Синхронні машини мають й **недоліки**, що обмежують їх використання:

- складну будову та високу вартість;
- необхідність для двигуна двох джерел напруги живлення (змінної трифазної та постійної);
- ускладнення з пуском синхронного двигуна.

## 7.6 Синхронні компенсатори

**Синхронний компенсатор** являє собою синхронний двигун, що працює без навантаження на валу. Він може виконувати такі функції:

- підвищувати коефіцієнт потужності;
- стабілізувати напругу мережі.

Струмом збудження регулюють коефіцієнт потужності ( $\cos\phi$ ). При оптимальному струмові  $\cos\phi = 1$ . При індуктивному навантаженні мережі збільшують струм збудження (перезбуджують машину) і компенсатор генерує у мережу ємнісний (випереджуючий) струм. При ємнісному навантаженні недозбуджують машину. При цьому у мережу генерується індуктивний (відстаючий) струм. В обох випадках підвищується коефіцієнт потужності.

Для стабілізації напруги струм збудження підтримують сталим, він забезпечує ЕРС компенсатора, що дорівнює напрузі мережі. Якщо напруга мережі зменшиться, то компенсатор споживає реактивний випереджуючий струм. При підвищенні напруги компенсатор завантажує мережу реактивним відстаючим струмом. При великій потужності компенсатора це дає змогу стабілізувати напругу мережі у межах до 1,0 %.

## ТЕМА 8: МАШИНИ ПОСТІЙНОГО СТРУМУ

Машины постійного струму (МПС) широко використовуються як двигуни і як генератори. Двигуни постійного струму (ДПС) мають значні переваги перед двигунами інших типів:

- створюють великий пусковий момент;
- допускають плавне регулювання швидкості обертання різними способами.

### 8.1 Будова та принцип дії МПС

Конструкція МПС (рис. 8.1) складається з нерухомого статора, рухомого якоря, щіток (4), підшипникових щитів (2, 9), на яких кріпиться якір.

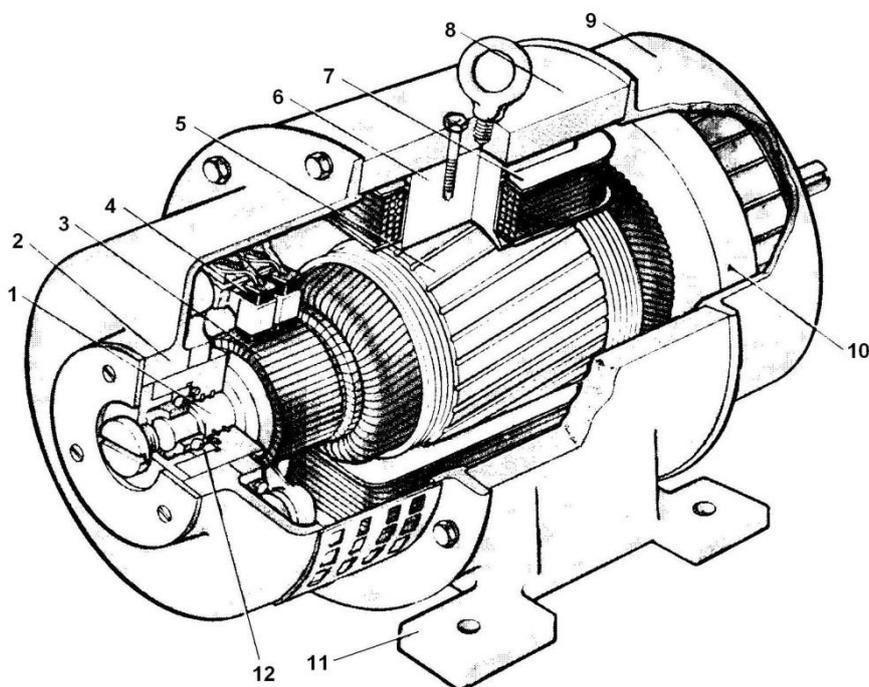
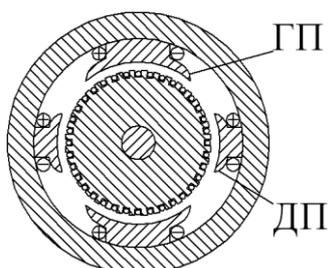


Рис. 8.1 Будова МПС

1 – вал; 2,9 – підшипникові щити; 3 – колектор; 4 – щітки; 5 – осердя якоря; 6 – головні полюси; 7 – котушки збудження; 8- корпус; 10 – вентилятор; 11- лапи для кріплення МПС; 12 - підшипники

**Статор** складається зі станини (8), на якій закріплені головні полюси (ГП) (6) із котушками збудження (7), котрі створюють постійний магнітний потік. В деяких конструкціях МПС є додаткові полюси (ДП), що знаходяться між головними полюсами і служать для зменшення іскріння під щітками. Для зменшення втрат від вихрових струмів, які індукуються змінним струмом якоря, осердя головних полюсів статора



(б) виконують шихтованим із електротехнічної сталі. Листи ізолюють один від одного. Полюси з котушками кріпляться до станини болтами. Робочий магнітний потік проходить через станину статора, основні повітряні проміжки, головні полюси і осердя ротора. До статора кріпляться два підшипникових щити (2,9) з підшипниками (12) та лапи (11) для закріплення МПС.

Рухомий **якір** складається з валу (1), колектора (3), осердя (5), у котрому знаходяться пази. В пазах розташована обмотка якоря, кінці секцій обмотки якоря припаяні до колектора (3). **Колектор** – найбільш складний вузол МПС. Він складається із трапецієвидних мідних пластин, закріплених у формі циліндра на валу. В малопотужних МПС пластини колектора заливаються пластмасою, в потужних МПС – кріпляться через ізоляцію за допомогою виступів у формі “ластівчиного хвоста”. До кожної пластини колектора припаяні виводи секцій обмотки якоря. Осердя якоря також шихтоване, листи ізолювані лаком. До колектора прилягає щітковий вузол (4). Сила притиснення щіток до колектора регулюється пружинами. Ця сила не повинна бути малою, бо збільшиться іскріння, і не має бути великою (швидко зітреться щітка).

На підшипниковому щиті розташоване оглядове вікно, через яке можна оглянути колекторно-щітковий вузол, не розбираючи машини.

Щітки – прямокутні бруски, які виготовлені з порошків графіту, вугілля, домішок металу і спресовані та обпалені при температурі  $t \approx 2000^\circ\text{C}$ . Через щітки подається напруга в обмотку рухомого якоря.

**Принцип дії** полягає в наступному: якщо до машини постійного струму підвести зовні напругу, то в обмотці якоря буде протікати струм  $I_a$ , а в обмотці збудження  $I_z$ . Завдяки колектору струми, що протікають в стержнях якірної обмотки, розташованих під північним полюсом, будуть протікати в один бік, а під південним - в протилежний. За правилом лівої руки в результаті взаємодії з провідниками зі струмом магнітного потоку, що створює обмотка збудження, на стержнях будуть діяти електромагнітні сили  $F$ , котрі примушують якір двигуна обертатися по годинній стрілці.

## 7.2 Способи збудження МПС

Ланцюг збудження і ланцюг якоря в машинах постійного струму можуть бути підключені до джерела живлення по-різному:

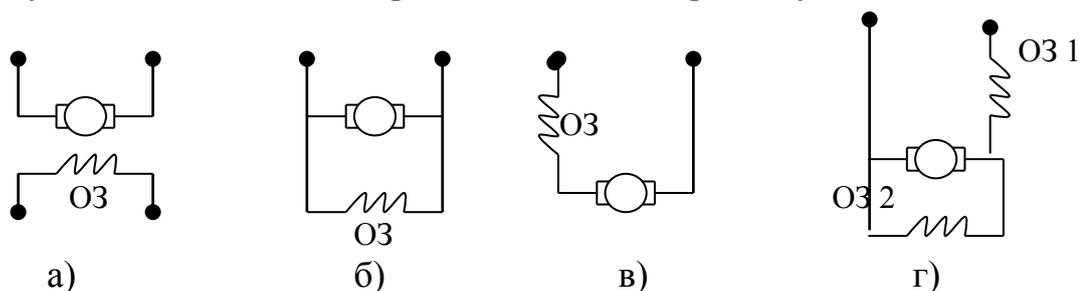


Рис. 8.2 Способи збудження машин постійного струму

а) незалежно (незалежне збудження) – обмотка збудження (ОЗ) живиться від стороннього джерела. В машинах малої потужності в якості обмотки збудження може застосовуватися постійний магніт. Незалежне збудження застосовується рідко, т. я. необхідно мати окреме джерело живлення;

б) паралельно (паралельне збудження) – ОЗ має велику кількість витків з тонкого проводу і великий опір;

в) послідовно (послідовне збудження) – ОЗ вмикається послідовно з якорем. Через неї протікають ті ж струми, що й через якір. Опір обмотки незначний (великий перетин проводу);

г) змішано ( послідовно-паралельне збудження) – на полюсах дві обмотки, які вмикаються послідовно та паралельно.

Кожна зі схем включення має певні переваги та недоліки і використовується для конкретних технологічних процесів.

### **8.3 Механічна та гальмівні характеристики ДПС**

У двигуна постійного струму наведена в обмотці якоря ЕРС  $E$  при обертанні якоря в магнітному полі статора – другорядне явище. Ця ЕРС направлена проти струму і прикладеної напруги  $U$ , тому її часто називають проти-ЕРС.

**Рівняння електричного стану ДПС** має вигляд:

$$U = E + R_{я} I_{я} \quad ,$$

де  $R_{я}$ ,  $I_{я}$  – опір і струм в ланцюзі якоря,

$E$  – проти-ЕРС,

$U$  – напруга живлення.

В момент пуску двигуна його ЕРС рівна нулю, а пусковий струм рівний

$$I_n = \frac{U}{R_{я}} \quad ,$$

таким чином пусковий струм  $I_n$  може бути в 10-30 разів більше номінального. Тому прямий пуск здійснюють дуже рідко.

По мірі розгону двигуна до номінальної частоти ЕРС збільшується, а струм зменшується.

ЕРС якоря і електромагнітний момент виражається формулами:

$$E = \kappa \cdot \Phi \cdot \omega \quad ,$$

$$M = \kappa \cdot \Phi \cdot I \quad ,$$

де  $\Phi$  - магнітний потік,  $I$  – струм якоря,

$\kappa = \frac{PN}{2\pi a}$  - конструктивний коефіцієнт двигуна,

$\omega$  - кутова швидкість двигуна,

$P$  - число пар полюсів,  
 $N$  - число активних провідників обмотки якоря,  
 $a$  - число пар паралельних гілок обмотки якоря.

Підставляючи рівняння для ЕРС і моменту в рівняння електричного стану, можна отримати вираз електромеханічної та механічної характеристики ДПС:

$$\omega = \frac{U - IR_{\text{я}}}{\kappa \cdot \Phi}$$

$$\omega = \frac{U}{\kappa \Phi} - \frac{MR_{\text{я}}}{\kappa^2 \Phi^2}.$$

Під природною механічною характеристикою двигуна розуміють характеристику, яку він має при номінальній напрузі джерела, повному потоці і без зовнішніх опорів в колі якоря. Характеристики при наявності зовнішніх опорів, понижений напрузі джерела або ослабленому потоці називаються штучними.

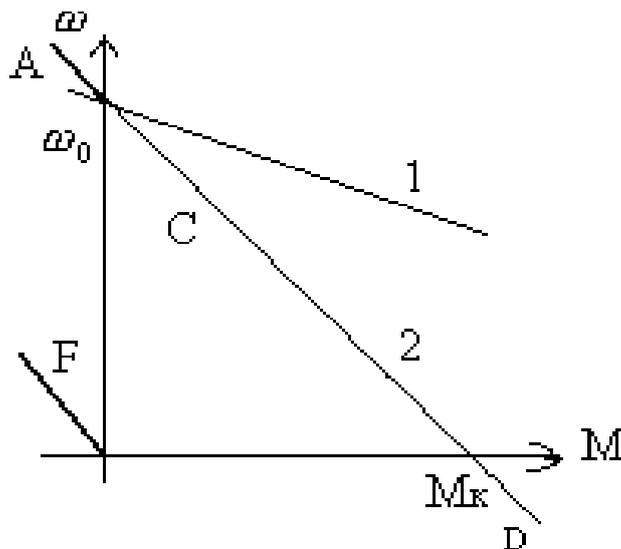


Рис.8.3 Механічна характеристика ДПС

Ці характеристики (рис. 8.3) представляють собою прямі лінії, які перетинаються в одній точці ( $M=0$ ;  $\omega = \frac{U}{\kappa \Phi} = \omega_0$ ). Інша точка характеристики (критична) має координати  $M = M_{\text{к}} = \kappa \Phi \frac{U}{R_{\text{я}}}$ ;  $\omega = 0$ .

Момент  $M_{\text{к}}$  називається пусковим моментом двигуна і визначається силою струму при нерухомому якорі  $I_{\text{к}}$  (пусковим струмом).

Нахил механічних характеристик визначається перепадом частоти обертання при зміні моменту від нуля до заданого значення:

$$\Delta\omega = \frac{R_{\text{я}}}{\kappa^2 \omega^2} \cdot M$$

Чим менше  $R_{\text{я}}$ , тим менше нахил, тобто тим характеристика жорсткіша. У ДПС великої і середньої потужності опір якоря невеликий і природна характеристика жорстка (лінія 1). Жорсткість характеристик значною мірою визначається способом збудження двигуна постійного струму. ДПС з паралельним або незалежним збудженням має характеристику, близьку до лінії 1, а ДПС з послідовним збудженням має „м'яку” характеристику, близьку до лінії 2. Механічна характеристика ДПС зі змішаним збудженням проходить між характеристиками 1 та 2.

Основний режим роботи ДПС – **двигунний** (ділянка С), на якій  $\omega_0 > \omega > 0$ . При зменшенні потужності на валу струм якоря зменшується, а частота обертання зростає. При струмові, рівному нулю  $\omega = \omega_0$ , а ЕРС машини рівна напрузі  $U$ . Для отримання цього режиму до вала двигуна повинен бути прикладений зовнішній момент, направлений в сторону обертання двигуна. Якщо цей момент збільшувати, частота обертання теж збільшиться ( $\omega > \omega_0$ ). ЕРС машини стане більша за напругу  $U$ , напрям струму якоря зміниться на зворотній і стане від'ємним. Машина в цьому випадку працює в режимі генератора і віддає (рекуперує) енергію в мережу, тобто ввімкнена паралельно з генератором мережі. По відношенню до привідного механізму електрична машина працює в гальмівному режимі, що відповідає ділянці А. Режим називається режимом **рекуперативного (генераторного) гальмування** (наприклад, електропотяг їде під ухил гори).

При збільшенні зусилля на валу двигуна частота обертання, навпаки, зменшується і, коли двигун зупиниться ( $\omega = 0$ ), струм стане рівним  $\frac{U}{R_{\text{я}}}$ , в цій точці  $E = 0$ . При подальшому збільшенні зусилля на валу момент опору стане більше обертового моменту двигуна, що поведе за собою зміну напрямку обертання двигуна, і, відповідно, знака ЕРС. Такий режим називається **режимом противмикання** (ділянка D). Практично режим противмикання частіше всього отримується при переключенні живлення двигуна, що обертається, на протилежний напрямок. Двигун гальмується, доходячи до нульової частоти обертання, потім змінює напрямок, переходячи в двигунний режим.

Іншим способом електричного гальмування двигуна є **динамічне гальмування**, при якому якір двигуна відключають від мережі і замикають на окремий зовнішній опір. Обмотка збудження залишається приєднаною до мережі. При цьому напруга  $U = 0$ , струм стає від'ємним

( $I_{я} = -\frac{E}{R_{я}}$ ), рівняння механічної характеристики приймає вигляд (на рисунку – ділянка F):

$$\omega = -\frac{R_{я}}{\kappa^2 \Phi^2} \cdot M .$$

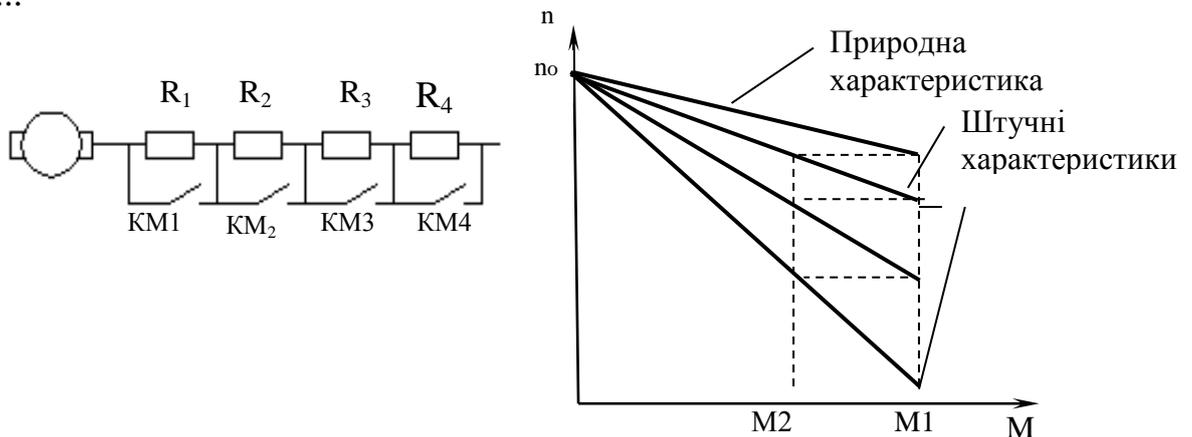
Нахил цієї характеристики при незмінному значенні магнітного потоку  $\Phi$  залежить від  $R_{я}$  і при наявності зовнішнього опору збільшується.

#### 8.4 Пуск ДПС

Способи пуску ДПС зводяться до наступного:

1) **прямий** (безреостатний) пуск – практично не застосовується внаслідок великих пускових струмів якоря;

2) **пуск з реостатом** в ланцюзі якоря – для обмеження пускових струмів в ланцюг якоря при пуску вводять пусковий реостат з деяким набором ступенів і по мірі розгону двигуна його опір зменшують шляхом замикання ступенів  $R_1, R_2, R_3, \dots$  контактами контакторів  $КМ_1, КМ_2, КМ_3, \dots$

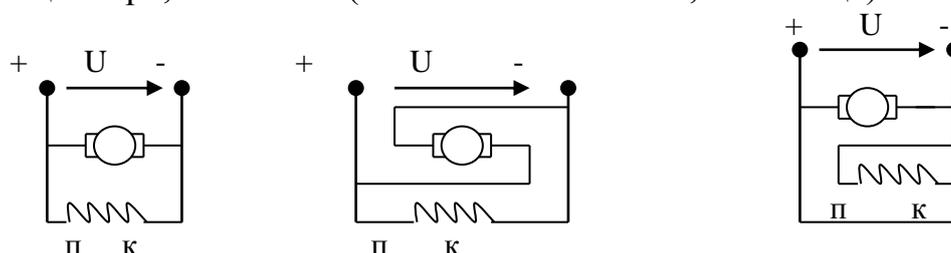


Після підключення двигуна до живлення по його якорю буде пробігати струм, і під дією моменту, викликаного цим струмом, якорь двигуна почне рухатися. По мірі розгону двигуна його обертовий момент і струм будуть зменшуватися внаслідок збільшення ЕРС. Коли момент зменшиться до величини  $M_2$ , здійсниться автоматичне замикання першого ступеня реостата  $R_1$ . Цей опір вибирають таким, щоб значення моменту, який з'явиться, дорівнювало би величині  $M_1$ . Потім аналогічно проходить замикання наступних ступенів. Після замикання останнього ступеня реостата двигун виходить на природну характеристику. Коливання моменту ( $M_1 - M_2$ ) у процесі пуску будуть тим менше, чим більше використовують ступенів реостата.

3) пуск плавним підвищенням напруги на якорі при живленні від автономного джерела регульованої напруги.

## 8.5 Реверсування ДПС та регулювання швидкості обертання

Для **реверсування** двигуна необхідно змінити полярність напруги або на обмотці якоря, або на ОЗ (п – початок обмотки, к – кінець).



В практичних схемах використовують зміну полярності на якорі внаслідок значної тривалості перемагнічування обмотки збудження при зміні її полярності.

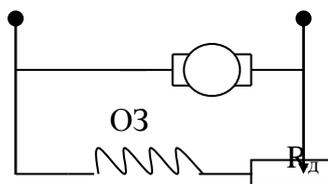
Рівняння механічної характеристики ДПС:

$$\omega = \frac{U}{k\Phi} - \frac{MR_{я}}{k^2\Phi^2}.$$

З цього рівняння видно, що регулювати частоту обертання ДПС можливо шляхом зміни однієї з трьох величин: опору в ланцюгу якоря  $R_{я}$ , потоку збудження  $\Phi$  або напруги  $U$ , яка підводиться до якоря.

1) Регулювання по першому методу (**зміна опору  $R_{я}$** ) аналогічна способу реостатного пуску ДПС і дає зміну частоти обертання тільки вниз від номінальної частоти. Діапазон регулювання при номінальному навантаженні на валу не перевищує (2,5 – 3). До недоліків методу відносяться зменшення жорсткості характеристик, значні втрати потужності при регулюванні й складність виконання безступінчастого регулювання.

2) Регулювання частоти обертання шляхом **зміни магнітного потоку  $\Phi$**  виконують додаванням у ланцюг обмотки збудження додаткового опору  $R_{д}$ .

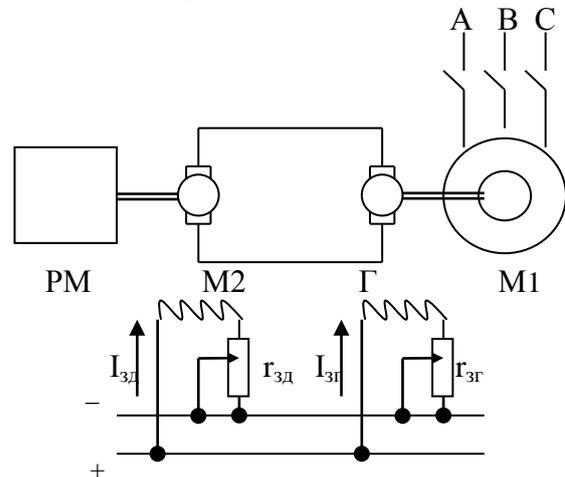


Магнітний потік зменшується і регулювання швидкості відбувається вгору від її номінального значення. Можливий діапазон регулювання (1,5 – 4), причому частота обертання обмежується механічною міцністю якоря й умовами комутації струму. При малих значеннях струму збудження, а також при випадкових обривах ланцюга швидкість обертання різко зростає і стає небезпечною для механічної частини двигуна.

3) Регулювання частоти обертання **змінною напругою** якоря передбачає живлення якоря від перетворювача, вихідна напруга якого регулюється по значенню і може змінюватися, при необхідності, за полярністю. Таким перетворювачем є керований випрямляч (КВ), який частіше за все виконується у вигляді електромашинної системи “генератор – двигун” (Г-Д) або системи “тиристорний перетворювач – двигун” (ТП-Д).

**Система „Г-Д”** складається з:

- трифазного двигуна змінного струму М1,
- двигуна постійного струму Д2,
- генератора постійного струму Г,
- робочої машини РМ.



В цій системі якор двигуна М2 безпосередньо приєднується до якоря генератора Г, який утворює разом з приводним двигуном М1 електромашинний випрямляч трифазного змінного струму в постійний. Електромашинний випрямляч обертається зі швидкістю  $\omega_r$ . Регулювання швидкості обертання двигуна М2 виконується двома шляхами:

а) змінною напругою на якорній обмотці М2. Величина напруги з генератора Г регулюється за допомогою зміни струму збудження генератора  $I_{3г}$  шляхом зміни опору  $r_{3г}$ ;

б) змінною величини магнітного потоку за рахунок зміни величини струму збудження двигуна  $I_{3д}$  шляхом зміни  $r_{3д}$ .

Основними перевагами системи Г-Д є великий діапазон і плавність регулювання швидкості двигуна, висока жорсткість і лінійність характеристик. До недоліків можна віднести високу потужність, яка споживається системою, низький ККД, інерційність процесу регулювання, шум при роботі.

**Система ТП-Д** будується на базі керованих випрямлячів, які збираються по нульовій або мостовій однофазній чи трифазній схемах.

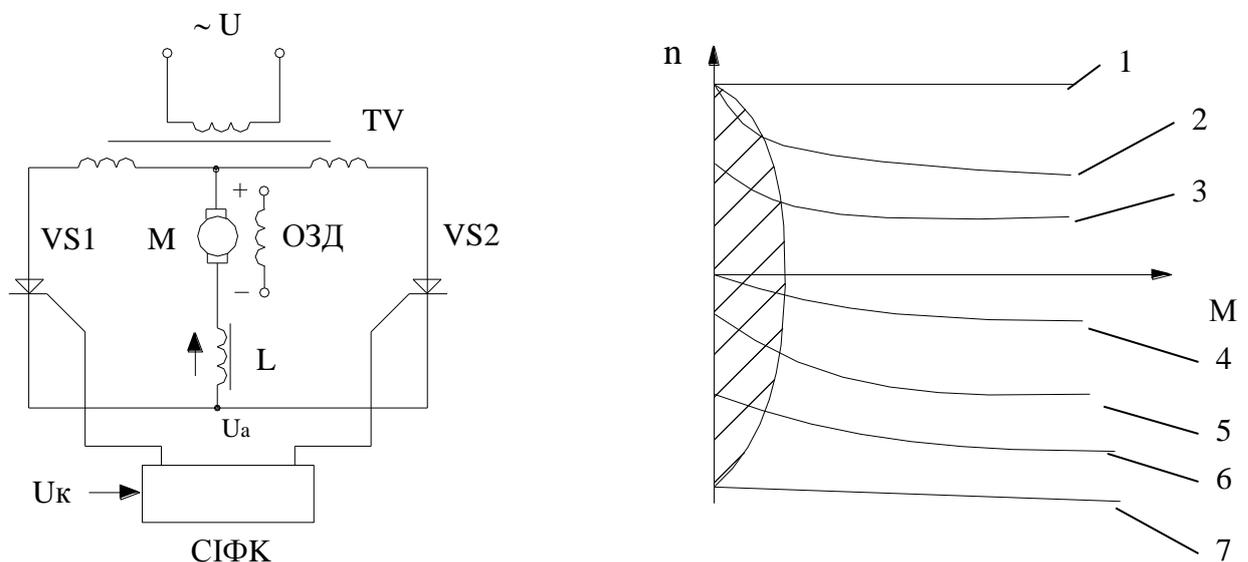
Розглянемо систему ТП-Д на прикладі схеми з однофазним двонапівперіодним нереверсивним тиристорним випрямлячем, який зібраний по нульовій схемі. Випрямляч забезпечує регулювання напруги на двигуні за рахунок зміни середнього значення своєї ЕРС. Це досягається з допомогою системи імпульсно-фазового керування (СІФК), яка по сигналу керування  $U_k$  змінює кут керування тиристорами  $\alpha$  ( кут

затримки відкриття тиристорів VS1 і VS2 відносно моменту, коли потенціал на їх анодах стає додатнім в порівнянні з потенціалом катода ). Коли цей кут  $\alpha=0$ , тобто тиристири отримують імпульси керування  $U_a$  від СІФК у вказаний момент, перетворювач виконує двонапівперіодне випрямлення і на якор двигуна подається повна напруга. Якщо за допомогою СІФК подача імпульсів на тиристири виконується зі зсувом (затримкою) на кут  $\alpha \neq 0$ , то ЕРС перетворювача знижується, з цього слідує, що зменшується середня напруга, яка підводиться до двигуна.

Залежність середнього значення ЕРС перетворювача від кута керування тиристорами  $\alpha$  має вигляд:

$$E_{сep} = E_{сep0} \cdot \cos \alpha ,$$

де  $E_{сep0}$  – ЕРС перетворювача при куті  $\alpha = 0$ .



Для зменшення шкідливого впливу пульсації струму в ланцюг якоря зазвичай включається згладжуючий реактор L.

Особливістю характеристик двигуна при його живленні від керованого випрямляча КВ є наявність ділянки з нелінійними характеристиками (заштрихована). На цій ділянці двигун працює в режимі переривчастого струму, що визначає зменшення жорсткості характеристик. Унаслідок однобічної провідності перетворювача характеристики розміщуються тільки в першому (1, 2, 3 при  $\alpha=0; 30; 60^\circ$ ) і четвертому (4, 5, 6, 7 при  $\alpha=90; 120; 150; 180^\circ$ ) квадрантах. Меншим кутам керування відповідає більша ЕРС і, відповідно, більш висока швидкість двигуна; при  $\alpha=\pi/2$  ЕРС керованого випрямляча  $E=0$  і двигун працює в режимі динамічного гальмування. Схема електропривода з трифазним мостовим неререверсивним керованим випрямлячем має аналогічні механічні характеристики. Разом з тим пульсації струму в якорі цього двигуна значно менше, ніж у однофазній схемі. В деяких випадках можна не використовувати узгоджуючий трансформатор TV.

До переваг системи ТП-Д відносяться плавність і значний діапазон регулювання швидкості (більше 10); велика жорсткість отриманих штучних характеристик; високий ККД електропривода; безшумність у роботі, простота в обслуговуванні.

Недоліки системи: перетворювач має однобічну провідність; для отримання характеристик в усіх чотирьох квадрантах необхідно використовувати реверсивний двокомплектний перетворювач; напруга і струм на якорі мають пульсуючий характер, що погіршує умови роботи двигуна; із ростом діапазону регулювання швидкості зменшується коефіцієнт потужності ЕП; ТП мають невисокий ступінь захисту від завад і малу перевантажувальну здатність по струму й напрузі.

### **8.6 Номінальні паспортні дані і ККД двигуна**

До **номінальних даних** двигуна відносяться:

$P_n$  - номінальна потужність;

$I_n$  - номінальний струм;

$U_n$  - номінальна напруга;

$\cos \varphi_n$  - номінальний коефіцієнт потужності;

$\eta_n$  - номінальний ККД;

$n_n$  - номінальна швидкість обертання.

Фактична потужність двигуна при його роботі визначається моментом опору на валу двигуна

$$P = \frac{Mn}{9550}, \quad P[\text{кВт}]; M[\text{Нм}]; n[\text{об/хв}].$$

При роботі двигуна мають місце втрати потужності, що виділяються у вигляді тепла та нагрівають окремі частини машини. Втрати в обмотці якоря  $\Delta P_{\text{я}} = I_{\text{я}}^2 \cdot r_{\text{я}}$  змінюються в залежності від навантаження і називаються змінними. Інші втрати майже не залежать від навантаження і називаються постійними:

$$\Delta P_{\text{з}} = I_{\text{з}}^2 \cdot r_{\text{з}} = U \cdot I_{\text{з}} - \text{втрати в обмотці збудження,}$$

$$\Delta P_{\text{мех}} - \text{механічні втрати,}$$

$$\Delta P_{\text{м}} - \text{магнітні втрати.}$$

Повна електрична потужність, що споживається двигуном з мережі:

$$P_e = P + \Delta P_{\text{я}} + \Delta P_{\text{з}} + \Delta P_{\text{м}} + \Delta P_{\text{мех}},$$

де  $P$  - механічна (вихідна) потужність.

Таким чином **ККД двигуна**

$$\eta = \frac{P}{P_e} \cdot 100\% = \frac{P}{P + \sum \Delta P} \cdot 100\%,$$

тут  $\sum \Delta P$  - сумарна величина втрат.

ККД двигунів постійного струму зазвичай складає 85-95 %.

## ТЕМА 9: ОСНОВИ ЕЛЕКТРОПРИВОДУ. ТИПОВІ РЕЖИМИ РОБОТИ ЕЛЕКТРОПРИВОДІВ

### 9.1 Структурна схема та класифікація електроприводу

Електроприводом (ЕП) називається електромеханічна система, що призначена для приведення в рух виконавчих органів виробничої (робочої) машини або установки і керування цим рухом.

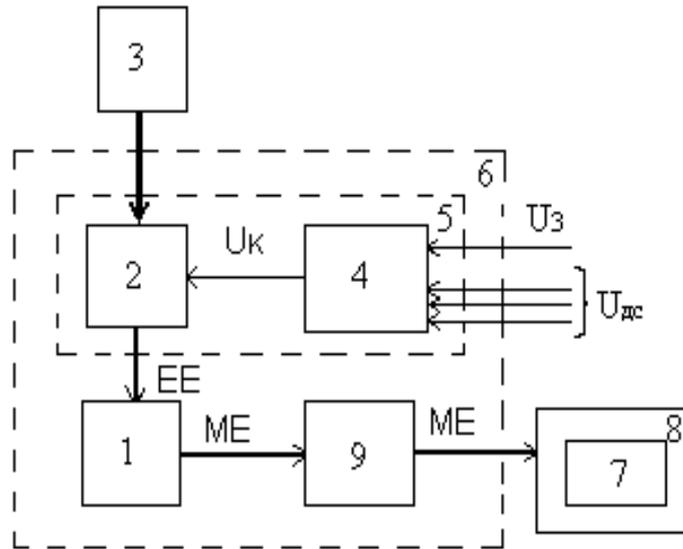


Рис. 9.1 Структурна схема електроприводу

Основним елементом будь-якого електропривода 6 служить електричний двигун 1, який виробляє механічну енергію МЕ за рахунок електричної енергії ЕЕ.

Від електродвигуна (ЕД) механічна енергія через передавальний пристрій 9 (механічний, гідравлічний, змішаний, електромагнітний) подається на виконавчий орган 7 робочої машини 8. Функція передавального пристрою полягає в узгодженні параметрів руху електродвигуна та виконавчого органа. Електрична енергія поступає в ЕП від джерела енергії 3. Для отримання енергії з потрібними для електродвигуна параметрами та керування потоком цієї енергії між двигуном та джерелом електроенергії вмикається силовий перетворювач 2. Функції керування та автоматизації в ЕП виконуються малопотужним блоком керування 4. Цей блок виробляє сигнал керування  $U_k$  за допомогою вхідного сигналу завдання  $U_z$  і декількох додаткових сигналів  $U_{дс}$ , що подають інформацію про хід технологічного процесу, характер руху виконавчого органу, роботу окремих вузлів ЕП, виникнення аварійних ситуацій. Перетворювач 2 разом з блоком керування 4 складають систему керування 5.

За характером руху розрізняють ЕП обертового та поступального руху, при цьому їх швидкість може бути регульованою і нерегульованою, а

сам рух – неперервним або дискретним, однонаправленим, двонаправленим (реверсивним), вібраційним (зворотно-поступальним).

Основними технічними показниками регульованого електроприводу являється: діапазон регулювання (відношення максимальної робочої частоти обертання до мінімальної, кількість ступенів і напрямок регулювання).

**За кількістю використаних двигунів** розрізняють групові, індивідуальні та багатодвигунні електроприводи :

– в груповому електроприводі один електродвигун приводить в рух декілька робочих машин і механізмів через спільну трансмісію – розподільчий вал з набором шківів, з яким він зв'язаний пасовою або канатною передачею ;

– при індивідуальному електроприводі кожна робоча машина має свій електродвигун із безпосереднім зв'язком. Часто в такому приводі відсутні механічні передачі , т.я. електродвигун складає єдине ціле з машиною і навіть виконує яку-небудь її функцію;

– в багатодвигунному ЕП робоча машина має не один, а декілька ЕД різної потужності, кожний з яких приводить в рух окремі виконуючі органи або вузли.

Основним напрямком в розвитку ЕП є повна його автоматизація при комплексній механізації та автоматизації всього виробництва.

## **9.2 Механічні характеристики робочих машин та електродвигунів**

Механічна характеристика робочої машини  $n = f (M_T)$  представляє собою залежність частоти обертання  $n$  від її статичного моменту опору  $M_T$ , який обумовлений силами тертя і роботою, що гальмує рух.

Механічні характеристики звичайно зображують в вигляді графіків. За видом їх можна розділити на 3 групи.

До першої групи (1) відносяться машини, статичний момент опору яких не залежить від частоти обертання ( $M_T = \text{const}$ ) До цієї групи відносяться більшість підйомних кранів, ліфти, лебідки, поршневі насоси при незмінній висоті подачі, компресори, стрічкові конвеєри (рис. 9.2) .

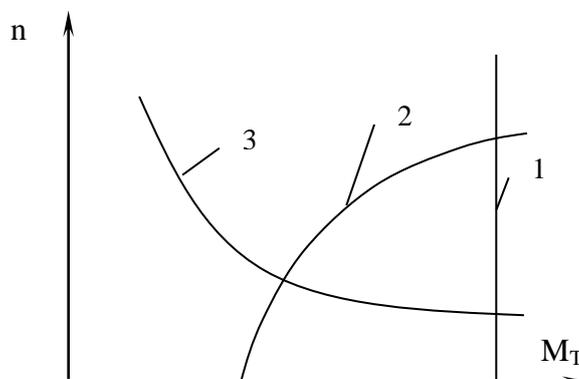


Рис. 9.2 Механічні характеристики робочих машин

До другої групи (2) відносяться машини, статичний момент опору яких пропорційний квадрату частоти обертання. Така характеристика називається параболічною або вентиляторною (вентилятори, турбокомпресори, центробіжні насоси, центрифуги і т.і.).

До третьої групи (3) відносяться машини з нелінійно-спадаючою характеристикою.

Момент опору таких машин обернено пропорційний частоті обертання і носить гіперболічний характер (різноманітні металоріжучі верстати – токарні, розточні, фрезерні та ін.)

Статичний момент опору деяких робочих машин залежить від стадії обробки виробу. В пристроях з кривошипним механізмом (поршневі насоси, компресори, верстати-качалки та ін.) момент опору залежить не тільки від частоти обертання, але і від положення виконуючих органів, яке визначається кутом повороту приводного вала.

Механічні характеристики електродвигунів всіх типів, крім синхронного, носять спадаючий характер, зі збільшенням навантаження на валу їх частота обертання знижується.

За мірою жорсткості та стійкості частоти обертання зі зміною навантаження механічні характеристики розділяються на три групи:

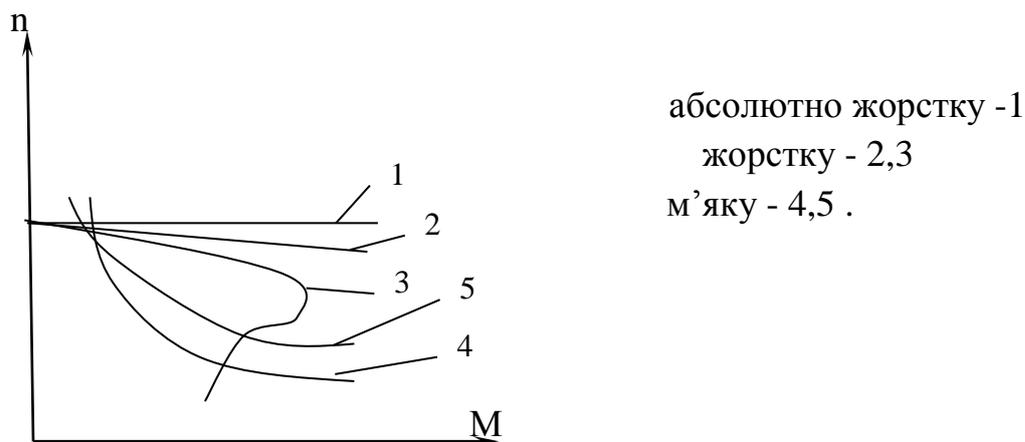


Рис. 9.3 Механічні характеристики електродвигунів

Абсолютно жорстку характеристику має синхронний двигун (1), жорстку – двигун постійного струму паралельного збудження (2) і асинхронний двигун (3). М'яку – ДПС послідовного (4) і змішаного збудження (5).

### **9.3 Стійкість роботи ЕП**

Для того, щоб ЕД міг розігнати при пуску механізм до робочої частоти обертання, його пусковий обертовий момент  $M_{\Pi}$  повинен бути більшим за момент статичного опору машини  $M_C$  ( $M_C = M_T$  при  $n=0$ ), приведенного до валу двигуна, тобто повинна бути виконана умова пуску  $M_{\Pi} > M_C$ .

В цьому випадку рівняння механічного стану:

$$M_{ED} = M_T + J \cdot \frac{d\omega}{dt},$$

де  $M_{ED}$  – момент електродвигуна;

$J$  – динамічний момент інерції;

$\omega$  – кутова частота обертання ротора.

З рівняння слідує, що при  $d\omega/dt > 0$  двигун починає розганятися.

При повільному розгоні ( $d\omega/dt$  мале) через великі пускові струми двигун може перегрітися, особливо при частих пусках. Такий “важкий” пуск є небажаним (мають АД з КЗ-ротором, жорстко з’єднані муфтою або зубчастою передачею з робочими машинами – преси, молоти, прокатні стани, поршневі насоси). Для полегшення умов пуску іноді двигун з’єднують з робочою машиною за допомогою гідروмуфти або електромагнітної муфти ковзання.

У встановленому режимі роботи ЕП обертовий момент двигуна  $M_{ED}$  долає статичний момент опору  $M_T$  робочої машини, тобто:

$$M_{ED} = M_T \text{ при } n = const.$$

Звідси слідує, що встановлена робота привода можлива за умови, якщо перетинаються механічні характеристики ЕД і робочої машини, причому цей перетин повинен відбуватися на робочій ділянці характеристики електродвигуна (поблизу точки з номінальними параметрами ЕД), наприклад, в точці А для привода турбокомпресора з АД (рис 9.4).

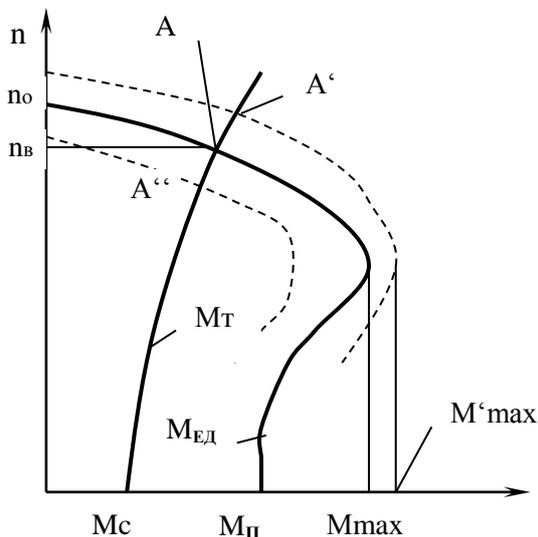


Рис.9.4 Стійкість електроприводу

Позитивною властивістю, притаманною усім ЕД, є їх саморегулювання, яке полягає в можливості розвивати двигуном обертовий момент, який дорівнює моменту навантаження на валу.

Для привода турбокомпресора пуск виконується при надлишковому моменті двигуна ( $M_{п} > M_{с}$ ). При цьому двигун і робоча машина швидко збільшують частоту обертання від нуля до встановленого значення  $n_{в} = const$  в точці перетину характеристик А, коли настає динамічна рівновага ( $M_{ед} = M_T$ ).

Рівновага може порушуватися внаслідок коливань напруги мережі  $U_M$  або зміни навантаження. Якщо напруга підвищиться, то обертовий момент двигуна збільшиться ( $M_{ED} \sim U_M^2$ ), що буде відповідати

характеристиці з більшим максимальним моментом  $M'_{\max}$ . Рівновага порушиться ( $M_{ED} > M_T$ ). Тоді електропривод отримає деяке прискорення до настання нової рівноваги моментів в т. А' при  $n'_B > n_B$ . При зменшенні напруги мережі  $U$  порушена рівновага відновиться в т. А'' при  $n''_B < n_B$ .

Стійка робота ЕП не порушиться у випадку деяких збурень моменту опору на валу двигуна за умови  $U=const$ . Наприклад, при зменшенні  $M_T$ , частота обертання двигуна збільшується до настання нової рівноваги.

Таким чином, відповідність ЕД даній робочій машині визначається не тільки наявністю точки перетину їх характеристик при якій-небудь визначеній частоті обертання, але й допустимим перепадом при можливих змінах навантаження або напруги.

#### 9.4 Рівняння руху ЕП

Для вірного вибору потужності ЕД необхідно враховувати зміну частоти обертання, обертового моменту і струму двигуна в перехідних режимах, тобто при переході від одного встановленого стану ЕП до другого.

У встановленому режимі ЕП обертовий момент двигуна  $M_{ED}$  врівноважує гальмівний статичний момент опору на валу  $M_T$ , який утворюється силами тертя і навантаженням.

У невстановленому режимі ЕП додатково виникає надлишковий, або динамічний, момент  $M_{дин} = M_{ED} - M_T$ , який долає інерцію рухомих мас:

$$M_{дин} = M_{ED} - M_T = J \frac{d\omega}{dt},$$

де  $J \frac{d\omega}{dt}$  – момент інерційного або динамічного опору системи (Н·м);

$\omega = 2\pi n/60$  – кутова швидкість вала двигуна.

Момент інерції мас всієї системи, що обертаються, можна привести до валу двигуна:

$$J = m\rho^2 = \frac{GD^2}{4g},$$

де  $m$  – маса тіла, кг

$\rho, D$  – радіус і діаметр інерції, м ;

$G$  – сила тяжіння (вага), кгс ;

$g$  - прискорення вільного падіння,  $g=9,8$  м/с<sup>2</sup> .

Виразивши  $J$  через  $GD^2$ , а кутову швидкість  $\omega$  через  $n$ , отримаємо рівняння механічного стану в формі:

$$M_{ED} - M_T = \frac{GD^2}{375} \cdot \frac{dn}{dt},$$

де  $M_{ED} - M_T = M_{дин}$ ,  $GD^2 = 4g \cdot J$ .

Величина  $GD^2$  називається маховим моментом ( якщо в каталогах маховий момент заданий в кгс·м, то його значення потрібно  $\times 9,8$  ).

При пуску двигуна  $M_{дин} > 0$ ;

у встановленому режимі  $M_{дин} = 0$ ;

при електричному гальмуванні  $M_{дин} < 0$ .

Особливим випадком є опускання вантажів, коли момент опору  $M_T$  (вірніше його складова, викликана силою тяжіння, так як момент сил тертя є завжди від'ємним ) змінює свій знак і діє в бік обертання, тобто стає додатнім.

Рівняння механічного стану дозволяє визначити час перехідного режиму (розгону або зупинки ), зміну частоти обертання в часі  $n(t)$  і енергію, збережену системою при розгоні:

$$W = \int_0^{\varphi} M_{дин} d\omega = \int_0^{\omega} J \left( \frac{d\omega}{dt} \right) \cdot \omega dt = J \frac{\omega^2}{2},$$

де  $\varphi$  - кут повороту ротора двигуна.

Рівняння руху ЕП для поступального руху має вигляд:

$$F_{дин} = F - F_T = m \frac{dv}{dt},$$

де  $F$  – сила тяги, Н;

$F_T$  – сила тертя, Н;

$F_{дин}$  – сила динамічного опору, Н;

$v$  – лінійна швидкість, м/с.

Кінетична енергія системи при розгоні:  $W = \frac{mv^2}{2}$ .

## **9.5 Рішення рівняння руху ЕП**

Час перехідного процесу ЕП визначається інтегруванням рівняння механічного стану:

$$dt = \frac{GD^2}{375} \cdot \frac{dn}{M_{ЕД} - M_T}$$

Той час, за який частота обертання зміниться від швидкості  $n_1$  до  $n_2$  :

$$t = \frac{GD^2}{375} \cdot \int_{n_1}^{n_2} \frac{dn}{M_{ЕД} - M_T}.$$

Із аналізу цього виразу слідує, що для скорочення часу перехідного режиму і економії електроенергії необхідно зменшувати маховий момент системи  $GD^2$ . Це рівняння вирішується, якщо відома залежність динамічного моменту ( $M_{дин} = M_{ЕД} - M_T$ ) від частоти обертання  $n$ . В найпростішому випадку, коли  $M_{ЕД} = \text{const}$  і  $M_T = \text{const}$ , тобто коли  $M_{дин}$  не залежить від частоти обертання:

$$t = \frac{GD^2}{375} \cdot \frac{n_2 - n_1}{M_{ED} - M_T}.$$

На основі даного рівняння легко визначаються тривалості основних перехідних режимів електропривода:

пуск двигуна ( від  $n_1 = 0$  до  $n_2 = n$  )

$$t_{II} = \frac{GD^2}{375} \cdot \frac{n}{M_{ED} - M_T};$$

зупинка при електричному гальмуванні

$$t_{Г} = \frac{GD^2}{375} \cdot \frac{0 - n}{-M_{ED} - M_T} = \frac{GD^2}{375} \cdot \frac{n}{M_{ED} + M_T};$$

природна зупинка або вільний вибіг ( $M_{ED} = 0$ )

$$t_{CT} = \frac{GD^2}{375} \cdot \frac{0 - n}{0 - M_T} = \frac{GD^2}{375} \cdot \frac{n}{M_T};$$

реверсування

$$t_{рев} = t_{II} + t_{Г}.$$

## **9.6 Типові режими роботи електроприводів**

Для врахування різноманітних умов роботи електродвигуна і вірного визначення його потужності будують навантажувальні діаграми (НД).

НД – графічна залежність моменту або потужності ЕД (іноді і струму ЕД) від часу:  $M(t)$ ;  $P(t)$ ;  $I(t)$ .

На практиці розрізняють 3 основні режими роботи електроприводу:

$S_1$  – тривалий;

$S_2$  – короткочасний;

$S_3$  – повторно-короткочасний.

Режим роботи характеризується відносною тривалістю вмикання (ТВ), котра зазвичай розраховується у відсотках:

$$ТВ\% = \frac{t_p}{t_p + t_o} 100\%,$$

де  $t_p$  – час роботи ЕД,  $t_o$  – час паузи ЕД.

Таким чином, відносна тривалість вмикання – це відношення часу роботи електропривода до часу повного циклу. Час циклу визначають як  $t_{ц} = t_p + t_o$ .

### **9.6.1 Тривалий режим роботи ( $S_1$ )**

**Тривалим** називають режим, у якому тривалість робочого часу (без зупинок) настільки велика, що двигун нагрівається до деякої встановленої незмінної температури. Розрізняють тривалий режим з постійним та змінним навантаженням.

**З постійним навантаженням** працюють вентилятори, центробіжні насоси, компресори, текстильні верстати та ін.

Навантажувальна діаграма  $P(t)$  і графік перегріву  $\tau(t)$  для такого навантаження має вид:

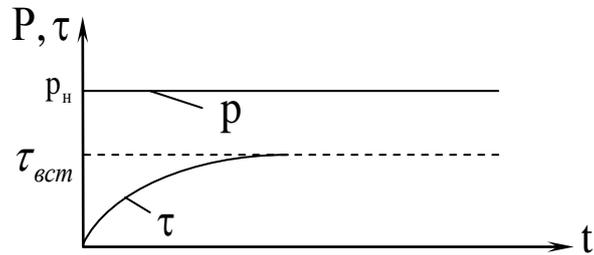


Рис. 9.5 Навантажувальна діаграма при постійному навантаженні

Для ЕП визначення номінальної потужності двигуна зводиться до розрахунку потужності  $P$  виконавчого механізму, приведеного до валу двигуна (з врахуванням ККД передач, редукторів тощо).

Для ЕД з постійним навантаженням потужність двигуна визначають по відомих формулах з врахуванням ККД передачі  $\eta_n$  за умови:  $P_{ЕД} \geq P_n$ .

Так, потужність на валу двигуна насоса визначається [кВт]:

$$P = K \frac{Q \cdot \gamma \cdot H}{1000 \cdot \eta_n \eta_n};$$

тут  $K$  – коефіцієнт запасу

	$P < 50 \text{ кВт}$	$K \approx 1,2$
(зазвичай приймають для	$P \geq 50 \text{ кВт}$	$K \approx 1,1 \div 1,15$ );

$Q$  – подача насоса,  $\text{м}^3/\text{с}$ ;

$\gamma$  – питома вага рідини,  $\text{н}/\text{м}^3$ ;

$H$  – повна висота напору,  $\text{м}$ ;

$\eta_n; \eta_n$  – ККД насосу й передачі.

Потужність на валу двигуна вентилятора [кВт] визначається його подачею  $Q$  ( $\text{м}^3/\text{с}$ ) й сумарним напором  $H$  ( $\text{н}/\text{м}^2$ ), що створює вентилятор, з врахуванням ККД вентилятора та передачі  $\eta_v; \eta_n$ :

$$P = K \frac{QH}{1000 \cdot \eta_v \eta_n}; \quad \left( \begin{array}{l} P < 1 \text{ кВт}; \quad K \approx 2 \\ P \geq 2 \text{ кВт}; \quad K = 1,5 \\ P < 5 \text{ кВт}; \quad K = 1,25 \\ P \geq 5 \text{ кВт}; \quad K = 1,2 \div 1,15 \end{array} \right)$$

По отриманій потужності  $P$  в каталогах вибирають двигун з номінальною потужністю  $P_{ном} > P$  (перед тим треба обрати рід струму, напругу, частоту обертання та конструктивне виконання двигуна). Номінальна потужність, яка вказана в каталогах, і є тією найбільшою

потужністю, на постійну роботу з котрою без перегріву розрахований даний двигун.

Так як навантаження незмінне, то спеціальну теплову перевірку не проводять, а при важких умовах пуску перевіряють, чи достатній пусковий момент може розвинути даний двигун.

Тривало **зі змінним навантаженням** працюють поршневі компресори, бурові насоси, верстати-качалки, прокатні стани, токарні та фрезерні верстати.

Навантажувальна діаграма має вид ( $\Delta P$  – потужність втрат,  $t_1 \dots t_n$  – інтервали часу):

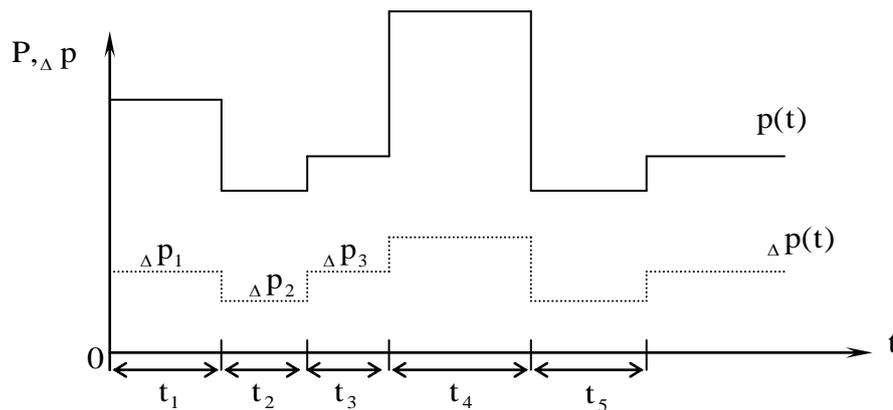


Рис. 9.6 Навантажувальна діаграма при змінному навантаженні

При змінному тривалому навантаженні використовують наближені методи вибору двигуна по його нагріву: метод середніх втрат і менш точні, але більш зручні для розрахунку методи еквівалентних величин (моменту, потужності та струму).

### Метод середніх втрат

При постійному навантаженні на валу ( $P_{ном}$ ) потужність втрат також залишається незмінною ( $\Delta P_{ном}$ ). При змінному навантаженні змінюється і потужність втрат.

Вважають, що двигун нагрівається однаково, якщо середня потужність втрат ( $\Delta P_{cp}$ ) за час циклу при змінному навантаженні рівна потужності втрат при постійному номінальному навантаженні:

$$\Delta P_{cp} = \Delta P_{ном},$$

(це справедливо, якщо тривалість циклу рівна тривалості нагрівання двигуна).

Таким чином, спочатку для попередньо обраного двигуна визначають його номінальні втрати  $\Delta P$  через коефіцієнт корисної дії  $\eta$ :

$$\eta = \frac{P}{P + \Delta P}, \quad \eta(P + \Delta P) = P, \quad \Delta P = \frac{P(1 - \eta)}{\eta},$$

звідси потужність втрат буде рівною

$$\Delta P = P \left( \frac{1}{\eta} - 1 \right).$$

Потім визначають втрати  $\Delta P_1, \Delta P_2 \dots$  на кожній ділянці графика навантаження.

Визначають середні втрати за формулою:

$$\Delta P_{cp} = \frac{\Delta P_1 t_1 + \Delta P_2 t_2 + \dots + P_n t_n}{t_1 + t_2 + \dots + t_n},$$

і перевіряють умову

$$\Delta P_{ном} > \Delta P_{cp}.$$

Якщо значення  $\Delta P_{ном}$  більш ніж на 10% перебільшує величину  $\Delta P_{cp}$ , то необхідно вибрати інший двигун (найближчої більшої потужності) й знов повторити розрахунок. Також двигун перевіряють по пусковому моменту й допустимому перевантаженню.

### Метод еквівалентних величин (струму, моменту, потужності)

Відомо, що змінні втрати у двигуні пропорційні квадрату струму навантаження. Ці змінні струми навантаження замінюють еквівалентним незмінним струмом  $I_{ек}$ , котрий виділяє в двигуні те саме тепло, що й змінні струми.

Формула еквівалентних струмів:

$$I_{ек} = \sqrt{\frac{I_1^2 t_1 + I_2^2 t_2 + \dots + I_n^2 t_n}{t_1 + t_2 + \dots + t_n}}.$$

Знайдений струм порівнюють з номінальним струмом

$$I_{ном} \geq I_{ек}.$$

Частіше мають справу з графіком моментів або потужностей. Так як момент прямо пропорційний струму в навантаженні ( $M = K \cdot I$ ), то можна отримати формулу еквівалентного моменту:

$$M_{ек} = \sqrt{\frac{M_1^2 t_1 + M_2^2 t_2 + \dots + M_n^2 t_n}{t_1 + t_2 + \dots + t_n}}.$$

Повинна виконуватися умова:  $M_{ном} \geq M_{ек}$ .

Для приводів з постійною або малозмінною частотою обертання потужність пропорційна моменту, і, відповідно, еквівалентна потужність:

$$P_{ек} = \sqrt{\frac{P_1^2 t_1 + P_2^2 t_2 + \dots + P_n^2 t_n}{t_1 + t_2 + \dots + t_n}}.$$

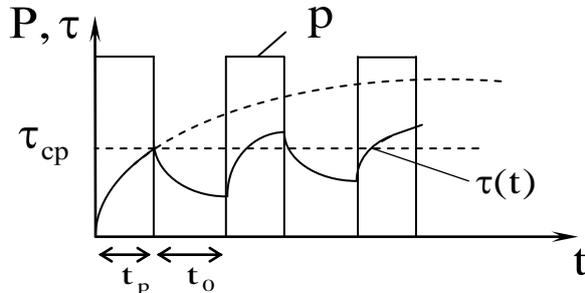
Вибраний двигун задовольняє умови нагріву, якщо

$$M_{ек} \leq M_{ном}; P_{ек} < P_{ном}.$$

Потім двигун перевіряють на умови пуску й перевантаження.

### 9.6.2 Повторно-короткочасний режим роботи (S<sub>3</sub>)

В повторно-короткочасному режимі регулярно чергуються короткочасні періоди роботи з короткочасними періодами пауз, причому в період дії навантаження температура двигуна не досягає встановленого значення, а в період паузи вона не встигає знизитися до рівня оточуючого середовища (рис. 9.6).



При багатократному повторенні циклів нагріву температура коливається навколо деякого середнього значення  $\tau_{ср}$  (ЕП кранів, металорізальних верстатів)

Рис.9.6 Навантажувальна діаграма при повторно-короткочасному режимі

Тривалість вмикання ТВ для повторно-короткочасного режиму не повинна перебільшувати 10 хвилин і 100%. Її значення стандартизовані і складають 15, 25, 40, 60%. Кожному значенню ТВ відповідає значення номінальної потужності, з якою двигун може працювати необмежено довго, не перегріваючись.

Вибір номінальної потужності двигунів здійснюють на основі навантажувальних діаграм методом еквівалентних величин. Наприклад, еквівалентна потужність  $P_{ек}$  за один цикл визначається вищеприведеною формулою, але тільки за робочий час (без врахування часу паузи двигуна  $t_o$ ). Потім визначають дійсну розрахункову ТВ<sub>д</sub>, в котрій враховується тривалість зупинки двигуна  $t_o$ . Якщо ТВ<sub>д</sub> відрізняється від найближчої стандартної ТВ<sub>ст</sub>, то необхідно провести перерахунок  $P_{ек}$ :

$$P_{ек ст} = P_{ек} \sqrt{\frac{ТВ_{д} \%}{ТВ_{ст} \%}} , \quad (\text{аналогічно для } I_{ек}, M_{ек}).$$

Потім вибраний двигун перевіряють на умови пуску й перевантаження .

### 9.6.3 Короткочасний режим роботи (S<sub>2</sub>)

В цьому режимі електродвигун працює обмежений час, протягом котрого температура не досягає встановленого значення. Паузи в роботі двигуна достатньо великі й ЕД встигає повністю охолотитися (ЕП деяких верстатів, шлюзів, розвідних мостів, засувок та ін.).

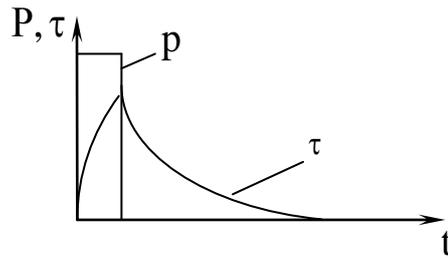


Рис.9.7 Навантажувальна діаграма при короткочасному режимі

Для короткочасного режиму роботи виконуються двигунами кранового типу з ТВ 15, 30, 60 і 90 хв. Потужність визначають за методом еквівалентних величин з наступним вибором двигуна в спеціальному каталозі.

Для режиму короткочасного навантаження можна використовувати й двигуни тривалого режиму. Їх можна короткочасно протягом обмеженого часу перевантажувати так, щоб перегрів не перебільшив допустимий.

### 9.7 Теплові режими ЕД

Перетворення енергії в ЕД супроводжується втратами:

$$\Delta P = P(1 - \eta) / \eta ,$$

де  $P$  – корисна потужність.

Втрати енергії перетворюються в теплоту. Вони нагрівають машину і часто передаються в навколишнє середовище. З часом роботи температура  $t^\circ$  досягає певного встановленого значення  $\Theta_{\text{в}}$ , яке залежить від температури навколишнього середовища  $\Theta_{\text{нав}}$  і величини навантаження.

Найбільше тривале навантаження двигуна визначається допустимою температурою нагріву, яка обмежується властивостями і класом теплостійкості матеріалів. В двигунах використовують ізоляційні матеріали класів А, Е, В, F і Н з допустимою температурою перегріву  $\Theta_{\text{доп}}$  відповідно: 105, 120, 130, 155, 180° С (вважається  $\Theta_{\text{нав}}$  до 40° С).

При підвищенні  $\Theta_{\text{нав}}$  до 50° С потужність двигуна зменшується на 10-15%, а при падінні до 30° С – потужність підвищується на 8,5%.

Закон зміни температури двигуна в часі має вид:

$$\tau = \tau_{\text{вст}} \left(1 - e^{-\frac{t}{T_H}}\right) + \tau_{\text{поч}} e^{-\frac{t}{T_H}} , \quad (*)$$

де  $\tau_{\text{вст}}$  – встановлена температура двигуна;

$t$  – час;

$\tau_{\text{поч}}$  – перевищення температури двигуна над температурою навколишнього середовища в момент, коли двигун починає працювати;

$T_H$  – стала часу нагріву, характеризує швидкість нагрівання двигуна.

Якщо двигун починає роботу в “холодному” стані, то  $\tau_{поч} = 0$  і

$$\tau = \tau_{вст} \left(1 - e^{-\frac{t}{T_H}}\right);$$

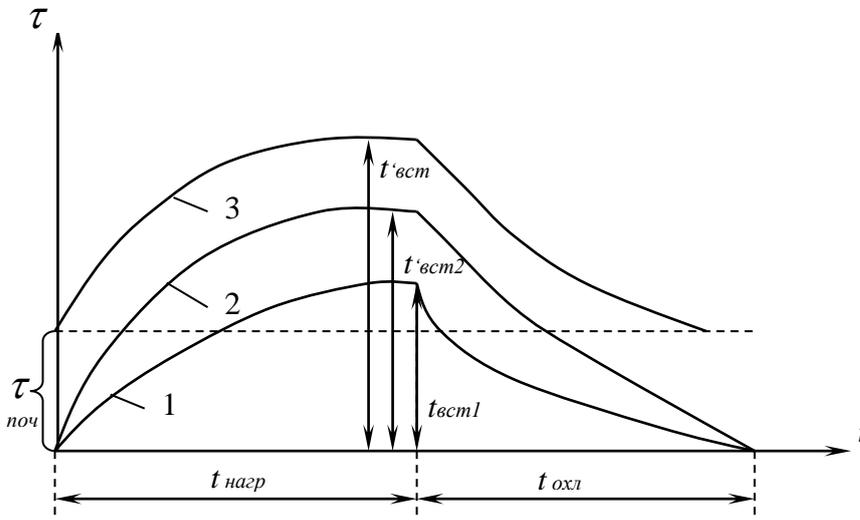


Рис. 9.8 Теплові режими роботи електродвигуна

Криві 1 та 2 відповідають роботі двигуна з “холодного” стану при малому (1) і великому (2) навантаженні, крива 3 – робота двигуна з температури  $\tau_{поч}$ . Криві нагрівання і охолодження являються експонентами. Встановлена температура досягається за час  $(3 \div 5) T_H$ .

Після відключення двигуна від живлення виділення тепла в ньому припиняється:  $\Delta P = 0$ ;  $\tau_{вст} = 0$  і вираз (\*) приймає вигляд:

$$\tau = \tau_{поч} \cdot e^{-\frac{t}{T_{охл}}}.$$

Час охолодження двигуна до встановленої температури або температури навколишнього середовища дорівнює:  $t_{охл} = (3 \div 5) T_{охл}$ . Інтенсивність охолодження двигуна залежить від способу вентиляції і його швидкості. При незалежній (зовнішній) вентиляції умови вентиляції працюючого і зупиненого двигуна однакові.

Для двигуна із самовентиляцією після зупинки вентилятор не працює, умови тепловіддачі погіршуються і стала охолодження збільшується, крива охолодження буде більш пологою.

## **ТЕМА 10: СИСТЕМИ ЕЛЕКТРОПРИВОДІВ ОБ'ЄКТІВ НГП**

### **10.1 Електропривод бурових установок**

Процес спорудження свердловин складається з наступних операцій:

- спуску бурильних труб з долотом в свердловину;
- руйнування породи у вибої – процес буріння;
- нарощування колони труб по мірі заглиблення свердловини;
- підйому труб для заміни зношеного долота.

В склад комплексу виробничих механізмів бурової установки входять бурова лебідка з приводами для підйому, спуску і подачі інструменту, бурові насоси, ротор, механізми для приготування і очищення бурового розчину, забезпечення установки стисненим повітрям та ін.

Привод механізмів може бути автономним (дизельним, дизель-електричним і газотурбоелектричним) і неавтономним (електричним на змінному або постійному струмі).

#### **10.1.1 Електропривод бурових насосів**

Буровий насос призначений для нагнітання бурового розчину в бурильну колону і створення циркуляції бурового розчину в свердловині у процесі буріння. Бурові насоси – основні споживачі електроенергії (споживають 70-80% установленної потужності двигунів бурової установки). Потужність сучасних бурових насосів коливається від 300 до 3000 кВт. Для кожного класу бурової установки насос повинен мати визначену потужність, подачу й тиск.

Насоси можуть працювати при температурі навколишнього середовища  $\pm 50^{\circ}\text{C}$ . При цьому температура бурового розчину коливається від  $-1$  до  $80^{\circ}\text{C}$ . Буровий насос має бути пристосований до ступінчастої зміни подачі в процесі буріння в 2–3 рази. До того ж він повинен мати здатність короткочасно розвивати необхідний тиск для продавлення частинок вибуреної породи, які осіли в затрубному просторі.

Час роботи насоса – від 30 хвилин до 200 годин і більше залежно від тривалості роботи долота. Час періодичних технологічних зупинок може складати 3–15 хвилин для нарощування бурильної колони й близько 10 годин при спуску й підйомі долота з великої глибини.

Аналіз конструктивних особливостей різних типів насосів показує, що вимоги технології продавлення найбільше задовольняють поршневі горизонтальні насоси. Поршневі насоси мають потужність 32, 50, 80, 125, 190, 235, 300, 345, 475, 600, 750, 950, 1180, 1840 кВт при максимальній подачі 40–50 л/с бурового розчину й розвивають максимальний тиск 90–105 МПа при мінімальних подачах.

На початку буріння свердловини тиск, що створюється насосом, невеликий. По мірі заглиблення свердловини, внаслідок збільшення гідравлічного опору труб збільшується і тиск на виході насоса. Тому,

починаючи з певної глибини, подачу насоса необхідно обмежувати. Регулювання подачі насоса від 5–20 л/с до максимальної здійснюється ступінчасто заміною поршнів і втулок різних діаметрів. Найкраще ж використання потужності можливе тільки при плавному регулюванні частоти обертання привода. В сучасних схемах регулювання подачі здійснюють регулюванням швидкості обертання двигунів за допомогою потужних частотних перетворювачів. У якості привідних двигунів використовуються потужні синхронні та асинхронні двигуни з короткозамкненим та фазним ротором.

В бурових установках глибокого буріння регулювання подачі насоса в широких межах здійснюється за допомогою привода постійного струму по системах „генератор-двигун” та „тиристорний перетворювач-двигун”. Потужність приводного двигуна насоса визначається по формулі:

$$P = K \frac{Q \cdot H \cdot \gamma}{\eta_H \cdot \eta_{II}} \cdot 10^{-3} \text{ кВт},$$

де К – коефіцієнт, який враховує можливість довготривалого перевантаження насоса, зазвичай приймають  $K = 1,05 \div 1,1$ ;

Q – продуктивність насоса;  $\text{м}^3/\text{с}$ ;

H – напір, м;

$\gamma$  – питома вага бурового розчину,  $\text{Н}/\text{м}^3$ ;

$\eta_H$  - ККД насоса;

$\eta_{II}$  - ККД передачі між двигуном і насосом.

Номінальна частота обертання двигуна визначається кінематикою насоса і видом передачі; для існуючих поршневих насосів вона складає 1000 і 750 об/хв. Номінальна напруга живлення двигунів 6000 В. Режим роботи привода – тривалий.

### **Схема керування асинхронним двигуном з короткозамкненим ротором для приводу бурового насоса**

Схема складається зі схеми силової частини та схеми керування (рис. 10.1, 10.2).

Силова схема живиться напругою 6000В. Живлення здійснюється через автоматичний вимикач високої напруги QF1 та кварцові запобіжники FU1-FU3. Схема керування живиться напругою 220В через трансформатор TV1 та запобіжники FU4-FU5. Напруга живлення подається двоколовою кнопкою SA1.

Керування пуском та зупинкою двигуна - дистанційне, здійснюється універсальним перемикачем SM1, який встановлений безпосередньо в насосному блоці, відключення можливе як перемикачем SM1, так і перемикачем SM2, що встановлений на пульті бурильника.

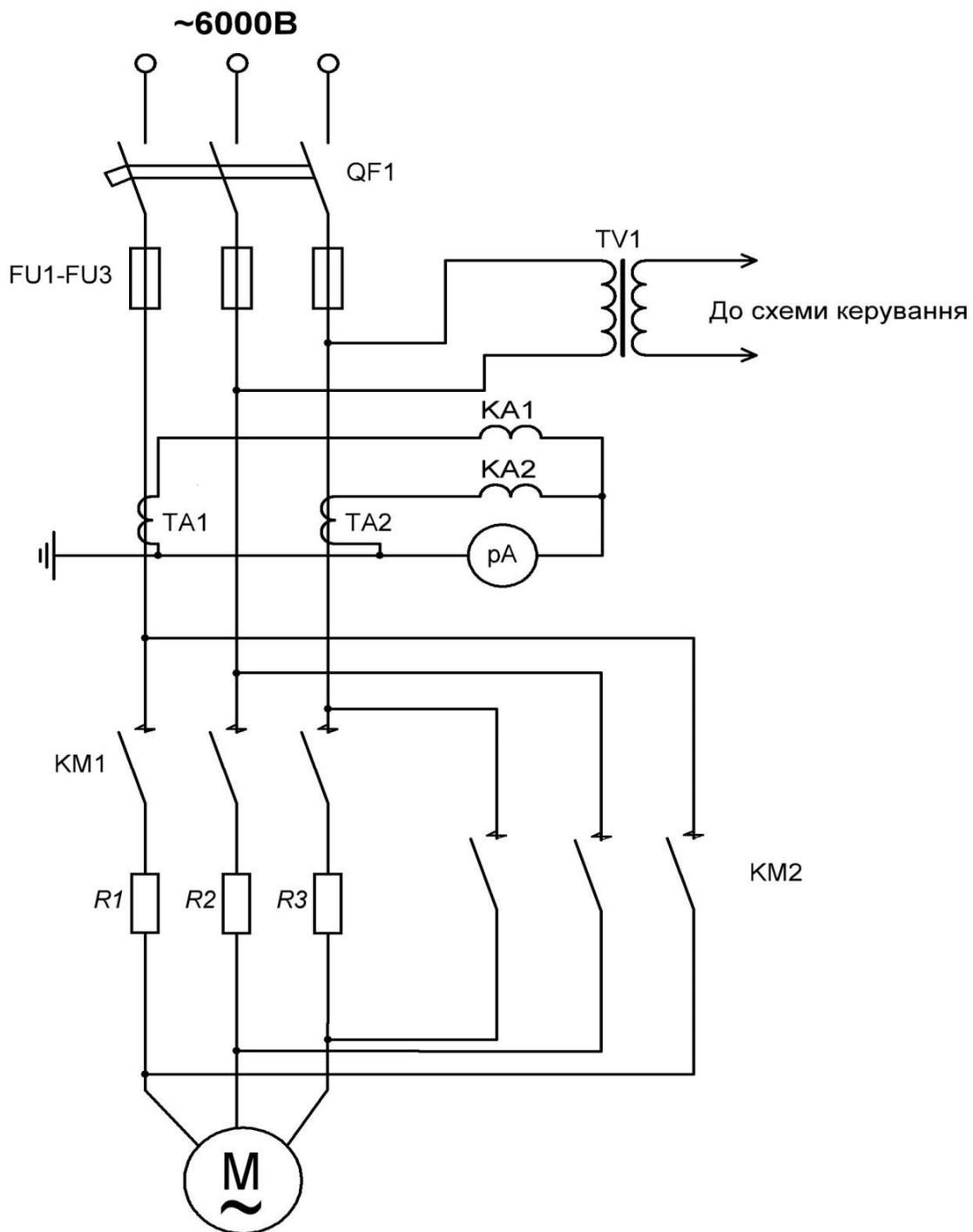


Рис. 10.1 Схема електрична силової частини електропривода бурового насоса

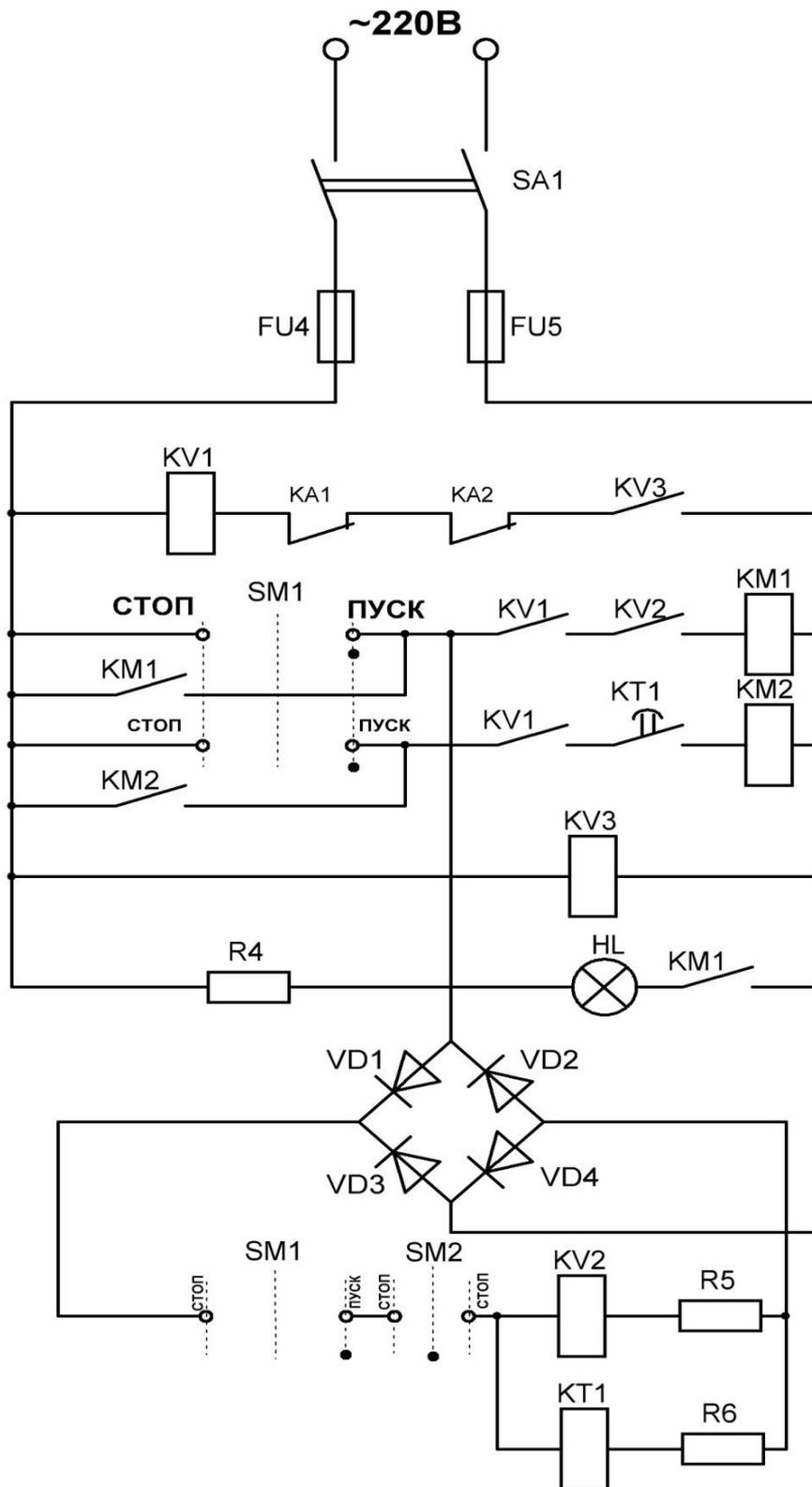


Рис. 10.2 Схема керування електроприводом бурового насоса

Після подачі живлення на силову схему вимикачем QF1 та кнопкою SA1 на схему керування намагнічується котушка захисного реле KV3 (якщо рівень напруги відповідає нормі), замикається контакт KV3, подаючи живлення на котушку реле KV1, контакти KV1 замикаються.

Переведення ручки SM1 у праве положення (при SM2 в центральному положенні) викликає спрацьовування реле напруги KV2 і реле часу KT1. Реле KV2 замикає коло живлення контактора високої напруги KM1 (якщо контакт реле захисту KV1 замкнений). Цей контактор головними контактами подає живлення на двигун, а допоміжними – здійснює самоблокування. Для зниження пускового струму напруга на двигун подається через резистори R1-R3. Одночасно контактом KM1 подається живлення на сигнальну лампу HL.

Через час, необхідний для розгону електродвигуна до деякої проміжної швидкості, замикаються контакти реле часу KT1 (якщо контакт KV1 замкнений) і подається живлення на контактор високої напруги KM2. Контактор замикає силові контакти KM2 і здійснює самоблокування допоміжними контактами KM2. Двигун працює в номінальному режимі з номінальною швидкістю обертання.

При встановленні перемикача SM1 у ліве положення (стоп) або перемикача SM2 у ліве чи праве положення, реле KV2 та KT1 вимикаються, їх контакти розмикаються, контактори KM1 та KM2 розмагнічуються й відключають двигун від джерела живлення.

Реле KV2 та KT1 живляться постійним струмом, тому в схемі передбачений випрямляч з діодів VD1-VD4. Резистори R4, R5, R6 встановлені для узгодження за напругою параметрів реле KV2, KT1 та сигнальної лампи HL.

Захист двигуна від перевантажень здійснюється за допомогою ввімкнених через понижувальні трансформатори струму ТА1 і ТА2 котушок струмових реле КА1 і КА2, які при перевантаженнях розмикають власні контакти КА1 і КА2 у колі живлення котушки KV1, що своїми контактами відключає контактори KM1 та KM2.

Для захисту схеми від короткого замикання передбачені запобіжники FU1-FU5, для захисту від зниження напруги – реле KV3. При значному зниженні напруги котушка реле KV3 розмагнічується, її контакт KV3 розмикається, знеструмлюючи котушку реле KV1, це реле власними контактами знімає живлення з контакторів KM1 та KM2, таким чином вимикаючи двигун до відновлення необхідної величини напруги мережі.

### **10.1.2 Електропривод бурової лебідки**

Крім головних операцій – безпосередньо підйому або опускання бурильних труб – за допомогою лебідки здійснюють згвинчування і розгвинчування труб, їх перенесення й встановлення, підйом і опускання ненавантаженого елеватора, подача долота на забій та інше. Ці операції

потребують різної потужності і характеристик електропривода, тому в сучасних бурових установках для допоміжних операцій часто застосовують окремі механізми з індивідуальним електроприводом. Лебідка використовується тільки для підйому і опускання бурильних труб, причому для підйому труб служать приводні двигуни, а для гальмування при опусканні – допоміжні гальма або приводні двигуни.

Підйом бурильних труб складається з окремих циклів, число яких дорівнює числу свічок: за час одного циклу виконується підйом на висоту однієї свічки (18-36 м), потім її відгвинчують, переносять і встановлюють, після чого цикл повторюється. Таким чином, по мірі підйому вага колони бурильних труб зменшується, і, відповідно, зменшується момент статичного опору на валу двигуна. Діапазон зміни моменту може складати 20:1.

Режим роботи привода лебідки – повторно - короткочасний, з тривалістю вмикання 25- 40 %. Застосовують асинхронні двигуни з фазним ротором, синхронні двигуни в сполученні з електромагнітними муфтами і безредукторні приводи постійного струму. Зв'язок приводного двигуна безпосередньо (без редуктора) з барабаном лебідки дозволяє використовувати двигун і в якості електрогальма.

Двигуни лебідки потужністю до 200-250 кВт доцільно вибрати на напруги 380, 500 або 600 В, так як для керування ланцюгами статора цих двигунів можна застосувати контакторну апаратуру низької напруги. При потужності двигунів більше 250 кВт доцільно їх вибрати на напругу 6000 В, що дозволяє ліквідувати проміжну трансформацію напруги.

Найбільш простою для попереднього визначення потужності двигуна, що споживається, являється формула:

$$P_{ДП} = \lambda \frac{Q_H \cdot v_{Г}}{\eta_{ПВ}}, \text{ кВт},$$

де  $Q_H$  – номінальна вантажопідйомність на гаку, кН;

$v_{Г} = 0,4 - 0,5$  м/сек – швидкість підйому гака з номінальним навантаженням;

$\eta_{ПВ} = 0,7 - 0,8$  – ККД підйомної установки від вала двигуна до гака при номінальній вантажопідйомності;

$\lambda = 1,3 - 1,45$  – коефіцієнт можливого перевантаження двигунів.

Вибравши попередньо двигун по відомій потужності  $P_{ДП}$ , можна побудувати дійсну навантажувальну діаграму двигуна і вирахувати його еквівалентний момент при роботі на всіх передачах лебідки по формулі:

$$M_{екв} = K \cdot \sqrt{\frac{(M_1 \cdot M_2 + M_3^2 \cdot \frac{2n^2 - 3n + 1}{6}) \cdot t_i + \sum M_{дон.м}^2 \cdot t_{дон.м}}{t_i + t_{дон.м} + \alpha \cdot t_{дон.р}}},$$

де  $K = 1,12$  – коефіцієнт, який враховує зміну швидкості підйому внаслідок зміни діаметру навивки каната на барабан лебідки;

$M_1$  і  $M_2$  – момент на валу двигуна при найбільшому і найменшому навантаженнях на гаку під час підйому;

$M_3$  – момент на валу двигуна, який створюється вагою однієї свічки;

$n$  – число свічок, які піднімаються лебідкою;

$M_{\text{доп.м.}}$  – момент під час допоміжних машинних операцій;

$t_{\text{доп.м.}}$  – час допоміжних машинних операцій;

$t_{\text{доп.р.}}$  – час допоміжних ручних операцій;

$t_i$  – час робочого періоду за цикл підйому однієї свічки;

$\alpha = 0,5$  – коефіцієнт, який враховує погіршення умов охолодження двигуна при його нерухомому стані.

Якщо бурова установка обладнана механізмами для виконання допоміжних операцій, то попередня формула спрощується:

$$M_{\text{екв}} = K \cdot \sqrt{\frac{(M_1 \cdot M_2 + M_3^2 \cdot \frac{2n^2 - 3n + 1}{6}) \cdot t_i}{t_i + 0,5 \cdot t_{\text{доп}}}},$$

де  $t_{\text{доп}}$  – час допоміжних операцій за цикл підйому однієї свічки.

### 10.1.3 Електропривод ротора

В залежності від способу обертального буріння змінюються вимоги, які висуваються до електропривода ротора. Якщо при бурінні заглибними двигунами ротор використовується в основному для виконання допоміжних операцій, то при роторному бурінні через ротор передається основна операція – обертання долота.

Режим роботи двигуна ротора – тривалий, а потужність  $P_p$ , яку він повинен розвивати в процесі буріння, можна виразити формулою:

$$P_p = P_{\text{б}} + P_n,$$

де  $P_{\text{б}}$  – потужність, яка затрачується безпосередньо на буріння (включаючи втрати тертя долота);

$P_n$  – потужність, яка необхідна для покриття втрат в буровій установці (сума втрат в поверхневому обладнанні і на тертя колони бурових труб об стінки свердловини й рідину, а також втрати на вібрацію колони).

Значення потужності  $P_{\text{б}}$  може бути орієнтовно визначено по питомій витраті потужності на  $1 \text{ см}^2$  площі вибою, яку можна прийняти в залежності від ґрунту  $35 \div 150 \text{ Вт/см}^2$ . Для практичних розрахунків часто приймають  $P_{\text{б}} = 100 \text{ кВт}$ .

Потужність  $P_n$  при роторному бурінні складає до 80 % потужності, яка споживається приводним двигуном. Для її розрахунку користуються формулами Плюща і Федорова, які були отримані в результаті обробки експериментальних даних:

$$P_n = K_1 \cdot \omega^{1.5} - \text{формула Плюща};$$

$$P_n = a_1 \cdot \omega + a_2 \cdot \omega^2 - \text{формула Федорова},$$

де  $K_1$ ,  $a_1$ ,  $a_2$  - коефіцієнти, які характеризують тип наземного обладнання (приводяться в довідникових даних на обладнання);

$\omega$  - кутова швидкість обертання.

При роторному бурінні привод ротора повинен мати м'яку механічну характеристику, по можливості мінімальний момент інерції і обмежений максимальний момент. При заклинюванні долота, коли низ колони бурових труб стає нерухомим, а ротор продовжує обертання, закручуючи труби, момент двигуна може досягти максимальної величини. Для обмеження механічних напруг в трубах й захисту їх від поломок необхідно обмежувати момент, що передається від двигуна до ротора. Це досягається застосуванням двигунів з невеликою перевантажувальною здатністю  $\lambda$  або використанням в приводі ротора датчиків обмеження моменту.

Збільшення частоти обертання ротора, тобто долота, тягне за собою й збільшення механічної швидкості буріння. Для основного типу доліт, які застосовуються в бурінні, внаслідок збільшення зносу долота при високих частотах обертання час роботи долота на вибої і проходка на долото тим більше, чим менше частота обертання ротора. Поряд зі скороченням терміну служби долота, при великих частотах обертання ротора підвищується знос бурового обладнання з-за збільшення вібрації. Тому оптимальні значення частоти обертання ротора доцільно визначати економічним розрахунком, виходячи з мінімальної вартості 1м проходки.

Безступінчасте регулювання частоти обертання ротора при бурінні глибоких свердловин може забезпечити збільшення механічної швидкості буріння до 30%. Діапазон регулювання частоти обертання, визначений техніко-економічним розрахунком, складає 5:1 – 7:1. Регулювання частоти обертання доцільно виконувати при постійному моменті.

В більшості бурових установок застосовується груповий привод лебідки і ротора. Приводна потужність лебідки значно більше приводної потужності ротора, тому при роторному бурінні приводні двигуни виявляються недовантаженими. В деяких приводних установках передбачений індивідуальний привод ротора.

Оскільки за допомогою ротора виконуються аварійні і деякі допоміжні роботи, привод ротора повинен мати оперативний реверс.

Розглянемо роботу схеми керування асинхронним двигуном з фазним ротором для приводу лебідки і ротора (рис. 10.3)

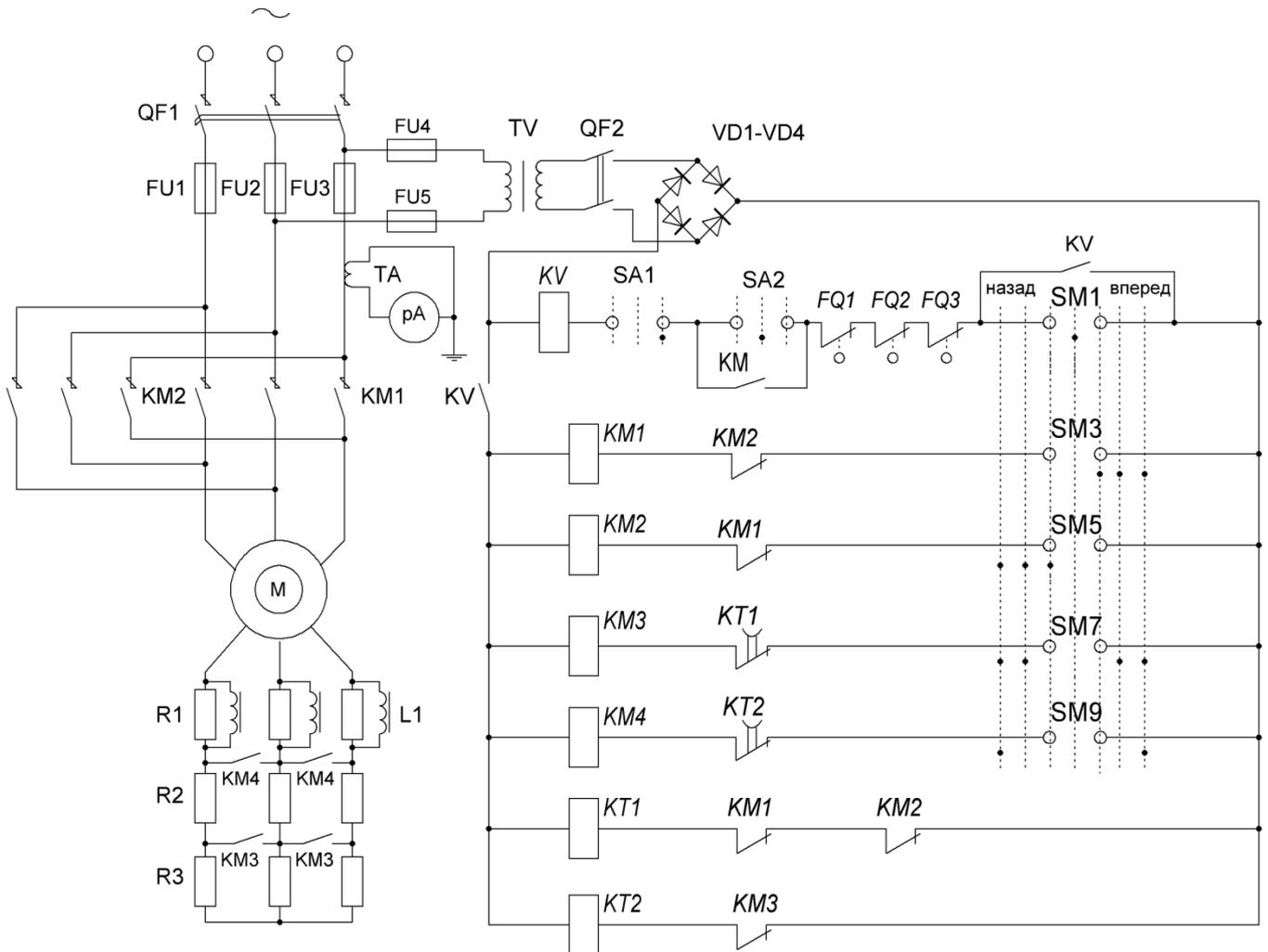


Рис. 10.3 Схема керування асинхронним двигуном з фазним ротором для приводу лебідки і ротора

Тут TV – понижувальний трансформатор напруги;

QF1 і QF2 – автоматичні вимикачі;

KV – проміжне реле напруги;

SA1 – універсальний перемикач, за допомогою якого можна ввімкнути один або два приводні двигуни;

SA2 – універсальний перемикач, який дозволяє підняти колону бурильних труб, коли масляний насос не працює (аварійний режим);

FQ1 – кінцевий вимикач, який застерігає ввімкнення лебідки у випадку вимкнення шинно-пневматичної муфти;

FQ2 – кінцевий вимикач, який застерігає надмірне піднімання гака;

FQ3 – кінцевий вимикач, який застерігає включення приводу лебідки у випадку включення допоміжного приводу;

SM – контакти командоконтролера;

КМ1, КМ2 – контактори “Вперед” та “Назад”;  
КМ3, КМ4 – контактори прискорення;  
КТ1, КТ2 – реле часу;  
R1, R2, R3 – ступені пускового реостату у роторному ланцюзі двигуна;  
L1 – дроселі (індуктивності) – для зменшення числа ступенів в роторі асинхронного двигуна;  
VD1-VD4 – випрямляч струму;  
КМ – контакти магнітного пускача двигуна масляного насоса.

При ввімкненні автоматичних вимикачів QF1 і QF2 і встановленні командоконтролера SM в нульове положення замикається ділянка SM1, одержує живлення котушка реле напруги KV (контакт КМ замкнений), яка замикає свої контакти, що готують схему до роботи. При цьому спрацьовують реле часу КТ1 і КТ2, які миттєво розмикають свої контакти в колі живлення котушок контакторів КМ3 і КМ4.

Залежно від того, що необхідно робити з колоною бурових труб – піднімати чи опускати її – рукоятку командоконтролера SM переводять в положення “Вперед” або “Назад”.

При переводі “Вперед” необхідно поставити рукоятку в перше праве положення (замкнена ділянка SM3). При цьому отримує живлення котушка контактору КМ1, внаслідок чого статор асинхронного двигуна підключається до мережі. Контактори КМ3 та КМ4 знеструмлені, їх контакти розімкнені, тому до ротора підключені додаткові опори R1 – R3. За рахунок великої частоти струму в колі ротора електричний струм іде через резистори R1, а не дроселі L1 (їх індуктивний опір значно більше активного). Контакт КМ1 розмикає свої контакти в колі контактора КМ2, а також в колі реле часу КТ1. Реле КТ1 знеструмлюється і з витримкою часу замикає контакти в колі котушки КМ3.

Якщо встановити командоконтролер SM в друге праве положення (замкнена ділянка SM3 та SM7), одержує живлення котушка контактору КМ3, яка виводить частину пускового реостату з роторного кола, двигун збільшує частоту обертання. Також КМ3 розмикає контакти в колі реле часу КТ2. Реле КТ2 знеструмлюється і з витримкою часу замикає контакти в колі КМ4. При переміщенні рукоятки командоконтролера в крайнє праве положення отримує живлення котушка контактору КМ4, яка виводить другу частину реостата з роторного кола двигуна, двигун отримує прискорення.

По мірі розгону двигуна частота струму в колі ротора зменшується, опір дроселів стає дуже малим, електричний струм іде через дроселі L1 в обхід резисторів R1. Двигун виходить на природну характеристику.

Захист схеми здійснюється за допомогою запобіжників FU1 – FU5, автоматичних вимикачів QF1 і QF2, кінцевих вимикачів FQ1- FQ3 і контактів SM1 (нульовий захист).

Після тимчасового зникнення та відновлення напруги пуск двигуна можливий тільки через нульове положення рукоятки командоконтролера.

При зупинці масляного насоса контакт КМ розмикається (котушка в схемі не показана), оперативні роботи можна виконувати в аварійному режимі перемиканням SA2 в замкнене положення (у звичайному режимі контакт SA2 знаходиться в розімкненому положенні).

#### **10.1.4 Дизель-електричний привод бурових установок**

В останні роки існує тенденція розширення номенклатури і обсягів виробництва бурових установок з дизель-електричним приводом. Перехід до автономного енергопостачання дозволяє вирішити проблему енергопостачання віддалених від бази бурових установок (проблему «слабких мереж»), вирішити проблему підвищення встановленої потужності головних і допоміжних приводів на бурових установках і інші питання.

Автономним називається електропривод, що живиться від власних електричних генераторів, встановлених безпосередньо на буровій установці. У дизель-електричного приводу в якості первинних двигунів для обертання генераторів використовуються дизелі, він оснащений двигуном постійного струму. Перші промислові дизель-електричні установки були побудовані в 1960-1963 р.р. Електропривод головних механізмів був виконаний за системою генератор-двигун (Г-Д).

Чисто дизельний привід головних механізмів бурових установок має низку істотних недоліків. Прагнення поліпшити характеристики дизельного приводу, спростити кінематику і підвищити продуктивність бурових установок, збільшити термін служби дизеля і поліпшити умови праці бурових бригад призвело до створення гідравлічних і електромашинних передач від дизеля до виконавчих механізмів. Введення таких передач збільшує переважувальну здатність приводу по моменту, виключає ряд небажаних явищ при спільній роботі дизелів на загальну трансмісію, покращує умови роботи дизелів, в ряді випадків збільшує швидкості підйому інструменту, крім того, дозволяють спростити кінематичну схему установки і поліпшити умови праці бурової бригади.

Однак у всіх випадках застосування електромашинних і гідравлічних передач пов'язано з втратами потужності, ускладненням обслуговування привода та зниження надійності. Застосування дизель-електричного або дизель-гідравлічного приводу замість чисто дизельного не завжди доцільно, тому в кожному окремому випадку потрібно зробити відповідний техніко-економічний порівняльний аналіз з урахуванням конкретних умов роботи установки: способу і часу проходки свердловин; відстані, на яке потрібно перевозити установку; геологічних умов проходки свердловин; кваліфікації обслуговуючого персоналу; наявності в електроремонтної бази тощо.

В наш час визначилися наступні області ефективного застосування бурових установок з дизель-електричним приводом:

- для розвідувального буріння глибоких і надглибоких нафтових і газових свердловин;
- для пересувних і напівпересувних наземних установок (глибина буріння 2000–3500 м);
- для всіх видів буріння в зовнішніх і внутрішніх водоймах (морські і озерні баржі, плавучі основи, платформи та ін.);
- для буріння на пересіченій місцевості і в густонаселених районах.

Свердловини на море бурять з морських естакад, з напівзаглибних платформ, а також з бурових суден на плаву. При бурінні з естакад застосовують серійні бурові установки, електропостачання яких здійснюється кабельними лініями 6 і 35 кВ, прокладеними по естакадах.

Плавучі і напівзаглибні бурові установки забезпечуються автономним дизель-електричним приводом змінно-постійного струму, коли кілька дизелів обертають синхронні генератори. Енергія генераторів змінного струму 6 кВ подається на двигуни приводу гвинтів і урівноваження платформи, а також двигуни допоміжних механізмів бурової установки. Приводи постійного струму основних механізмів бурові установки отримують живлення від генераторів через знижувальні трансформатори і керовані випрямлячі.

### **10.1.5 Буріння свердловин електробурами**

При бурінні електробуром долото обертається за допомогою маслонаповненого забійного електродвигуна змінного струму, який має малий діаметр і значну довжину. Сам електробур опускається в свердловину на бурильних трубах. Зараз електробуром буриться близько 3% від загального об'єму буріння в Україні, але воно вважається одним з найперспективніших видів буріння в майбутньому завдяки можливості широкої автоматизації процесу.

Двигун електробура отримує живлення від бурового трансформатора по кабелю, який знаходиться всередині бурильної колони. Електроенергія подається з мінімальними втратами внаслідок використання високої напруги. На потужність електробура майже не впливають кількість і властивості бурового розчину через конструктивне виконання електробура. Також завдяки цьому характеристики електробура майже незмінні під час всього часу його роботи.

Кількість прокачаного бурового розчину при електробурінні визначається умовами нормального очищення вибою незалежно від потужності, що розвивається електробуром. Зміна моменту опору на долоті миттєво відбивається на зміні величини струму і потужності. Це дає можливість спостерігати за навантаженням на долото, визначити характер його роботи, ступінь зношування і попереджати аварії з долотом. Зміна

струму і потужності, що відображають навантаження на долоті дають можливість автоматизувати процес буріння при максимальному використанні потужності, що розвивається електробуром. Значною перевагою конструкції електробура і відсутності обертання бурильної колони в процесі буріння похилих свердловин є можливість здійснювати контроль за кутом нахилу і азимутом, а також встановлювати механізм повороту в потрібному напрямку і коригувати його положення в процесі буріння.

## **10.2 Електропривод компресорів та верстатів–качалок**

### **10.2.1 Електропривод компресорів**

Для приводів компресорів використовуються як асинхронні короткозамкнені, так і синхронні двигуни. Синхронні двигуни мають відомі переваги у відношенні ККД, коефіцієнта потужності та великої стабільності обертового моменту при зниженні напруги, тому при значних потужностях, що споживаються, їм віддають перевагу.

При нормальному пуску компресора в хід його клапани відкриті, тому привідний електродвигун може успішно зробити пуск при моменті на його валу, що не перевищує (0,4 - 0,5) від номінального. При визначенні необхідного пускового моменту двигуна вважають, що цей момент не повинен бути меншим за номінальний. Це впливає з того, що у випадку короткочасного зникнення або різкого зниження напруги в мережі з наступним відновленням нормального живлення двигун буде розганятися при навантаженому компресорі.

Номінальна потужність електродвигуна для привода компресора звичайно задається заводом-виготовлювачем. У тих випадках, коли такі данні відсутні або їх необхідно визначити по іншим причинам, потужність двигуна може бути знайдена по формулі:

$$P_H = \frac{K_3 \cdot 10^{-3}}{\eta_{ИД} \cdot \eta_{МЕХ} \cdot \eta_{ПЕР}} \cdot \frac{Z \cdot m}{m-1} \cdot p_1 \cdot \nu_0 \left[ \left( \frac{p_2}{p_1} \right)^{\frac{m-1}{z \cdot m}} - 1 \right], \quad (\text{кВт})$$

де  $K_3$  - коефіцієнт запасу, який враховує відхилення режиму роботи компресора від розрахункового,  $K_3 = 1.1 \div 1.2$ ;

$\eta_{ИД}$  – індикаторний ККД компресора при політропічному стиску,

$$\eta_{ИД} = 0,6 \div 0,8;$$

$\eta_{МЕХ}$  – механічний ККД, що враховує механічні втрати в компресорі,

$$\eta_{МЕХ} = 0,88 \div 0,92;$$

$\eta_{ПЕР}$  – ККД передачі від вала електродвигуна до вала компресора,

$$\eta_{ПЕР} = 0,96 \div 0,98;$$

$Z$  – число ступенів компресора;

$m$  – показник політропи (для повітря  $m = 1,35$ ; для нафтового газу  $m = 1,25$ );

$P_1$  и  $P_2$  – абсолютні тиски газу, що стискається, на вході і виході компресора,  $H/m^2$ ;

$U_0$  - продуктивність компресора,  $m^3/c$ .

Промислові компресорні станції для накачування газу або повітря в пласт звичайно містять до 16 компресорів і є дуже енергоємними споживачами. Зазвичай вони живляться напругою 6 кВ від трансформаторних підстанцій 35/6 або 110/6 кВ.

Часто електроприводи компресорів мають схеми АПВ (автоматичного повторного вмикання після зникнення напруги). Поряд з приладами АПВ на компресорних станціях широко застосовують самозапуск двигунів. Ця міра направлена на забезпечення безперебійності накачування робочого реагенту в свердловини.

Для реалізації самозапуску на час зникнення або зниження напруги живлення двигуни не вимикаються захистом, а продовжують працювати зі зниженням частоти обертання. Після відновлення нормальної напруги вони підвищують свою частоту обертання і повертаються до нормального режиму. Це є можливим, якщо при появі повної напруги пускові струми не вимкнених двигунів, які одночасно починають розганятися, не перевищують визначених значень.

Розглянемо роботу типової схеми керування і захисту синхронного електроприводу компресора (рис. 10.4).

Керування пуском і зупинкою двигуна MS може здійснюватися як безпосередньо – за допомогою перемикача SM1, який встановлений біля компресора, так і дистанційно – перемикачем SM2. Поворот ручки SM1 в праве положення викликає ввімкнення реле часу КТ і контактора КМ1. Контактір замикає ланцюг обмотки збудження ОЗЗ збуджувача ВС на його якір і вмикає свою котушку КМ1 на самоблокування, а реле КТ з невеликою затримкою замикає ланцюг живлення контактора високої напруги КМ.

Цей контактор своїми головними контактами подає живлення на обмотку статора двигуна, а допоміжними контактами КМ здійснює самоблокування. Починається асинхронний пуск синхронного двигуна; напруга збуджувача ВС по мірі розгону двигуна зростає, і, як слідує, зростає струм збудження.

При досягненні підсинхронної частоти обертання ротор двигуна під дією вхідного моменту втягується в синхронізм. Регулювання струму збудження двигуна проводиться зміною опору реостата R1, який встановлений на пульті.

Для підвищення стійкості двигуна компресора при зниженні напруги передбачено форсування збудження двигуна при падінні напруги живлення.

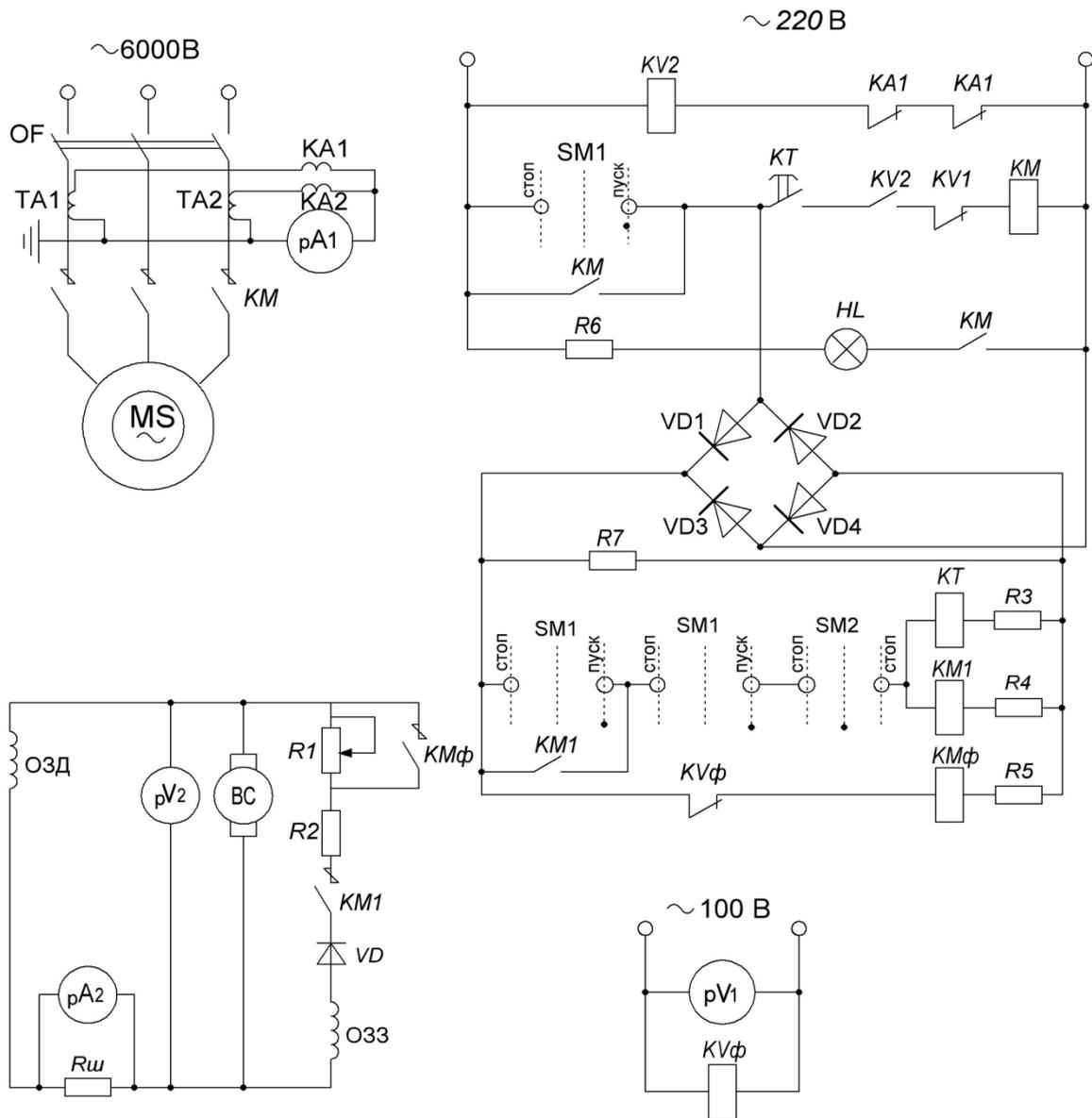


Рис. 10.4 Схема керування і захисту синхронного електроприводу компресора

MS – синхронний двигун; QF - автоматичний вимикач;  
 TA1, TA2 - трансформатори струму, вони служать для підключення вимірювальних приладів і обмоток реле струму;  
 KA - реле струму; KM - силовий контактор;  
 SM1 - універсальний перемикач, який знаходиться біля компресора;  
 SM2 - універсальний перемикач, який розміщений дистанційно, за його допомогою можна вимкнути двигун;  
 KT - реле часу; BC - збуджувач;  
 KM1 - контактор ввімкнення збуджувача;  
 KM<sub>ф</sub> - контактор форсування збудження;

$KV_{\phi}$  - реле форсування збудження;  $R_{ш}$  - шунтовий реостат;

ОЗЗ - обмотка збудження збуджувача;

ОЗД - обмотка збудження синхронного двигуна.

Контроль напруги здійснює реле  $KV_{\phi}$ , яке при зниженні напруги на 15% і більше відпускає якір і замикає свій контакт в ланцюгу контактора форсування  $KM_{\phi}$ . Останній своїм контактом закорочує реостат R1, напруга збуджувача піднімається, зростає струм в обмотці збудження ОЗД двигуна, а значить, збільшується і його максимальний момент. Після відновлення напруги мережі до номінального значення реле  $KV_{\phi}$  знову відключається і форсування автоматично знімається.

Для зупинки двигуна необхідно повернути або рукоятку SM1 в ліве положення, або SM2 в ліве чи праве положення. Це призводить до одночасного розриву ланцюгів контактора KM1 і реле часу КТ. KM1 розриває ланцюг обмотки збудження збуджувача ОЗЗ, забезпечуючи гасіння поля двигуна. Реле КТ з витримкою часу біля 1,5 секунд розриває ланцюг котушки контактора KM і вимикає обмотку статора від живлення. Така послідовність операцій знижує перенапругу в обмотці статора і на контактах контактора KM при його відключенні.

Захист двигуна від перевантажень і від асинхронного режиму здійснюється за допомогою реле струму КА1 і КА2, які з витримкою часу розмикають свої контакти в ланцюзі котушки реле захисту KV2, що відключає контактор KM. Реле KV1 (його котушка на схемі не показана) спрацьовує, якщо відсутня напруга 6 кВ в ланцюзі живлення двигуна, контакт KV1 розмикається, контактор KM не можна увімкнути.

В схемі передбачені вимірювальні прилади  $pA_1$ ,  $pA_2$ ,  $pV_1$ ,  $pV_2$ , а також кремнієвий діод VD5 для виключення перемагнічування збуджувача при пуску двигуна. Опори R3–R6 встановлені для узгодження по напрузі параметрів відповідних реле та сигнальної лампи НЛ.

### 10.2.2 Електропривід верстатів-качалок

Найбільш розповсюдженими для привода верстатів-качалок є асинхронні короткозамкнені двигуни з підвищеним пусковим моментом серій 4А, 5А та АИР у закритому виконанні, котрі зовні примусово обдуваються. Таке виконання гарантує надійну роботу двигунів, які встановлюються на відкритому повітрі і піддаються впливу вологи, піску, снігу. Також двигуни мають високий пусковий момент, кратність якого складає 1,7 - 2,3 при кратності пускового струму не більше 7,5.

Двигуни із синхронною частотою обертання 1500 об/хв мають більш високий ККД та  $\cos \varphi$  і меншу вагу, ніж двигуни з меншою частотою обертання, тому їм віддають перевагу. За малої кількості коливань верстата-качалки, коли при мінімальному діаметрі змінного шківів двигуна

й нормальному редукторі не здійснюється необхідна кількість коливань, часто застосовують двигуни на 1000 об/хв.

Для визначення необхідної потужності електродвигуна балансірного верстата-качалки користуються спрощеною формулою:

$$P = K \frac{M_{\text{сер}0} \omega_{\text{кр}}}{\eta_n}, \text{ кВт},$$

де  $\omega_{\text{кр}}$  — кутова швидкість кривошипа, рад/с, вона розраховується через кількість коливань верстата-качалки  $n_k$ ,  $\omega_{\text{кр}} = n_k / 9,55$ ;

$M_{\text{сер}0}$  — середній крутний момент, кН·м;

$K$  — коефіцієнт запасу, що враховує можливе перевантаження;

$\eta_n$  — ККД передачі від валу електродвигуна до валу кривошипа.

Більш точно ефективну потужність електродвигуна можна визначити за формулою:

$$P_e = \frac{1}{\eta_n} (K_1 + K_2 \cdot G \cdot S) \cdot n, \text{ кВт},$$

де  $G$  - маса стовпа рідини над плунжером в кг, яка визначається повною площею плунжера і висотою подачі рідини;

$S$  - довжина ходу полірованого штока в м;

$n$  - кількість коливань в 1 сек:

$\eta_n$  - ККД передачі від валу ЕД до валу кривошипа, яким враховуються втрати в редукторі і клинопасовій передачі ( $\eta_n = 0,96-0,98$ );

$K_1$  - коефіцієнт, який залежить від типу верстата-качалки;

$K_2$  - коефіцієнт, значення якого може бути знайдене для насосів діаметром 28 -120 мм з виразу:

$$K_2 = 1,26 \cdot 10^{-2} \sqrt{0,28(1 + 3,6 \frac{S \cdot n^2}{D^3} \cdot 10^5)^2 + \rho_{\Pi}^2},$$

тут  $D$  - діаметр плунжера насоса в мм;

$\rho_{\Pi}$  - коефіцієнт подачі установки, який представляє собою відношення фактичної подачі установки  $Q$  до теоретичної подачі  $Q_T$ , що визначається повним об'ємом ходу плунжера при рівності ходу його полірованого штока  $S$ . Значення  $\rho_{\Pi}$  лежить у межах  $0,8 \div 0,85$ .

Також потужність електродвигуна верстата – качалки може бути визначена по навантажувальній діаграмі механізму методом еквівалентного моменту  $M = f(t)$ :

$$M_{екв} = \sqrt{\frac{M_1^2 t_1 + M_2^2 t_2 + M_3^2 t_3 + \dots}{t_1 + t_2 + t_3 + \dots}},$$

де  $M_1, M_2, M_3, \dots$  - середні моменти опору на відрізках часу  $t_1, t_2, t_3, \dots$  навантажувальної діаграми.

Вибраний двигун необхідно перевірити по умові пуску верстата-качалки і умові подолання піків навантажувального моменту при роботі установки.

При пуску верстата – качалки двигун повинен розвинути момент, який забезпечує подолання статичного моменту опору системи і деякий надлишковий момент, необхідний для її розгону до встановленої швидкості. Статичний момент опору системи при пуску перевищує відповідний момент у встановленому режимі через сили тертя, що обумовлені заїданням рухомих частин, вижиманням змазки, наявністю піщаних пробок.

Розглянемо роботу типової схеми керування електроприводом верстата-качалки (рис. 10.5).

Для застосування в умовах індивідуального самозапуску випускаються спеціальні блоки керування електроприводами верстатів-качалок. Ці блоки також використовуються при груповому самозапуску і при відсутності самозапуску взагалі. Різні модифікації блоків розраховані на різні потужності електродвигунів.

До складу блока керування входять автоматичний вимикач QF1, триполюсний контактор КМ, теплові біметалеві реле КК1 і КК2, реле часу КТ і універсальний перемикач SM, які змонтовані в металевій водонепроникній шухляді. Зовні шухляди містяться ручка перемикача SM і штепсельний роз'єм ШР, призначений для приєднання електрифікованого трубного ключа.

Перемикач SM має одне положення ручки SM1 із самоповерненням після відпускання та інше – фіксоване положення (без повернення) SM2. Для ручного пуску двигуна після ввімкнення автоматичного вимикача QF живлення подається на реле обриву фаз KV3, що своїм контактом підключає до живлення котушку проміжного реле KV1, контакт KV1 замикається.

Ручку перемикача SM переводять у положення «Пуск» (праворуч), що призводить до замикання контактів SM1 і SM2. Котушка контактора КМ збуджується, його головні контакти КМ підключають двигун до мережі, а блок-контакт КМ шунтує контакт SM1, що розмикається при відпусканні ручки перемикача SM, повертаючись у нульове положення. Контакт SM2 лишається замкнутим.

У випадку зникнення напруги двигун відключається від мережі, тому що припиняється живлення котушки контактора КМ.

Наступне відновлення напруги призводить до збудження котушки реле часу КТ, через установлений час замикається контакт КТ, і отримує живлення котушка КМ, яка самоблокується замикаючим контактом КМ.

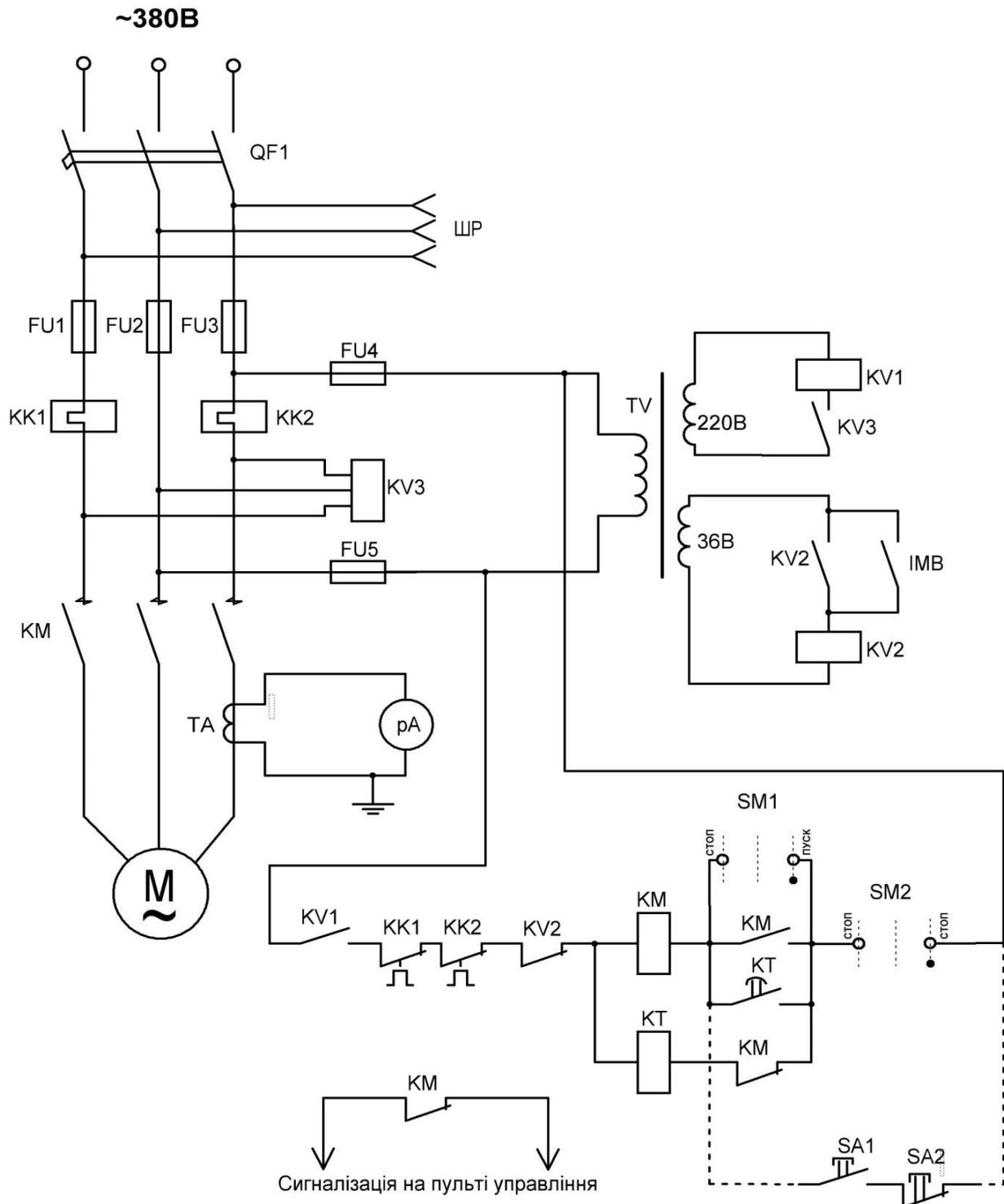


Рис. 10.5 Схема керування електроприводом верстата-качалки

Двигун верстата-качалки підключається до мережі, здійснюється його самозапуск. Котушка реле КТ знеструмлюється контактом КМ, що розмикається. Витримку часу на надійне відновлення напруги встановлюють від 7 до 20 секунд.

Для відключення двигуна без наступного самозапуску ручку перемикача SM переводять короткочасно в положення «Стоп» (уліво), що призводить до знеструмлення котушки КМ.

Контакти SM1 та SM2, котрі розімкнулися при цьому, залишаються розімкнутими при відпусканні ручки перемикача та її самоповерненні з положення «Стоп» у нульове положення.

Для дистанційного керування ручку SM ненадовго переводять у положення «Стоп» і відпускають. Після цього включення котушки КМ і пуск двигуна здійснюються натисканням кнопки SA1, а зупинку двигуна – натисканням кнопки SA2, що встановлені на пункті керування.

Для сигналізації на пункті керування про відключення двигуна служить додатковий нормально замкнений контакт КМ, котрий вмикає сигнальну лампу у випадку зупинки верстату-качалки.

У схемі передбачені захисти:

- від короткого замикання за допомогою запобіжників FU1–FU5;
- від теплових перевантажень за допомогою теплових реле КК1–КК2;
- від короткочасного зникнення напруги – самозапуск двигуна;
- від обриву штанг, штока, поламки редуктора, заклинювання плунжера за допомогою інерційного магнітного вимикача ІМВ, що встановлений на балансірі верстата-качалки, який спрацьовує від механічного удару при виникненні аварійної ситуації. Вимикач ІМВ замикає свій контакт, що призводить до спрацьовування проміжного реле KV2, розмикання його контакту і знеструмлення контактора КМ;
- від обриву фаз за допомогою реле KV3, що знеструмлює у випадку аварії котушку проміжного реле KV1 і відповідно котушку контактора КМ.

У тому випадку, коли застосовують груповий запуск чи самозапуск, блоки керування при індивідуальному самозапуску встановлюють у групі двигунів, які запускаються після відновлення напруги без витримки часу, реле часу КТ не монтують, а контакти SM1 і замикаючий блок-контакт КМ шунтують перемичками.

## **ТЕМА 11: ЕЛЕКТРОПОСТАЧАННЯ ОБ'ЄКТІВ НГП**

### **11.1 Основні поняття**

**Система електропостачання** (СЕР) створена для забезпечення живлення електричною енергією промислових споживачів і приймачів. Це комплекс пристроїв для виробництва, передачі і розподілу електричної енергії.

Джерелами електричної енергії є районні, теплові, гідравлічні та інші електростанції, які зазвичай розташовані на деякій відстані від споживачів електричної енергії. Робота електростанцій заснована на використанні різних природних енергетичних ресурсів.

Основними приймачами електроенергії підприємств є силові промислові установки – різноманітні машини і механізми з приводними електродвигунами (верстатобробне і підйомно-кранове обладнання, вентилятори, компресори, насоси, транспортні засоби та ін.); електричні освітлювальні пристрої; електролізні та електротермічні установки, перетворювальні агрегати для живлення двигунів низької машин і механізмів, внутрішньозаводського електричного транспорту; різні види електричних апаратів, які забезпечують керування технологічними процесами, електроприводами та ін.

З урахуванням різних категорій споживачів електричної енергії їх електропостачання повинно забезпечуватися на визначеному рівні, а головне, воно має бути якісним, надійним та економічним. При цьому напруга і частота електричної мережі не повинні відрізнятися від їх номінальних значень.

Важливою особливістю системи електропостачання є практична неможливість створення запасів електричної енергії, тому що отримана електрична енергія негайно витрачається приймачами і споживачами. Крім того, під впливом різноманітних факторів відбуваються збурення, що призводять до зміни стану системи.

Сьогодні робота енергосистеми, а також електропостачання промислових підприємств практично повністю автоматизовані, завдяки чому вирішуються основні завдання захисту, регулювання напруги, потужності, обліку електроенергії та ін. Створення універсального керування системою електропостачання забезпечує якісне електропостачання не лише промислових підприємств із різним характером їх виробництва, але й адміністративно-господарських, побутових та житлових приміщень.

Системний підхід до вирішення оптимізаційних завдань сприяє підвищенню продуктивності машин і механізмів, зменшенню втрат електричної енергії, а також комплексному підвищенню надійності та ефективності роботи електричного обладнання, приймачів і споживачів електричної енергії. При цьому повинні бути забезпечені

енергозбереження, екологічна безпека навколишнього при-родного середовища та техніка безпеки персоналу.

Живлення споживачів нафтової та газової промисловості електричною енергією здійснюється від мереж енергосистем або від власних місцевих електричних станцій.

Енергетичною системою називається сукупність електростанцій, ліній електропередач, підстанцій і теплових мереж, які зв'язані в єдине ціле спільністю режиму та безперервністю процесу виробництва і розподілення електричної та теплової енергії.

Частина енергосистеми, що складається тільки з електричних пристроїв – генераторів, розподільних пристроїв, трансформаторних підстанцій, ліній електричної мережі й приймачів електроенергії, називається електричною системою. До складу електричних мереж, призначених для передачі електроенергії, входять кабельні та повітряні лінії різних напруг, трансформаторні і розподільні підстанції.

За номінальною напругою все електроустаткування поділяється на устаткування до 1000 В (НН – низька напруга) й устаткування вище 1000 В (ВН - висока напруга).

**Стандартні номінальні напруги мереж НН:**

220, 380/220 та 660/380 В;

**для мереж ВН:**

6, 10, 20, 35, 110, 220, 330, 500, 750 і 1150 кВ.

В системах електропостачання розрізняють мережі:

1. Районні – призначені для живлення електроенергією великих районів, вони зв'язують електростанції електросистеми (ЕС) між собою та із центрами навантажень, мають напругу 110 кВ і вищу.
2. Місцеві – призначені для живлення невеликих районів із радіусом дії 15-20 км та напругою до 35 кВ.

Споживачі електроенергії НГП підключаються до живлення від районних або місцевих мереж електросистеми.

Лінії місцевих мереж приєднуються до розподільних пристроїв (РП) генераторної напруги електростанцій (6-10 кВ) чи РП підстанцій до 35 кВ, які називаються центрами живлення (ЦЖ).

Від ЦЖ електроенергія підводиться до розподільних пунктів (РПн), а від РПн надходить до електроустановок споживачів без зміни напруги або на трансформаторні підстанції (ТП), що знижують напругу перед розподіленням між окремими споживачами.

Лінія передачі, по якій електроенергія передається від ЦЖ до РПн без розподілення цієї енергії по її довжині, називається живильною, а лінія передачі, на котрій є кілька місць відбору енергії по довжині – розподільною.

## 11.2 Схема електропостачання споживачів нафтових та газових промислів при живленні від енергосистеми

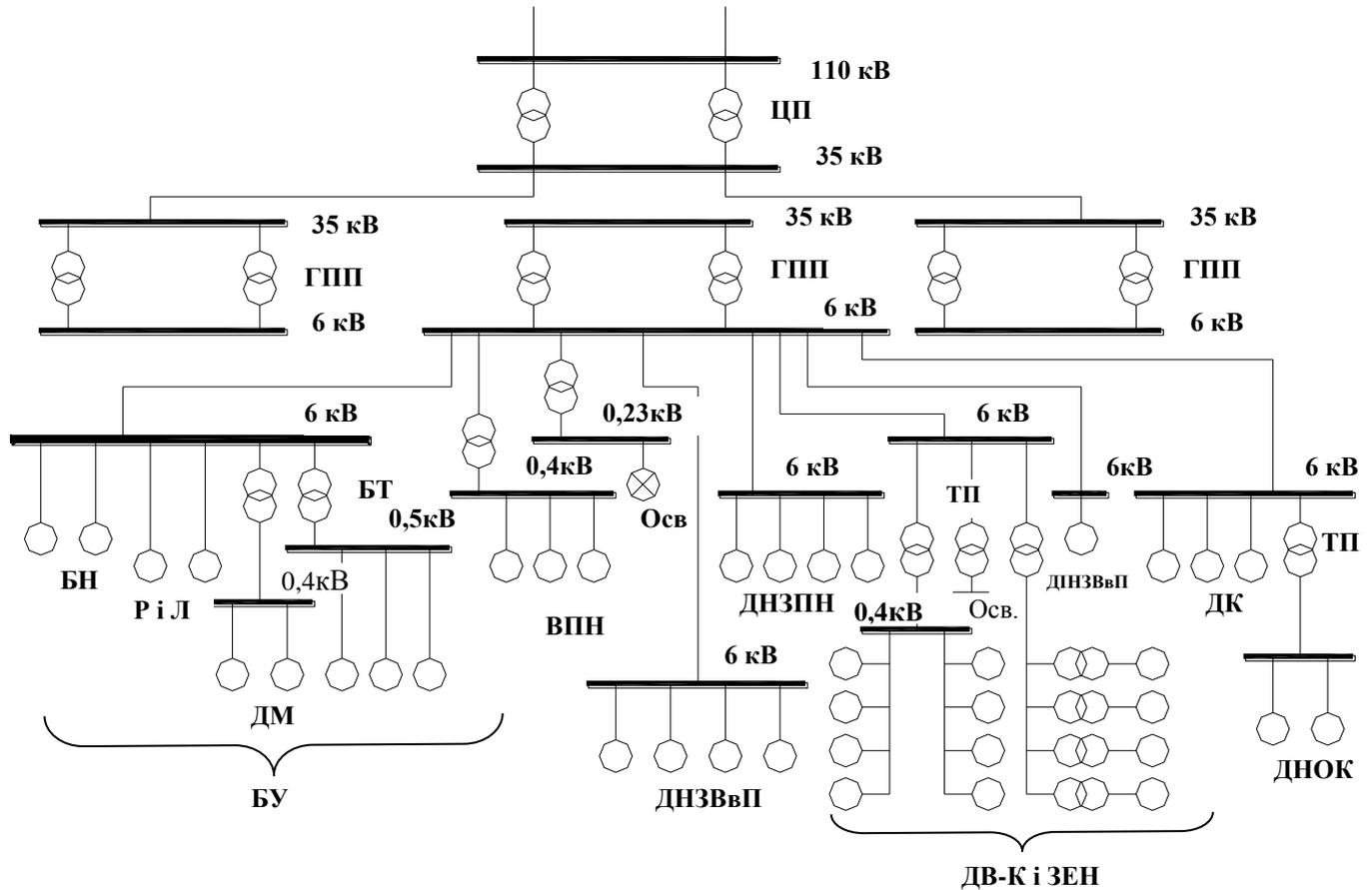


Рис. 11.1 Схема електропостачання споживачів НГП при живленні від енергосистеми:

ЦП – центральна підстанція;

ГПП – головна знижувальна підстанція;

РП – районна підстанція;

ТП – трансформаторна підстанція;

Осв. – освітлення;

ДНЗПН – двигуни насосів зовнішнього перекачування нафти;

ДК – двигуни компресорів;

ДНЗВВП – двигун індивідуального насоса закачування води в пласт;

ДВ-К і ЗЕН – двигуни верстатів- качалок заглибних електронасосів;

ДНЗВВП – двигуни насосів закачування води в пласт;

ВПН – внутрішнє перекачування нафти;

Р і Л – ротор і лебідка;

БН – бурові насоси;

ДМ – допоміжні механізми;

БУ – бурова установка;

БТ – буровий трансформатор;

ДНОК – двигуни насосів охолодження компресорів

Від районної електричної мережі енергосистеми за допомогою ліній напругою 110 кВ живиться центральна підстанція (ЦП). Від неї енергія при напрузі 35 кВ подається на промислові знижувальні підстанції 35/6 кВ. При напрузі 6 кВ енергія подається до бурових установок, компресорних станцій, насосів перекачування нафти, насосних систем підтримки

пластового тиску, трансформаторних підстанцій 6/0,4 кВ, що живлять електрообладнання свердловин насосної експлуатації. На бурових установках основні двигуни (ротора, лебідки, бурових насосів) живляться при напрузі 6 кВ, а двигуни допоміжних механізмів – при напрузі 0,38 кВ через знижувальні трансформатори 6/0,4 кВ. Існують бурові установки, на яких двигуни ротора та лебідки живляться напругою 0,5 кВ, котру отримують від бурового трансформатора 6 /0,525 кВ.

Двигуни верстатів-качалок і установки заглибних електронасосів одержують живлення 0,38 кВ від промислових трансформаторних підстанцій 6/0,4 кВ, від яких живляться й інші споживачі з двигунами потужністю, що не перевищує 150 кВ. Зараз упроваджується система глибокого введення електроенергії, при якій більш висока напруга підводиться безпосередньо до вузлів споживачів. При цьому на бурові установки безпосередньо підводяться лінії передачі 35 або 110 кВ. До установок верстатів-качалок і заглибних електронасосів електроенергію можуть підводити при 6 кВ з установленням знижувальних трансформаторів біля свердловин.

Компресорні станції магістральних газопроводів і перекачувальні насосні станції магістральних трубопроводів отримують електроенергію від внутрісистемних районних розподільних мереж енергосистем при напрузі 110 кВ та оснащуються власними потужними знижувальними підстанціями 110 / 6 кВ, які мають також ступені вторинної трансформації 6/0,4 кВ.

### **11.3 Категорії електроприймачів**

За ступенем необхідної безперебійності електропостачання всі електроприймачі розподіляються на 3 категорії.

До першої категорії належать електроприймачі, перерва в електропостачанні котрих може спричинити небезпеку для життя людей, значний збиток, пов'язаний із пошкодженням обладнання, масовим браком продукції, тривалим розладом технологічного процесу (наприклад компресорні станції магістральних газопроводів, головні насосні станції, бурові установки на морі). Зі складу електроприймачів I-й категорії виділяють особливу групу електроприймачів, безперебійна робота яких необхідна для безаварійного зупинення виробництва з метою запобігання загрози для життя людей, вибухів і пожеж.

До другої категорії належать електроприймачі, перерва в електропостачанні яких пов'язана з масовим недовипуском продукції, простоем робітників, механізмів і промислового транспорту (насосні станції, не віднесені до 1-ї категорії, компресорні станції закачки газу в підземні сховища, підприємства, електротранспорт).

До третьої категорії належать всі інші електроприймачі (допоміжні цехи, склади, гаражи, житлові поселення).

Установки, віднесені до 1-ї категорії, повинні мати живлення, котре забезпечується двома незалежними джерелами з автоматичним резервуванням. Перерва в електропостачанні допускається лише на час, необхідний для автоматичного ввімкнення резервного джерела (1-2 сек).

Електропостачання особливої групи електроприймачів I-ї категорії повинне передбачати живлення від трьох незалежних ДЖ. Для приймачів з невеликим навантаженням як третє ДЖ може бути використане автономне джерело (дизельна електростанція, акумуляторна батарея).

Для установок, що належать до 2-ї категорії, допустимі перерви в електропостачанні на час, необхідний для вмикання резервного живлення персоналом (до 30 хв.).

Для навантажень 3-ї категорії допустима перерва в електропостачанні до 24-х годин. Живлення таких споживачів виконується від одного джерела без резервування.

### **11.4 Схеми електричних мереж**

Схеми електромереж напругою до 1000 В і місцевих мереж напругою, вищою ніж 1000 В, бувають двох видів : магістральні та радіальні.

У місцевих мережах внутрішнього електропостачання напругою, вищою від 1000 В (звичайно 6 і 10 кВ), виконаних за магістральною схемою (рис. 11.2), до однієї лінії живлення приєднуються вводи декількох підстанцій. Виходячи з потреб якнайшвидшого відновлення живлення споживачів при пошкодженні ділянок магістралі, до однієї магістралі приєднуються не більше 3-5 підстанцій.

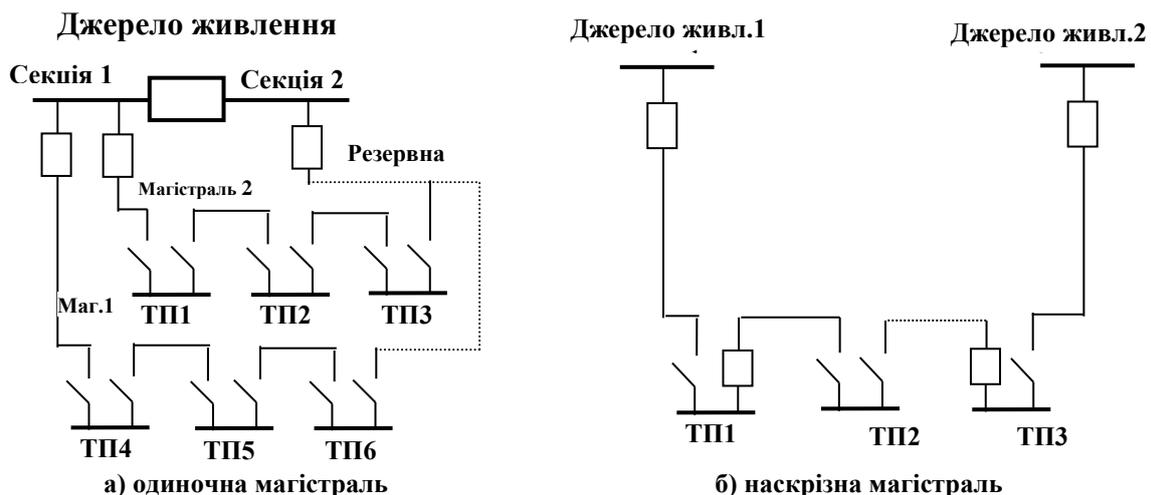


Рис.11.2 Магістральні схеми мереж напругою, вищою ніж 1000 В

Знаходять застосування схеми з одиночними магістралями, де одна лінія послідовно обходить ряд трансформаторних підстанцій ТП, а резервування здійснюється резервною магістраллю (рис. 11.2,а). Більша

надійність забезпечується при схемі наскрізних магістралей із двостороннім живленням, коли магістраль із двох боків приєднується до різних джерел живлення і в нормальних умовах розімкнута на одній із підстанцій (рис. 11.2,б).

Радіальні схеми живлення (рис. 11.3) в мережах вище 1000 В характеризуються наявністю окремих ліній, що з'єднують кожного споживача із джерелом живлення. Вихід із ладу такої лінії призводить до припинення електропостачання лише цього споживача до моменту її відновлення.

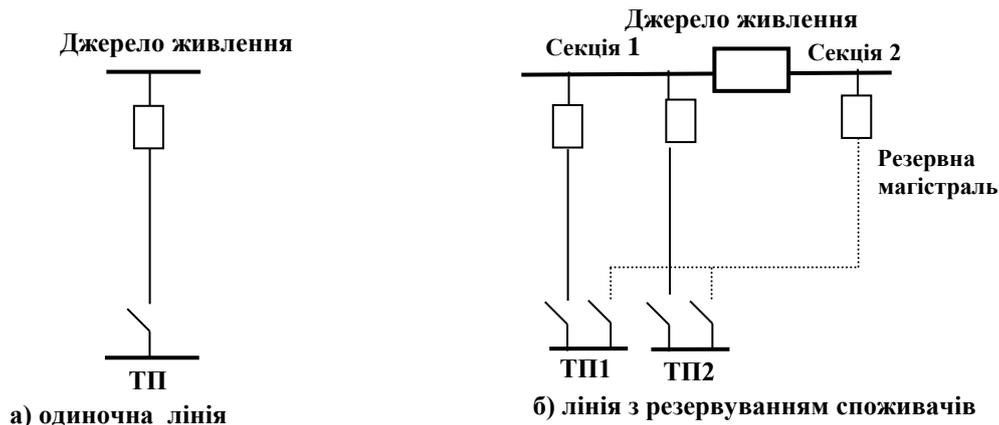


Рис.11.3 Радіальні схеми мереж напругою, вищою ніж 1000 В

Схема (рис.11.3, а) дозволяє за 20-30 хвилин відновити живлення споживачів при виході з ладу одного із спарених кабелів. Схема (рис.11.3,б) належить до схем змішаного типу, що поєднують у собі елементи магістральних і радіальних схем. Основне живлення виконано радіальними лініями, а резервне забезпечується однією наскрізною магістраллю. Відновлення живлення споживачів здійснюється автоматичним вмиканням секційного шинного вимикача, якщо лінії працюють радіально, й автоматичним вмиканням резервної лінії, якщо нормально працює одна з ліній, а інша вимкнена. У цьому і в іншому випадку час перерви в електропостачанні не перевищує 1-2 сек.

У мережах напругою до 1000 В магістральні схеми застосовують для живлення верстатів-качалок і заглибних електронасосів на промислах, електродвигунів верстатів та іншого силового електрообладнання ремонтних цехів і заводів, електродвигунів допоміжних пристроїв компресорних станцій магістральних газопроводів тощо.

Розподільні мережі від щитків до споживачів виконують по магістральних та радіальних лініях. Підведення електроенергії від апаратів керування до електродвигунів і інших електроприймачів звичайно виконується за допомогою радіальних ліній. Апаратуру управління електрообладнанням, що встановлено у вибухонебезпечних приміщеннях, зазвичай виносять за межі цих приміщень.

## 11.5 Основні конструктивні елементи електричних ліній

Електричні лінії, розташовані на відкритих територіях, виконують повітряними і кабельними. У середині будівлі лінії виконують ізольованими проводами та кабелями, які прокладають у тунелях, каналах, стінах, сталевих трубах.

**Повітряні лінії (ПЛ)** мають такі конструктивні елементи: провід, грозозахисні троси, опори, ізолятори, арматури для кріплення ізоляторів, заземлювачі.

Існують **одноланцюгові й дволанцюгові** повітряні лінії, причому під одним ланцюгом прийнято розуміти три дроти однієї трифазної лінії.

Для ПЛ застосовують неізольовані алюмінієві, сталюалюмінієві і сталеві дроти. На морських нафтових промислах алюмінієві дроти можуть швидко руйнуватися внаслідок корозії, через це тут дозволяється застосовувати більш дорогі мідні дроти.

Опори служать для підвішування дротів у повітрі, вони виготовляються з дерева, сталі та залізобетону. Дерев'яні опори використовують для ліній напругою від 0,38 до 220 кВ, залізобетонні – від 0,38 до 330 кВ, а металеві – від 35 кВ і вище.

Основними є **анкерні опори**, вони служать для жорсткого закріплення дротів, їх встановлюють через деяке число проміжних опор. Їх встановлюють також на переходах через дороги, на перетинах з іншими лініями та спорудами.

Проміжні опори встановлюються на прямих ділянках траси й служать для підтримки дротів у повітрі між анкерними опорами.

На морських лініях часто ставляться підвищені опори для проходження морських суден. Такі опори називають «воротними», вони мають висоту до 24 метрів над рівнем моря.

Середнє значення довжини прогону для ЛЕП складає:

– при напрузі 6 ÷ 10 кВ - 50 ÷ 100 метрів (відстань між дротами 0,8 ÷ 1,5 метри) ;

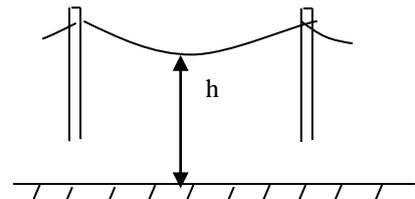
– при напрузі 35 кВ - 150 ÷ 200 метрів (відстань між дротами 3 метри);

– при напрузі 110 кВ - 170 ÷ 250 метрів (відстань між дротами 3 ÷ 5 метрів).

Найменша відстань дроту, що провисає, до землі по закону ланцюгової лінії (габарит  $h$ ) складає:

ЛЕП 6 ÷ 110 кВ – 6 ÷ 7 метрів;

220 ÷ 500 кВ – 7 ÷ 8 метрів.



У ЛЕП напругою 35 ÷ 800 кВ установлюють переважно металеві та залізобетонні опори. На морських промислах застосовують тільки металеві опори. Тут повітряні лінії будуються на глибині моря до 12 метрів.

Ізолятори служать для закріплення дротів на опорах із метою їх ізоляції від опор і землі, виготовляються з порцеляни або загартованого скла.

Для захисту від прямих ударів блискавки в ПЛ напругою 110 кВ та вище служить надійно заземлений сталевий грозозахисний трос, підвішений над струмоведучими проводами. ПЛ напругою 6 ÷ 35 кВ захищаються від атмосферних перенавантажень тільки на підходах до перетворювальних станцій.

На проміжних опорах ПЛ напругою 0,4 кВ, особливо у сільських районах, через кожні 5-6 прогонів (до 200 м), а також на кінцевих опорах установлюють грозозахисні заземлення, поєднані з повторним заземленням нейтрального проводу (за його наявності) опором 10-30 Ом. До цих заземлювачів надійно приєднуються крюки і штирі ізоляторів усіх фазних проводів.

**Кабельні лінії** (КЛ) значно дорожчі й прокладаються там, де будівництво повітряних ліній неможливе або недоцільне. Виявлення пошкоджень у КЛ потребує великих витрат часу. До переваг належать: недоступність КЛ для сторонніх осіб, захист від газових та інших зовнішніх впливів.

Найбільш розповсюджені кабелі на напругу до 1000 В і до 10 кВ. Кабелі на 35 кВ та 110 кВ у НГП практично не застосовуються.

У КЛ використовуються трижильні кабелі з паперовою, пластмасовою і гумовою ізоляцією. Для з'єднання кабелів застосовують свинцеві та чавунні з'єднувальні муфти.

Прокладання кабелів ведуть безпосередньо в землі – в траншеях, а при великій кількості кабелів для них роблять спеціальні тунелі.

На морських промислах використовують кабельні прокладання по дну моря, для чого застосовують спеціальні морські кабелі марки СК. Виведення цих кабелів на берег виконують у трубах, а на морські основи – по палях основ. Однак у випадках використання кабельних ліній на морських промислах, якщо дозволяє траса лінії, кабель прокладають, головним чином, по естакадах, що забезпечує більшу надійність КЛ порівняно з підводними.

Силові кабелі, які прокладають у тунелях і всередині приміщень (у каналах, безпосередньо на стінах), повинні бути звільнені від зовнішнього покриву з пряжі з метою пожежної безпеки.

## **11.6 Електрообладнання розподільних пристроїв**

Усі електричні апарати високої напруги (ВН) поділяються на захисні та комутаційні. До перших належать плавкі запобіжники, вентиляльні і

трубчасті розрядники, до других – апарати для вмикання та вимикання силових електричних ланцюгів (масляні, автогазові, повітряні й вакуумні вимикачі та роз'єднувачі).

**Запобіжники ВН.** Для захисту від струмів короткого замикання силових установок відносно невеликої потужності на напругу до 35 кВ застосовуються кварцові запобіжники типу ПК. Вони являють собою порцелянову трубку із кварцовим піском і плавкою вставкою з декількох паралельно з'єднаних між собою посріблених мідних дротів. Випускаються на напругу 3, 6, 10, 35 кВ і струми до 400А.

**Роз'єднувачі ВН** виготовляють без дугогасних пристроїв, ними не можна вимкати лінії ВН під навантаженням, оскільки виникнення відкритої стійкої дуги між контактами може закортити фази та викликати аварію. Значного поширення набули триполосні роз'єднувачі із спільним керуванням полюсами за допомогою ручних важільних приводів. Випускаються на всі стандартні напруги ВН і струми 200 – 14000 А.

**Масляні вимикачі** застосовуються для вмикання та вимикання електроустановок, що знаходяться під навантаженням, а також вимикання їх при короткому замиканні. Розрізняють вимикачі з великим об'ємом масла (бакові) і з малим (горшкові).

Високоякісне мінеральне трансформаторне масло в масляних вимикачах використовується в якості дугогасильного середовища та для підсилення ізоляції струмоведучих частин вимикача одна від одної і від корпусу, який надійно заземляється.

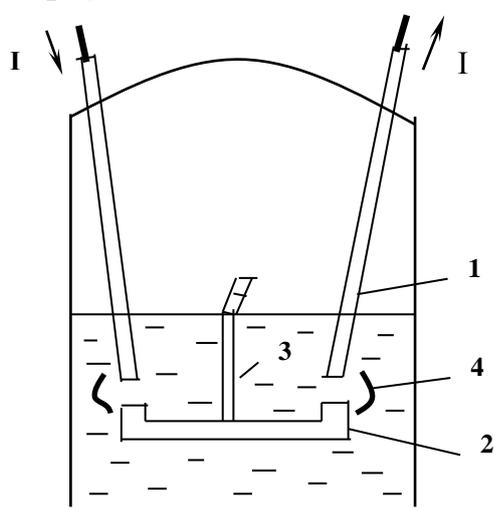
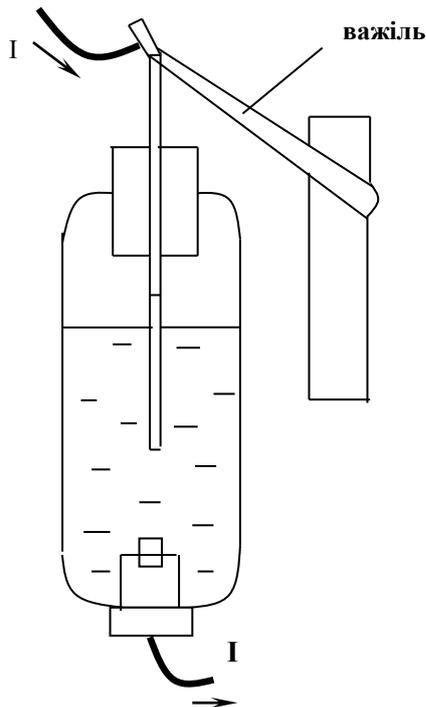


Рис.11.4 Масляний вимикач  
1,2 – нерухомі та рухомі контакти;  
3 - привідний механізм;  
4 - електрична дуга

У **баковому** масляному вимикачі (рис.11.4) із вільним гасінням дуги (без дугогасильної камери) під час вимикання електричного ланцюга, що знаходиться під навантаженням, між контактами 1 та 2 утворюються два розриви на фазу і дві дуги 4 в маслі. Під дією високої температури дуги масло змінює свої властивості, біля місць розриву контактів виникнуть газові бульбашки, що складаються з водню. Водень сприяє деіонізації дуги, і вона швидко гасне.

Такі вимикачі мають невелику вимикаючу здатність і порівняно великий час вимкнення 0,15 - 0,2 сек. Керування вимикачем виконується ручним приводом типу ПРБА (привід важільний з автоматичним вимиканням).



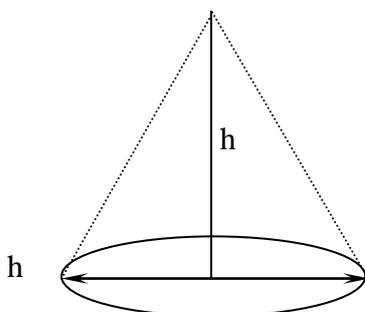
У малооб'ємних **горшкових вимикачах** використовується небагато масла (до 10 кг) – тільки в якості середовища для гасіння дуги. Широко застосовуються вимикачі типів ВМГ (вимикач масляний горшковий) на напругу 6 – 10 кВ та ВМП (підвісний) на 10 і 35 кВ. Вимикач складається з трьох однофазних вимикачів, змонтованих вертикально на спільній сталевій рамі. Основною його частиною є полюс – циліндр із латуні та сталі, всередині якого розташована дугогасильна камера, що створює при вимиканні ланцюга поперечно-поздовжнє масляне дуття. Керування вимикачем виконується електромагнітним приводом типу ПЕ (рис. 11.5).

Рис. 11.5 Горшковий вимикач

Вимикач типу ВМГ–10 призначений для роботи на номінальну напругу 10кВ, струми 630 і 1000 А та вимикаючу потужність до 350 тис. кВА.

У повітряних вимикачах дуга гаситься струменем стислого повітря, що надходить у зону горіння дуги під тиском до  $2,0 \text{ мН/м}^2$ . При цьому тискові й температурі  $20^0\text{C}$  повітря рухається зі швидкістю 300 м/с та інтенсивно видаляє іонізуючі частинки з дугового проміжку, створюючи в ньому високу електричну міцність, при якій напруга, що відновлюється, не в змозі знову викликати дуговий розряд після його завершення. Повітря подається зі спеціального резервуара стиснутого повітря. На об'єктах НГП повітряні вимикачі знайшли застосування в РП напругою 35 і 110 кВ.

Захист установок від прямих ударів блискавки здійснюється заземленими стрижневими та тросовими **блискавковідводами**.

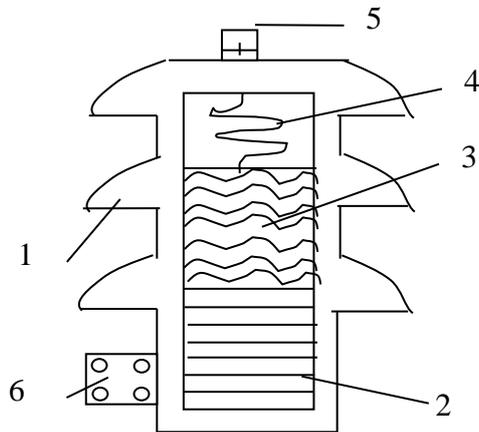


Зона, захищена блискавковідводом, приблизно вписується в конус з основою, рівною висоті блискавковідводу  $h$ .

Тросові блискавковідводи застосовуються для захисту ліній ВН від прямих ударів блискавки.

Для захисту електроустановок від атмосферних перенапруг використовуються вентильні і трубчасті розрядники.

**Вентильним розрядником** називається апарат, що складається з іскрового повітряного проміжку та влітових дисків. Останні виготовляються із суміші порошкоподібних карборунду і графіту з рідким склом. Особливістю вліту є нелінійна зворотна залежність його опору від прикладеної напруги, тобто опір швидко падає при збільшенні напруги.



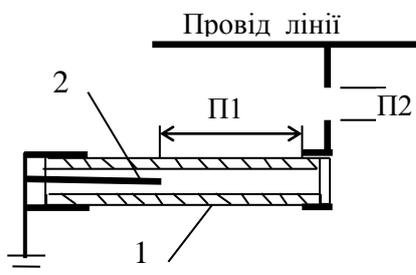
**Вентильний розрядник** складається з герметичного порцелянового корпуса 1, у нижній частині якого розміщені влітові диски 2, а у верхній — послідовно з'єднані іскрові проміжки 3. Іскрові проміжки стискаються спіральною пружиною 4 та центральним болтом. Вентильний розрядник приєднується затискачем 5 до фазного проводу захисної установки, а з боку влітових шайб – затискачем 6 до заземлювача (рис.11.6).

Рис. 11.6 Вентильний розрядник

Розрядники підключаються до всіх трьох фаз. При появі перенапруг, котрі виникають при грозових розрядах поблизу ліній і відкритих підстанцій, пробиваються іскрові проміжки розрядника та влітові диски потрапляють під велику напругу. Їх опір різко зменшується, а струм розряду значно збільшується, й енергія газової перенапруги розряджається на землю. Після спрацьовування розрядника напруга різко падає, а опір влітових дисків відновлюється. Випускаються вентильні розрядники серії РВП, РВС, РВО, РВМ і РВМГ. Позначення вентильного розрядника на електричних схемах:



**Трубчасті розрядники** служать для захисту від грозових перенапруг ЛЕП напругою 6-110 кВ.



Трубчастий розрядник складається з двох послідовно з'єднаних повітряних проміжків: зовнішнього П2 та внутрішнього П1, розташованого всередині трубки 1. Трубка виготовляється з газогенеруючої речовини або органічного скла. Стрижневий електрод 2 обов'язково заземлюється (рис. 11.7).

Рис. 11.7 Трубчастий розрядник

При грозівій перенарузі обидва іскрові проміжки розрядника пробиваються, і через розрядник на землю йде струм газового розряду. Між іскровими проміжками виникає дуга, під дією високої температури якої в трубці виділяється велика кількість газів. Гази вириваються з трубки під великим тиском, проводячи деіонізацію дуги та її гасіння.

Виготовляються трубчасті розрядники серії РТ і РТВ. Позначення на схемах:



Комплектні РП високої напруги є найбільш досконалими, вони набираються згідно з проектною схемою з окремих блоків – камер чи металевих шаф з обладнанням. Уведення може бути кабельним або повітряним. Широке застосування знайшли шафи серій КРУ-10Е, КРУ2-10П, К-ХП/80, КР-10/500 на номінальну напругу 10 кВ та струми 630, 1000, 1600, 2000 і 2750 А.

**Розподільні пристрої НН** виконуються у вигляді розподільних щитів, встановлених у приміщеннях. Комплектуються з окремих панелей, з'єднаних між собою. Панель – повністю змонтований елемент щита, на якому встановлені зборні шини, рубильники, автомати, контактори, трансформатори струму і вимірювальні прилади. Широко розповсюджені панелі типу ПСН на напругу до 500 В та струми до 1600 А, ПНН – на напругу до 380 В, щити серії ЩО – 70 на напругу 380 В тощо.

### **11.7 Трансформаторні підстанції**

Трансформаторною підстанцією (ТП) називається електроустановка, призначена для зміни напруги з метою розподілення енергії (знижувальна ТП) або передачі енергії на відстані (підвищувальна ТП).

**Підвищувальні** трансформаторні підстанції (споруджувані зазвичай при електростанціях) перетворюють відносно невелику напругу, що виробляється генераторами, у вищу напругу (одного або декількох значень), необхідну для передачі електроенергії по лініях електропередачі (ЛЕП).

**Знижувальні** трансформаторні підстанції перетворюють первинну напругу електричної мережі в нижчу вторинну. Залежно від призначення і від величини первинної і вторинної напруги знижувальні трансформаторні підстанції підрозділяються на районні, головні знижувальні і місцеві (цехові). Районні трансформаторні підстанції приймають електроенергію безпосередньо від високовольтних ЛЕП і передають її на головні знижувальні ТП, а ті (знизивши напругу до 35, 10 або 6 кВ) — на місцеві і цехові підстанції, на яких здійснюється останній рівень трансформації (з пониженням напруги до 660, 400 або 230 В) і розподіл електроенергії між споживачами.

За конструкцією розрізняють відкриті та закриті ТП.

У першому випадку обладнання розташоване на відкритому повітрі, а в другому - в закритому приміщенні. Одно- і двотрансформаторні ТП

потужністю до 630 кВА з первинною напругою 6-10 кВ та вторинною 0,4/0,23 кВ із повітряним чи кабельним вводом застосовуються для електроприймачів 2-ї і 3-ї категорій.

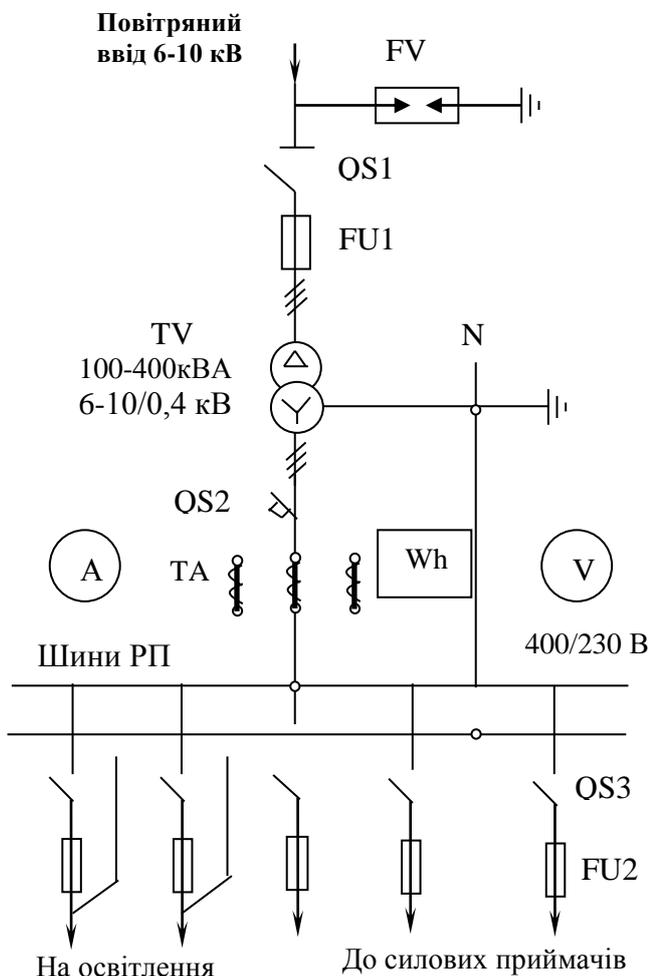


Рис. 11.8 Однотрансформаторна підстанція

Захист ТП від атмосферних перенавантажень здійснюється трубчастим розрядником FV. Струм на лінії НН вимірюється амперметром А через трансформатор струму ТА, напруга – вольтметром V, а енергія – лічильником Wh.

Дво- й тритрансформаторні підстанції застосовуються для живлення приймачів 1-ї та 2-ї категорій. У цьому випадку підстанція має РП і з боку первинної напруги 6-10 кВ. До шини РП приєднується не менше двох самостійних кабельних чи повітряних ввідів від джерела живлення. Для внутрішніх і зовнішніх установок частіше використовуються підстанції КТП, КТПН, КТПВ на напругу 10,35, 110 кВ потужністю від 100 до 16000 кВА.

Розглянемо схему однотрансформаторної ТП (рис.11.8). Трансформатор TV із заземленою нейтраллю на вторинній стороні підключається до живлення мережі через роз'єднувач QS1 та кварцовий запобіжник FU1 (або через запобіжник і вимикач навантаження).

Для відключення трансформатора необхідно спочатку повністю вимкнути навантаження трансформатора роз'єднувачем QS2, який також автоматично вимикає ТП у режимі КЗ. Запобіжники FU2 (чи автомати QS3) служать для захисту трансформатора і ліній, що відходять, від струмів КЗ та перенавантажень із боку НН. Трансформатори потужністю 630 кВА і більше мають газовий захист (газове реле від внутрішньовиткових замикань).

## 11.8 Силлові трансформатори та їх вибір

У розглянутих ТП застосовують силлові знижувальні трансформатори 110/35; 110/6; 35/6; 35/0,4-0,5-0,69; 6-10/0,4-0,5-0,69 кВ. Потужності трансформатора коливаються в межах від одиниць кВА до десятків МВА.

Основні електричні характеристики силлових трансформаторів:

- 1) номінальна потужність  $S_H$ , кВА;
- 2) перенавантажувальна здатність;
- 3) висока і низька номінальна напруга, кВ ;
- 4) напруга короткого замикання  $U_K$ , %;
- 5) втрати активної потужності ХХ і КЗ -  $\Delta P_{XX}$  та  $\Delta P_{KЗ}$ , кВт;
- 6) струм холостого ходу  $I_{XX}$ , у % від номінального  $I_H$ .

Масляні трансформатори допускають 60%-ве аварійне перевантаження протягом 15 хвилин, а сухі — 50%-ве перевантаження протягом того ж часу. При зовнішній установці масляних трансформаторів допустимі для них аварійні перевантаження зростають. При виборі потужності і кількості працюючих трансформаторів повинні бути враховані економічні фактори: робота їх із найменшими втратами, тобто з найбільшим ККД.

Повна потужність трансформатора, необхідна для його вибору, визначається як сума активної (P) та реактивної (Q) потужностей з урахуванням коефіцієнта опитування кожного електроприймача, підключеного до трансформатора. Коефіцієнт опитування  $K_0$  – це відношення споживаної потужності до номінальної.

Спочатку обчислюється розрахункова активна потужність

$$P = \sum_{i=1}^n K_{oi} \cdot P_i ,$$

де  $P_i$  – номінальна потужність електроприймача n-ої групи;

$K_{oi}$  – коефіцієнт опитування електроприймача n-ої групи.

Далі визначається реактивна потужність

$$Q = \sum_{i=1}^n K_{oi} \cdot P_i \cdot tg \varphi_i ,$$

де  $tg \varphi_i$  - значення, що відповідають коефіцієнту потужності електроприймача n-ої групи.

Повна потужність трансформатора розраховується таким чином:

$$S_{TV} = \sqrt{P^2 + Q^2} , \text{ кВА} .$$

## 11.9 Релейний захист

Релейним захистом називається спеціальний автоматичний пристрій, що складається з різних типів реле і призначений для захисту електроустановок від аварійних режимів роботи, особливо режиму

короткого замикання (КЗ). Релейний захист у випадку КЗ спрацьовує та впливає на вимикач, який вимикає аварійні елементи установки, а також сигналізує про небезпеку черговому персоналу.

Основними вимогами до релейного захисту є швидкодія, вибірковість, чутливість і надійність. Вибірковістю дії захисту називається її здатність вимикати аварійні елементи установки тільки найближчим до неї вимикачем, щоб непошкоджена частина залишалась у роботі.

Найбільше розповсюдження отримав максимально-струмовий захист (МСЗ). МСЗ з електромагнітним реле струму прямої чи побічної дії спрацьовує та дає імпульс на вимикання вимикача аварійної лінії лише в тому випадку, коли струм у захисному ланцюзі перевищує струм уставки реле струму. Струмові захисти поділяються на максимально-струмові (з витримкою часу спрацювання) і струмові відсічки, що спрацьовують майже миттєво.

В установках середньої та великої потужності застосовується релейний захист підвищеної чутливості на оперативному постійному струмові зі спеціальними реле струму побічної дії, які монтуються на щитах окремо від вимикачів (рис.11.9). Котушка реле струму КА1 підключається до вторинної обмотки трансформатора струму ТА.

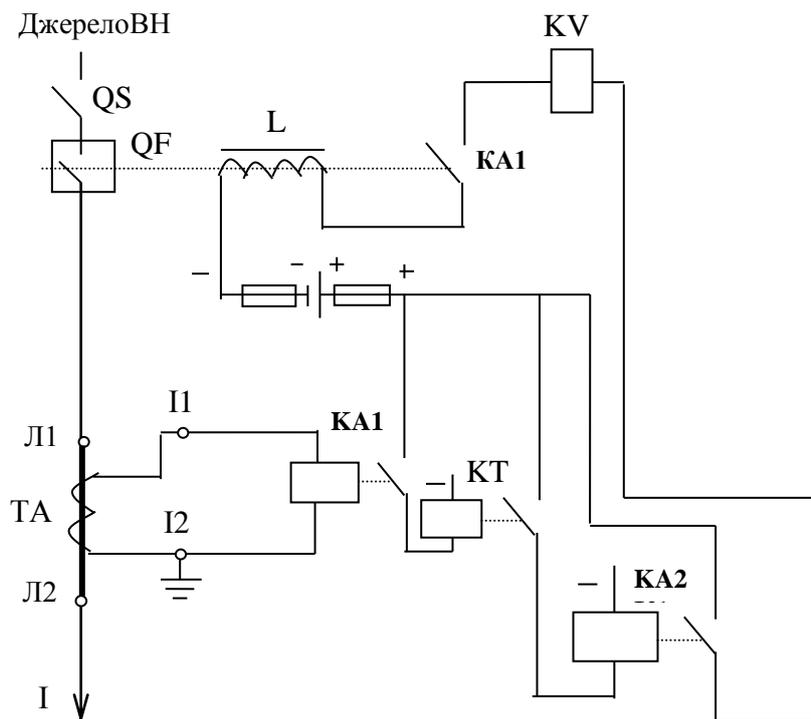
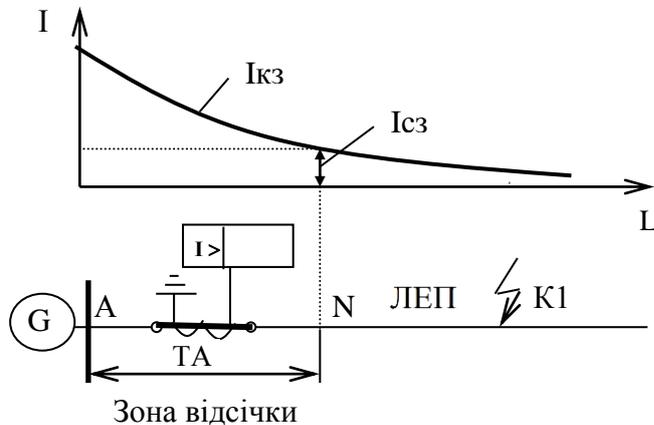


Рис. 11.9 Максимально- струмовий захист

При спрацьовуванні реле струму КА1 його допоміжні контакти КА1 замикають ланцюг котушки KV вимикання привода вимикача QF, котрий вимикає аварійну лінію. Час спрацьовування реле складає 0,05—0,15 сек., необхідна витримка часу захисту виконується за допомогою реле часу КТ.

Для вмикання ланцюга вимикаючої котушки  $L$  вимикача  $QF$  із великим робочим струмом, а також для розмноження сигналів у схемі захисту використовується проміжне реле струму  $KA2$ .

Принцип дії струмової відсічки заснований на тому, що значення струму  $K3$  ( $I_{K3}$ ) у ланцюзі зменшується при віддаленні місця  $K3$  від джерела живлення (збільшується опір від місця ушкодження).



Відсічка буде діяти в межах ділянки  $AK1$  тільки на частині лінії  $AN$ , де  $I_{K3} > I_{C3}$  (струм спрацювання захисту). Зона відсічки  $AN$  і є зоною захисту лінії, а зона  $NK1$  не захищається (рис.11.10).

Рис. 11.10 Струмова відсічка

Для захисту мереж застосовуються також допоміжні реле: реле часу (для штучного уповільнення дії захисту), проміжні реле, що передають дію основних реле на вимкання вимикачів та виконують зв'язок між елементами захисту, вказівні реле, які сигналізують дії захисту.

### **11.10 Автоматичне повторне вмикання лінії (АПВ) і автоматичне вмикання резерву (АВР)**

У багатьох випадках короткі замикання, що викликають вимкання лінії електропередачі, мають миттєвий характер (попадання між проводами лінії сторонніх предметів, схльостування проводів, замикання через грозові розряди). Тому для скорочення перерви в електропостачанні споживачів оснащують приладами АПВ, які автоматично знову вмикають лінію через  $0,5 \div 1,5$  секунд після її вимкання захистом. АПВ може застосовуватися як на лінії передачі, що живить декілька споживачів, так і на відгалуженні для окремого трансформатора, двигуна і т.п. Пристрої АПВ широко використовують в системах електропостачання нафтових промислів, установок транспортування й збереження нафти і газу.

Для споживачів 1-ої категорії, що забезпечуються резервними джерелами живлення, вмкання резервних джерел при закінченні живлення від основних джерел повинно проводитися автоматично. Це здійснюється системою АВР на РП і підстанціях. Передбачається також АВР двигунів відповідальних агрегатів.

Найбільш часто передбачають АВР резервної лінії (рис.11.11, а) й автоматичного вмкання секційного вимикача СВ (рис. 11.11, б).

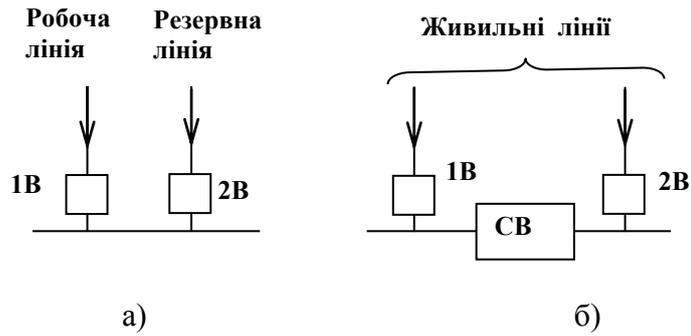


Рис. 11.11 Схеми АВР

Другій схемі віддається перевага в системах електропостачання підприємств, оскільки при стійкому пошкодженні на шинах із ладу виходить не вся установка, а тільки її частина. Перевага першої схеми (рис. 11.11, а) полягає в тому, що вона певною мірою простіша. Її застосовують при невеликих протяжностях ліній живлення, а також для автоматичного вмикання двигунів відповідальних агрегатів. У всіх випадках робота АВР починається при зникненні напруги на основній лінії живлення, при дії реле напруги, підключених до вторинних обмоток трансформаторів напруги.

Оскільки пристрій АВР вмикає резервне джерело живлення (або обладнання) при пошкодженні основного, ефективність його не залежить від стійкості пошкодження, а успішність значно перевищує кількість успішних АПВ. За даними статистики, успішність дії пристроїв АВР в енергосистемах становить 90...95 %; Неуспішним АВР може бути лише при стійких коротких замиканнях на шинах підстанції або в резервних лініях. Щоб уникнути вмикання резервної напруги живлення на стійке коротке замикання основного джерела, пристрій АВР спрацьовує лише після повного вимикання основного (робочого) джерела від резервного об'єкта.

## **ТЕМА 12: ПЕРСПЕКТИВИ РОЗВИТКУ ЕЛЕКТРОЕНЕРГЕТИКИ В УКРАЇНІ**

Електрична енергія широко використовується людиною близько 200 років, проте її споживання у кількісному вимірі і різноманітним застосуванням значно переважає всі інші види енергії. За кількістю споживаної електроенергії можна оцінити стан розвитку того чи іншого району, області, держави в плані промислового, соціального, екологічного і культурного розвитку.

Вироблення електроенергії в Україні здійснюється переважно завдяки використанню паливних ресурсів, таких як вугілля, нафтопродукти, природний газ, а також енергії атомного ядра урану. Переважну частину палива, яке швидкими темпами вичерпується із надр Землі, а отже й дорожчає, Україна імпортує. Тому останнім часом перед людством у цілому і перед нашою державою зокрема виникла проблема використання відновлювальних джерел енергії – води, вітру, Сонця, геотермальних джерел, припливів і відпливів тощо.

Дефіцит паливних ресурсів, експлуатація застарілого обладнання в Україні вимагають від держави розробки певних економічних, наукових та організаційних заходів з метою підтримання галузі на рівні розвинених країн. Основу електроенергетики на сьогодні в Україні складають теплові та атомні електростанції.

### **12.1 Розвиток теплової енергетики**

Що стосується теплоенергетики, то її основою є стаціонарні паротурбінні теплові електростанції, у яких енергія, що виділяється при згорянні палива, перетворюється в електричну. Найпоширеніші в наш час конденсаційні парові електростанції. Водночас важливе місце відводиться теплофікаційним електростанціям (ТЕЦ), на яких добуто тепло використовується як для виробництва електроенергії, так і для технологічних потреб, обігріву приміщень та житла.

Найбільшою серед них в Україні є Київська ТЕЦ-5т, потужність енергоблоків якої складає 700 тис. кВт. На ній 20% тепла, яке утворюється від згорання палива, перетворюється в електричну енергію, а 60% передається для технологічних і побутових потреб. Таке комбіноване використання енергії корисних копалин є одним з ефективних методів підвищення економічності теплових електростанцій.

Три п'ятих електроенергії, яка виробляється в Україні, припадає на ТЕС. Теплоелектростанції можна будувати близько до споживачів і розміщувати рівномірно по всій території країни. Переваги ТЕЦ і в тому, що вони працюють практично на всіх видах палива: вугіллі, сланцях, рідкому пальному, природному газі.

ККД теплових електростанцій різного типу коливається від 35-40% до 52-58%. Одним із шляхів підвищення ККД теплоелектростанцій є

зменшення затрат. Як відомо, найбільше тепла втрачається в конденсаторі турбіни. Близько 60% тепла, яке міститься в перегрітій парі не перетворюється в енергію обертання ротора турбіни, а викидається у вигляді тепла при температурі 30-35°C. Збільшення ККД можна здійснити за рахунок підвищення параметрів пари, яка подається на паротурбінні установки.

Національною енергетичною програмою передбачено нарощування виробництва електроенергії за рахунок теплових станцій, що працюють на природному газі із застосуванням парогазових установок, ККД яких вищий на 11- 13%, ніж у звичайних.

Україна має значні ресурси **геотермальної енергії** - енергії глибинного тепла Землі. Крім Криму і Карпатського регіону, промислове використання геотермальних джерел можливе у Чернівецькій, Харківській, Луганській і Полтавській областях. Геотермальні джерела за підрахунками фахівців на першому етапі виконання Національної енергетичної програми забезпечать потужності 1,5-2 ГВт.

### **12.2 Розвиток атомної енергетики**

Близько половини виробленої електроенергії в Україні припадає на атомні електростанції, які працюють на ядерному паливі. Перший у світі ядерний реактор, в якому здійснювалась керована ланцюгова реакція поділу ядер урану з виділенням величезної кількості теплової енергії, був запущений у 1942 році в США. Через 4 роки такий реактор був і в колишньому Радянському Союзі. На його базі в м. Обнінську у 1954 р. стала до ладу перша в світі атомна енергетична станція (АЕС). Пізніше, у червні 1970 р. було розпочато будівництво Чорнобильської АЕС, перший блок її запущено в дію 1977 року: услід за нею в грудні 1980 р. була введена в дію Рівненська АЕС; у 1982 р. стала до ладу Південно-Українська АЕС; у 1980 р. розпочалось будівництво Хмельницької АЕС - вона вступила в дію у 1986 р. Нормативний строк будівництва енергетичного блоку потужністю 1000 МВт складав 5-7 років.

В Україні працюють ядерні реактори на повільних нейтронах, ядерним паливом для яких є уран-235. Потужності основних нині діючих в Україні АЕС: Запорізька – 1000-5000 МВт (5 енергоблоків); Південно-Українська – 1000-3000 МВт (3 енергоблоки); Хмельницька 1000-2000 МВт (2 енергоблоки); Чорнобильська – закрита.

Атомна електростанція в основному складається з тих самих елементів, що й звичайна теплова, відрізняється вона лише використанням паливом, конструкцією і принципом дії парогенератора. Зазначимо, що атомна електростанція, на відміну від теплової екологічно чистіша, вона позбавлена шкідливих викидів сірки, золи й вуглекислого газу.

За існуючою технологією для кожного енергоблоку АЕС передбачений басейн витримки, де відпрацьовані ТВЕЛі (тепловидільний

елемент (ТВЕЛ) — головний конструктивний елемент активної зони ядерного реактора, в якому знаходиться ядерне паливо) повинні зберігатись не менше трьох років. Протягом цього терміну вони втрачають близько 80% радіоактивності і залишкового тепла. Потім це паливо відправляється на переробку або ж на довготривале зберігання.

Україна до останнього часу не мала достатнього досвіду поховання радіоактивних відходів, надійних проектів і технологій запинки АЕС. Національна енергетична програма передбачає, розробку і створення технологій виготовлених ТВЕЛів і конструювання та монтажу парогенераторів, створення сховищ для зберігання відпрацьованого ядерного палива в районі бувшої Чорнобильської АЕС.

В оточенні атомних електростанцій особливе хвилювання в людей викликає радіоактивне випромінювання, яке найбільш специфічне для атомної енергетики. У багатьох в пам'яті жахи катастрофи на Чорнобильській АЕС. Ця аварія підкреслює необхідність надійної експлуатації ядерних реакторів і поліпшення їх конструкцій. Для роботи на АЕС потрібний висококваліфікований персонал. При його підготовці варто аналізувати можливі види потенціальних аварій і засоби до їх локалізації. З цією метою на Хмельницькій АЕС вступив у дію спеціальний тренажер, на якому імітуються всі можливі штатні і нештатні ситуації на енергоблоці.

### **12.3 Розвиток гідроенергетики**

Близько 6% виробленої в Україні електроенергії припадає на гідроелектростанції. На сучасних ГЕС використовують переважно три типи реактивних турбін: радіально-осьову, пропелерну і прямоточну. У всіх них енергія падаючої води за допомогою генераторів перетворюється в електричну.

Підрахунки показують, що для побудови гідроелектростанції необхідно вдвічі більше коштів, ніж для побудови теплової, і будівництво їх триває майже вдвічі довше. Однак гідроелектростанції мають свої переваги. Вироблена ними електроенергія значно дешевша. Після будівництва станція може працювати практично без участі людини, оскільки енергетичні перетворення на гідроелектростанціях простіші ніж на теплових, і їх роботу можна надійно автоматизувати.

Дніпро – третя за величиною ріка Європи. Її енергетичні ресурси величезні. Складні народногосподарські завдання були розв'язані після спорудження великопотужного гідроенергетичного каскаду із семи гідроелектростанцій: Київської, Канівської, Кременчуцької, Дніпродзержинської, Дніпровської, Каховської та Дністрянської.

Згідно з Національною енергетичною програмою, електроенергія ГЕС буде використовуватись як резерв для стабілізації енергосистеми в години пік і на випадок аварійної ситуації. Практично гідроресурси України задіяні повністю, хоча у верхній течії Дніпра можна збудувати ще кілька

середніх за потужністю гідроелектростанцій. Місцеве значення матимуть і ГЕС, збудовані на гірських потоках Карпат і Кримських гір.

Одним з можливих варіантів використання енергії води – використання **припливів і відпливів**. Хвилі на воді піднімаються силою тяжіння. З 0,77 м теоретичної величини припливу 0,53 м спричинюється впливом Місяця і 0,24 м - впливом Сонця. Проте для використання енергії припливів і відпливів потрібні розробки принципово нових методів і засобів реалізації проблеми.

Останнім часом вчені працюють над створенням хвильових електростанцій для дрейфуючих в океанах міст з населенням у сотні тисяч осіб (ковчеги на випадок танення льодовиків) з автономним енергетичним забезпеченням за рахунок енергії припливів і відпливів та хвильових електростанцій.

#### **12.4 Перспективи розвитку сонячної енергетики**

Енергія Сонця належить до практично невичерпних джерел енергії, яка постійно відновлюється. Тривалість життя Сонця становить близько 10 млрд. років. Маючи вік близько 4,5 млрд. років, воно перебуває майже в середині свого існування.

Щорічно земна поверхня одержує у вигляді сонячної радіації енергію  $3,9 \cdot 10^{24}$  Дж. енергії. Сьогодні річна потреба енергії на Землі становить близько  $3,3 \cdot 10^{20}$  Дж. Таку кількість енергії можна добути при використанні лише 0,1% сонячного випромінювання, що падає на земну поверхню, навіть за умови, що ККД дорівнював би 10%.

Але густина сонячної енергії дуже мала, так на поверхні Землі вона становить 150-250 Вт на квадратний метр. Для порівняння зазначимо, що для чайника, який нагрівається на газовій плиті підводиться енергія густиною 30-40 кВт/м<sup>2</sup>; тому розсіяне сонячне світло треба збирати в потужні пучки, до того ж потрібне дороге обладнання, щоб з сонячного тепла добути інші види енергії.

Науку про використання енергії Сонця називають геліотехнікою. У практичному плані реалізація проблеми зводиться до побудови малопотужних сонячних нагрівників. Концентрації сонячного випромінювання досягають за допомогою різних систем з використанням дзеркал.

Серед сонячних нагрівників найпоширеніші такі, що працюють за принципом "гарячого ящика". Установка являє собою дерев'яний ящик з скляною кришкою. На дні ящика в шарі піску лежить трубчатий змієвик, по якому протікає вода. Нагрітий до високої температури енергією сонячного випромінювання пісок віддає тепло змієвику з водою і нагріває її до температури, на 40-50°C вищої від температури навколишнього середовища. Скляна кришка перешкоджає теплообміну з навколишнім середовищем (затримує тепло), тому вся сонячна енергія, що потрапляє на

поверхню нагрівника, витрачається на нагрівання піску і змішувача з водою.

За таким принципом оранжерейного ефекту працюють нагрівники в південних районах, обслуговуючи бані, сушилки для фруктів, теплиці, установки для опріснення води тощо. Використання подібних сонячних колекторів у приватному секторі та невеликих підприємствах дадуть можливість отримати потужності 200- 300 МВт.

Для забезпечення високих температур використовують печі, які концентрують сонячну енергію. Головна частина такої печі - параболічне дзеркало, що збирає в своєму фокусі падаючі на нього промені. Печі дають можливість досягти температури 3500-3700°C, тобто температури плавлення майже всіх тугоплавких металів, включаючи платину. У виплавлених таким чином металах вдається позбутися домішок і забруднень, які є неминучими при використанні інших методів.

Найбільш розроблений на сьогодні традиційний спосіб добування електричної енергії за рахунок сонячної – через нагрівання теплоносія. Останній, наприклад вода, використовується в паровому циклі «котел - пара - турбіна – генератор». Сонячна енергія концентрується дзеркалами, у фокусі яких розміщений котел з теплоносієм.

За допомогою електричної енергії, отриманої від сонячної електростанції, електролізом води можна отримувати водень – хімічно чисте паливо. ККД серійних перетворювачів сонячної енергії в електричну становить 12%.

Останнім часом розробляються різного роду ефективні сонячні колектори, які використовуються для нагрівання води і опалення приміщень. Принцип їх роботи полягає у циркуляції води через теплообмінник, де вона нагрівається сонячним випромінюванням, і подачі нагрітої води в систему опалення чи гарячого водопостачання.

Виділяють плоскі і вакуумні сонячні колектори. Плоский колектор складається з теплоізолюваної панелі в якій знаходиться пластина поглинач. Поглинач виготовляється з теплопровідного металу (найчастіше з міді або алюмінію). Пластина поглинача обробляється спеціальним покриттям, яке має високу поглинаючу здатність у видимій області спектру і низьким коефіцієнтом випромінювання у інфрачервоному спектрі.

Для зменшення втрат тепла передню частину колектора покривають склом, а задню і бокові – теплоізолюючим матеріалом. Конструкція плоского колектора показана на рис. 12.1 .



Рис. 12.1 Плаский сонячний колектор

Спрощеним варіантом плаского колектора є пластиковий колектор, абсорбер якого виготовляється з пластику. Як правило він не ізолюється, тому використовується лише в літню пору в основному для підігріву басейнів.

Вакуумні колектори складаються з вакуумованих трубок, в кожній з яких знаходиться мідний абсорбер з титановим покриттям, що гарантує високий рівень поглинання сонячної енергії, а вакуумований простір дозволяє звести до мінімуму втрати на теплопровідність. В абсорбері встановлюється коаксіальний (трубка в трубці) теплообмінник, через який теплоносій отримує тепло від абсорбера. Конструкція вакуумного колектора показана на рис. 12.2.



Рис. 12.2 Вакуумний сонячний колектор

При використанні в якості теплоносія води плаский і вакуумний колектори можливо використовувати лише при температурах вище нуля. Для усунення цього обмеження розроблені вакуумні колектори з тепловою трубкою. Вони складаються з двох скляних або металічних трубок, які вставлені одна в одну і розділені вакуумом. Зовнішня трубка має таку ж

конструкцію як у звичайного вакуумного колектора і виконує функцію абсорбера. Всередині абсорбера розміщується теплова трубка з рідиною, з низькою температурою кипіння. Під дією теплоти абсорбера рідина випаровується і піднімається у верхню частину трубки, яка з'єднана з теплообмінником по якому протікає вода. В теплообміннику газу рідини конденсуються і віддають енергію воді. Цей тип колектора може працювати при температурі  $-30^{\circ}\text{C}$ , якщо теплова трубка виготовлена зі скла і при  $-45^{\circ}\text{C}$ , якщо вона металева.

ККД сонячного колектора виражає відношення корисної теплової енергії, відведеної від абсорбера, до виділеної на ньому енергії сонячного випромінювання. Втрати енергії мають дві складові: оптичну і теплопровідну. В колекторах оптичні втрати виникають при відбиванні сонячного випромінювання від поверхні скла і абсорбера. Оптичний ККД  $\eta_{\text{ко}}$  є максимально можливим і досягається при нульовій різниці температур між абсорбером і навколишнім середовищем, коли втрати на теплопровідність відсутні. Зі збільшенням різниці температур  $\Delta T$  втрати на теплопровідність зростають майже лінійно. Оптичний ККД  $\eta_{\text{ко}}$  плоского колектора дещо більший ніж у вакуумного. Однак за рахунок менших теплових втрат вакуумні колектори мають більший сумарний ККД при великій різниці температур між абсорбером і навколишнім середовищем ( $30^{\circ}\text{C}$  і вище).

Крім описаних установок, спинимося ще на двох способах перетворення сонячної енергії в електричну. Один з них базується на використанні явища Т. Зеєбека. ККД такого термоелемента сягає до 7%. Потужність батареї термоелементів залежить від їх кількості та сонячної радіації. Перший сонячний термоелектрогенератор потужністю 40 Вт був сконструйований ще в 1955р.

Другий спосіб перетворення сонячної енергії в електричну базується на використанні фотоелектричного ефекту. Фотоелектричні напівпровідникові елементи застосовують сьогодні в різній побутовій техніці, яка не потребує великої кількості енергії: для живлення електронних годинників, мікрокалькуляторів, фотоекспонетрів тощо.

Напівпровідникові і фотоелектричні батареї виконують сьогодні важливі практичні завдання. Зокрема вони є джерелами живлення електричних приладів космічних апаратів. Кремнієві напівпровідникові фотоелектростанції використовувались на всіх супутниках Землі та космічних станціях.

Проблема побудови напівпровідникових геліоелектростанцій зводиться до розробки технологій і добування дешевих надчистих кремнію і германію й інших хімічних матеріалів, властивості яких дають можливість отримувати значні фотоструми. В Україні діє багато сонячних електростанцій, встановлених останніми роками у Вінницькій, Закарпатській, Хмельницькій, Львівській та інших областях.

## **12.5. Перспективи використання енергії вітру**

Енергія п'ятого океану – так часто називають повітряний океан – величезна. За підрахунками вчених вітер може дати в тисячі разів більше енергії, ніж людство отримує її за рахунок вугілля, що спалюється на всіх теплостанціях світу.

Вітрова електростанція являє собою комплекс технічних пристроїв, що використовується для перетворення кінетичної енергії потоку вітру в механічну енергію обертання ротора генератора. Вітроелектрична установка складається з однієї або декількох вітроелектричних станцій, акумулюючого або резервного пристрою та систем автоматичного управління і регулювання режимів роботи ВЕУ.

Типовим представником вітросилових установок, які без змін пройшли крізь віки, є голландський млин. Їх верхню частину можна повертати за вітром на шарнірах. Вони мають, як правило, чотири дерев'яних або обтягнутих парусиною, крила довжиною до 15 м і здатні робити від 6 до 12 обертів за хвилину залежно від сили вітру. Потужність таких вітряків сягає до 40 кВт, а ККД – до 10%.

Наукові розрахунки вітрових установок викладені в працях М.Є.Жуковського. Він показав, що лопаті парової і гідравлічної турбін підпорядковуються тим самим законам; вивів формули для розрахунку сил, що діють на згадані елементи механізмів. Ці праці сприяли побудові швидкохідних сучасних вітродвигунів.

Швидкохідний вітродвигун Ц А Г І-Д-30 мав потужність 100 кВт., його було споруджено ще в 1931 р. у Криму під керівництвом інженерів Н.В.Красовського та В.Р.Секторова. Вироблена ним електроенергія подавалась у мережу Севастопольської теплової електростанції.

Сьогодні в Україні діє близько 100 вітрових електростанцій, сумарна потужність яких становить близько 500 МВт. Для промислового використання вітроенергетичних установок найсприятливіші узбережжя Чорного та Азовського морів, гористі райони Кримського півострова (особливо північно-східне узбережжя) і Карпат, Одеська, Херсонська, Запорізька, Донецька, Луганська і Миколаївська області.

У них забезпечується істотна передумова використання вітру – його середня швидкість має бути не меншою 4 м/с. Хоча практично всі регіони України відповідають цим вимогам, проте виробництво електроенергії вітроагрегатами недостатнє для забезпечення густонаселених регіонів.

Вітроенергетика – одна із галузей економіки, яка розвивається в світі найдинамічніше. Понад 75% вітроустановок дають у Каліфорнії (США), з решти 25% – більша частина в Данії (1500 вітроустановок). В Україні на різних стадіях готовності працюють Аджигольська, Асканіївська, Актишська, Донзулавська і Чорноморська вітроелектростанції. Розроблено проектну документацію Західно-Сивашської вітроелектростанції

потужністю 10 МВт, Якимівської (Запорізька обл.) – 15 МВт, Володимировської (Херсонської обл.) – 11 МВт. З 1993 року на виробничому об'єднанні "Південмаш" налагоджено виробництво вітроагрегатів потужністю 20,45 і 103 кВт.

Перспективними на Україні є офшорні ВЕС - станції збудовані на узбережжях морських екваторій 40 та на мілководдях, зокрема Азовського моря і озера Сиваш. За прогнозами міжнародного енергетичного Конгресу в 2020 р. частка нетрадиційних джерел енергії сягатиме в світі від 1,5 до 2,7%, тепер вона становить лише 0,7%.

### **12.6. Перспективи енергетики на основі біогазу**

Біогаз – газ, що одержують водневим або метановим бродінням біомаси. Метанове розкладання біомаси відбувається під впливом трьох видів бактерій. У ланцюжку живлення наступні бактерії харчуються продуктами життєдіяльності попередніх.

Перший вид – бактерії гідролізни, другий – кислотоутворюючі, третій – метаноутворюючі. У виробництві біогазу беруть участь не тільки бактерії класу метаногенів, а всі три види. Одним з різновидів біогазу є біоводень, де кінцевим продуктом життєдіяльності бактерій є не метан, а водень.

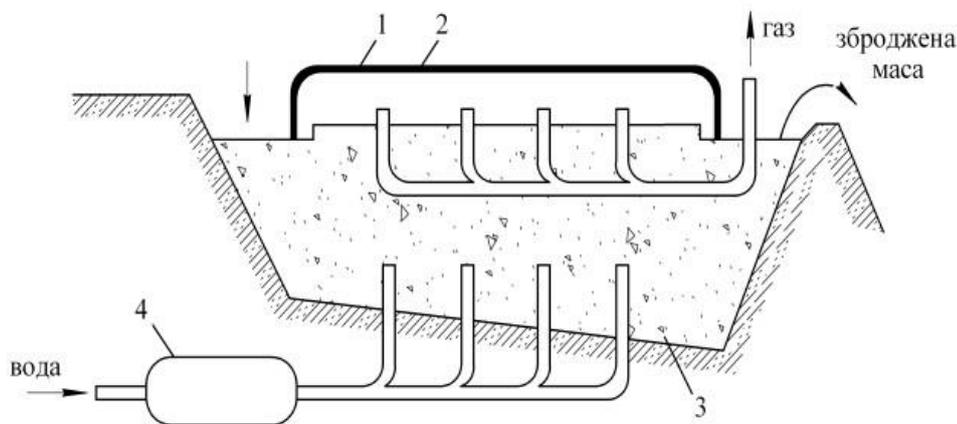


Рис 12.3 Траншейна біогазова установка:  
1 – еластичний збірник біогазу; 2 – плити із пінопласту;  
3 – бродильна камера; 4 – нагрівач (бойлер)

В процесі бродіння в камері відбувається виділення біогазу, який містить 40-70% метану, 30-60% вуглекислого газу, біля 1% сірководню і невелику кількість азоту та водню. Об'ємна теплота згорання біогазу складає біля 22 МДж.

Після очистки біогазу від CO<sub>2</sub> виходить біометан. Біометан - повний аналог природного газу, відмінність тільки в походженні. Сировина для отримання біогазу: гній, пташиний послід, післяспиртова барда, відходи пивного виробництва, буряковий жом, фекальні осади, відходи рибного і

забійного цеху (кров, жир, кишки), трава, побутові відходи, відходи молокозаводів – солоні і солодка молочна сироватка, відходи виробництва біодизеля – технічний гліцерин від виробництва біодизеля з ріпаку, відходи від виробництва соків – жом фруктовий, ягідний, овочевий, виноградна вижимка, водорості, відходи виробництва крохмалю і патоки – мезга і сироп, відходи переробки картоплі, виробництва чіпсів – шкурки, гнилі бульби, кавова пульпа.

Крім відходів біогаз можна виробляти зі спеціально вирощених енергетичних культур, наприклад, з силосної кукурудзи або сільфія, а також водоростей. Вихід газу може сягати до 300 м<sup>3</sup> з 1 тонни.

Вихід біогазу залежить від вмісту сухої речовини і виду використовуваної сировини. З тонни гною великої рогатої худоби виходить 50-65 м<sup>3</sup> біогазу з вмістом метану 60%, 150-500 м<sup>3</sup> біогазу з різних видів рослин з вмістом метану до 70%. Максимальна кількість біогазу – це 1300 м<sup>3</sup> з вмістом метану до 87%– можна отримати з жиру.

Розрізняють теоретичний (фізично можливий) і технічно-реалізований вихід газу. В 1950-70-х роках технічно можливий вихід газу становив усього 20-30% від теоретичного. Сьогодні застосування ензимів, бустерів для штучної деградації сировини (наприклад, ультразвукових або рідинних кавітаторів) та інших пристосувань дозволяє збільшувати вихід біогазу на звичайній установці з 60% до 95%.

## ТЕМА 13: ОСНОВИ ЕЛЕКТРОНІКИ

### 13.1 Напівпровідникові переходи й контакти

Із курсу фізики відомо, що усі речовини утворені атомами, які складаються із додатно заряджених ядер і від'ємно заряджених електронів, які обертаються навколо них. Ядра складаються з електрично нейтральних нейтронів і додатно заряджених протонів. Кількість протонів в ядрі визначають його заряд. Число електронів, що обертаються навколо ядра у нормальному стані, утворюють електронну оболонку атома, в результаті чого атом є електронейтральним.

Електрони обертаються навколо ядер по орбітах і згруповані у відповідні шари, що мають строго визначену енергію. Електрони найбільш віддаленої орбіти мають найбільшу енергію і називаються валентними. Під впливом енергії тепла, світла, радіації чи інших зовнішніх факторів валентні електрони можуть одержати енергію і перейти на більш віддалену від ядра орбіту тобто стати збудженими. В разі одержання електроном енергії, що перевищує роботу виходу, він покидає поверхню речовини.

В кристалах виникає взаємодія між сусідніми атомами, що приводить до розщеплення енергетичних рівнів електронів і утворення енергетичних зон.

Сукупність енергетичних рівнів найбільш віддалених валентних електронів утворюють валентну зону. Дозволені але не зайняті електронами енергетичні рівні називаються зоною провідності або вільною зоною. Між валентною зоною і зоною провідності може знаходитись заборонена зона. Якщо в зону провідності потрапляють збуджені електрони валентної зони, то це буде забезпечувати провідність речовини. Зонна структура речовин пояснює різницю між провідниками, напівпровідниками і діелектриками.

На рис. 13.1 показані енергетичні зони для цих речовин. Характерною особливістю провідників є те, що у них валентна зона (ВЗ) і зона провідності (ЗП) перекриваються (рис. 13.1, а). Валентні електрони легко переходять у вільну зону (зону провідності), що і забезпечує їх хорошу провідність уже при температурі абсолютного нуля ( $-273^0\text{ C}$ ). Діелектрики і напівпровідники відрізняються від провідників присутністю у них між ВЗ і ЗП ще забороненої зони (ЗЗ), у якій не можуть знаходитись електрони. З точки зору зонної теорії діелектрики і напівпровідники відрізняються поміж собою шириною ЗЗ ( $W_{33}$ ).

До діелектриків (рис. 13.1, б) відносять матеріали, у яких  $W_{33} > 6\text{ eV}$  (електрон – вольт). Напівпровідникові матеріали, що знаходять технічне використання, мають  $W_{33} = (0,1 \div 3)\text{ eV}$  (рис. 13.1, в). Кремній має  $W_{33(Si)} = 1,12\text{ eV}$ , а германій –  $W_{33(Ge)} = 0,72\text{ eV}$ .

Як відзначалось вище енергія електронів залежить від температури, а тому при температурі абсолютного нуля ( $-2730\text{ C}$ ) їх енергія менше

ширини забороненої зони, тобто, напівпровідники при таких умовах не проводять струм. З підвищенням температури провідність напівпровідників зростає через підвищення енергії валентних електронів до величини, більшої  $W_{зз}$ .

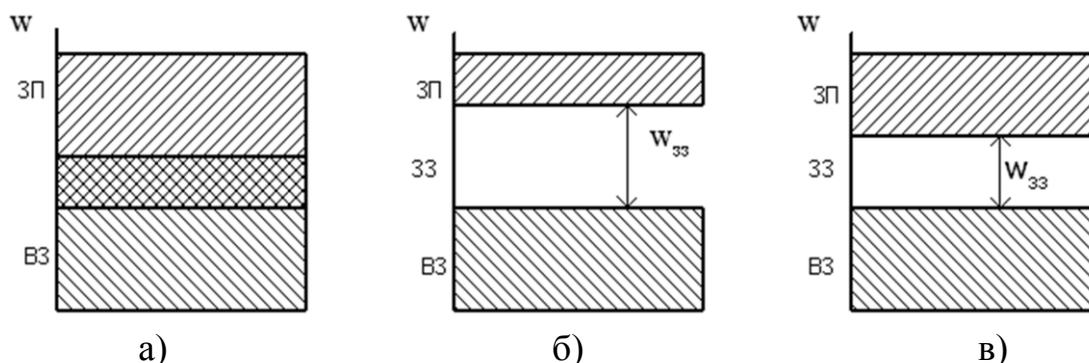


Рис. 13.1 Енергетичні зони провідників, діелектриків і напівпровідників

Для виготовлення напівпровідникових приладів використовуються як прості (германій, кремній, селен) так і складні (арсенід галію, фосфід галію) матеріали.

Розглянемо структуру напівпровідників на прикладі кремнію (Si), що є елементом IV групи таблиці Менделєєва. Кристалічні ґратки кремнію представляють правильний тетраедр, у вузлах якого розміщені атоми на відстані  $\approx 2,4 \cdot 10^{-10}$  см один від іншого. Зв'язок між атомами здійснюється за допомогою ковалентних (подвійних) зв'язків 4-х валентних електронів (рис. 13.2, а). При температурі абсолютного нуля в напівпровідникові вільні електрони відсутні і, якщо помістити такий напівпровідник в електричне поле, то буде відсутній і електричний струм.

Внаслідок дії температури чи інших чинників енергія деяких валентних електронів зростає. В наслідок цього вони розривають ковалентні зв'язки і стають вільними. Атом, якого залишив електрон, перетворюється в позитивно заряджений іон. Цей позитивний заряд умовно приписується розірваному ковалентному зв'язку, який називають діркою (зображена кружком, рис. 13.2, б).

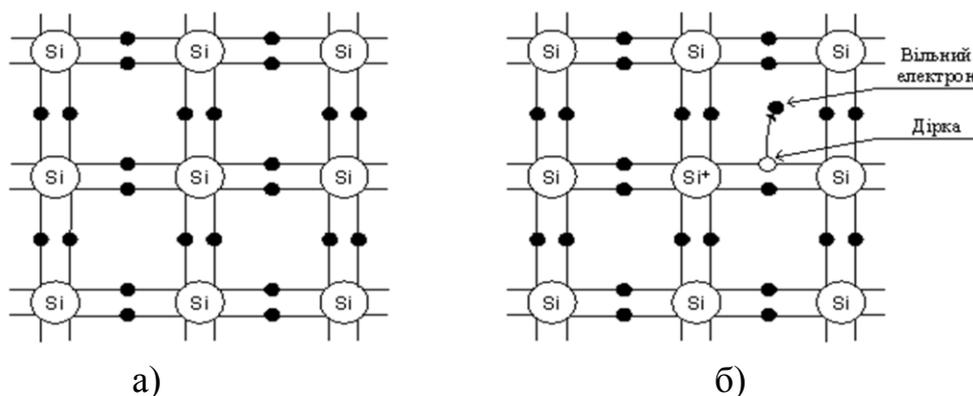


Рис. 13.2 Кристалічні решітки кремнію

Якщо помістити такий напівпровідник в електричне поле, то виникне направлений рух електронів і дірок, тобто електричний струм. Така провідність хімічно чистих напівпровідників називається власною. Вона забезпечується в однаковій мірі дірками та електронами.

**Домішкові напівпровідники.** Процес внесення домішок до вихідного напівпровідника називають легуванням. В якості домішок використовують елементи III групи (In – індій, Ga – галій, B – бор) або V групи (Sb – сурма, As – миш'як, P – фосфор) таблиці Менделєєва. Елементи III групи називають акцепторними, а V – донорними домішками. Якщо деякі атоми кремнію замінити акцепторною домішкою (наприклад, 3-х валентним індієм), то з одним із атомів кремнію атом індію буде зв'язаний тільки за рахунок атому кремнію, тому що In має тільки три валентних електронів, а сусідів в кристалі у нього чотири (рис. 13.3, а).

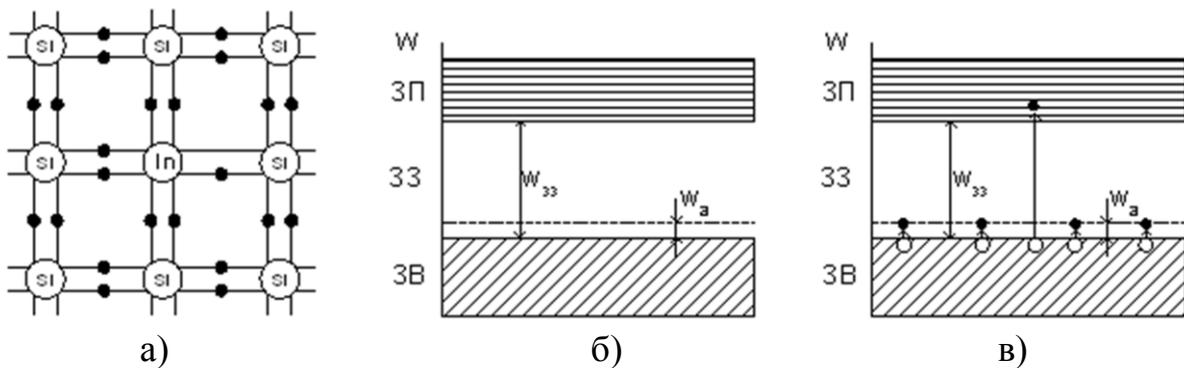


Рис. 13.3 Домішкові напівпровідники *p*- типу

В цьому випадку енергетичні рівні валентних електронів індію будуть знаходитись у забороненій зоні кремнію поблизу його валентної зони (рис. 13.3, б). Енергетичні рівні індію не будуть перетворюватись в енергетичну зону через значну віддаленість їх поміж собою (один атом індію припадає на  $10^6 \div 10^7$  атомів кремнію). Між енергетичним рівнем індію і валентною зоною кремнію має місце заборонена зона  $w_a \approx 0,1$  eV.

Енергетичні рівні індію при температурі абсолютного нуля будуть вільні від електронів. В разі підвищення температури енергія валентних електронів кремнію зростає. При її величині більшої  $w_a$  збуджені валентні електрони кремнію переходять на валентні рівні індію, а атоми кремнію перетворюються в позитивно заряджені іони, тобто у валентній зоні кремнію з'являться дірки. При більш високих температурах розриваються ковалентні зв'язки кремнію, що спричиняє появі додатково однакової кількості дірок у валентній зоні і електронів у зоні провідності кремнію.

Таким чином, у напівпровідника з акцепторною домішкою (рис. 13.3,в) кількість дірок ( $p_p$ ) буде більшою ніж електронів ( $n_p$ ), що забезпечує в основному його діркову провідність. Дірки при цьому називаються основними носіями а електрони – неосновними.

Напівпровідник з дірковою провідністю називають напівпровідником  $p$ -типу.

Якщо до кремнію ввести атоми п'ятивалентного елементу (наприклад, As – миш'яку), то чотири його валентних електронів будуть взаємодіяти з сусідніми атомами кремнію, а п'ятий – буде обертатися навколо атому миш'яку (рис. 13.4, а).

Валентні електрони п'ятивалентної домішки утворюють у верхній частині забороненої зони кремнію енергетичний рівень, який утворює із зоною провідності кремнію заборонену зону  $w_a \approx 0,1$  еВ (рис. 13.4, б). Такий зв'язок значно слабкіший ніж ковалентний, тому уже при невеликих температурах цей зв'язок розривається і електрони донорної домішки (миш'яку) стають вільними тобто переходять у зону провідності кремнію.

При більш високих температурах валентні електрони кремнію, в разі збільшення їх енергії на величину  $>W_{33}$ , переходять у зону провідності, тобто у валентній зоні кремнію з'являються дірки, а у зоні провідності – така ж кількість електронів (рис. 13.4, в).

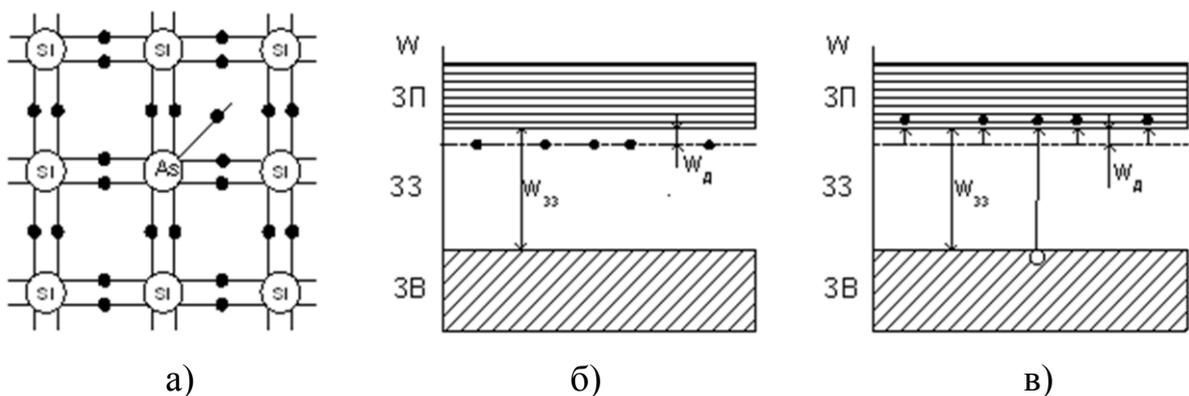


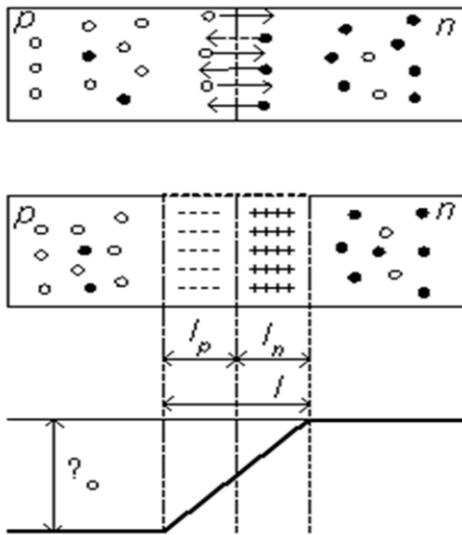
Рис. 13.4 Домішкові напівпровідники  $n$ -типу

Таким чином, у напівпровідників з донорними домішками кількість вільних електронів ( $n_n$ ) буде значно більше ніж дірок ( $p_n$ ) ( $n_n \gg p_n$ ), що зумовлює їх в основному електронну провідність. Електрони через це називаються основними носіями зарядів, а дірки – неосновними. Домішкові напівпровідники з переважно електронною провідністю називаються напівпровідниками  $n$ -типу.

**Явище  $p$ - $n$  переходу та його властивості.** Якщо два напівпровідника з різними типами провідності привести до контакту, то на границі їх розділу буде мати місце різниця концентрації вільних носіїв зарядів одного знаку (рис. 13.5), тобто  $p_p \gg p_n$  і  $n_n \gg n_p$ . За рахунок дифузії електрони з  $n$  області, де їх концентрація вища, будуть переміщуватись в область  $p$ , де їх концентрація нижча, рекомбінуючи там з дірками. Дірки  $p$  області, навпаки, будуть переходити в область  $n$ , рекомбінуючи там з електронами.

В результаті таких переміщень на границі поділу напівпровідників в  $n$  області залишаються позитивно заряджені іони (атоми п'ятивалентних домішок, що втратили електрон), а в області  $p$  – негативно заряджені іони

акцепторних домішок, які придбали електрони. Треба мати на увазі, що іони є нерухомі.



Таким чином, дифузія основних носіїв заряду приводить до створення приграничного шару  $l$  ( $p$ -переходу), одна сторона якого заряджена негативно ( $p$  - область), а інша – позитивно ( $n$ - область). Різниця потенціалів, створена цими зарядами називається контактною різницею потенціалів або потенціальним бар'єром  $U_K$  (рис. 13.5). Цей бар'єр спричиняє гальмівну дію для основних і пришвидшуючу – для неосновних носіїв зарядів.

Рис. 13.5 Явище  $p$ - $n$  переходу

Внутрішнє поле переходу забезпечує рівність потоків носіїв зарядів в обох напрямках, тобто рівність нулю сумарного струму через  $p$ - $n$  перехід в разі відсутності зовнішнього електричного поля. Електрони, що приходять до  $p$ - $n$  переходу з боку  $n$  області, відштовхуються від'ємними іонами, а дірки в області – позитивними іонами.

Таким чином,  $p$ - $n$  переходом будемо називати область на границі поділу двох напівпровідників з різними типами провідності, яка має відповідної ширини область збіднену рухомими носіями, володіє потенціальним бар'єром і значним внутрішнім опором. Якщо концентрація домішок в  $p$  і  $n$  областях різна, то  $p$ - $n$  перехід буде більш глибоко проникати в ту область, концентрація домішок в якій менше, тобто  $l_n \neq l_p$ .

Величина потенціального бар'єру  $U_K$  залежить від співвідношення концентрації носіїв зарядів одного знаку по обидві сторони переходу і визначається співвідношенням

$$U_K = \varphi_m \ln(p_p/p_n) = \varphi_m \ln(n_n/n_p),$$

де  $\varphi_m = KT/q$  – тепловий потенціал,  $K$  – стала Больцмана,  $T$  – температура в градусах Кельвіна,  $q$  – заряд електрона.

У випадку, коли  $T=293^0$  К (кімнатна температура),  $\varphi_m=0,026$  eВ. Потенціальний бар'єр  $U_K$  для кремнієвих напівпровідників має величину  $U_{K(Si)}=0,7 \div 0,8$  eВ, для германієвих –  $U_{K(Ge)}=0,3 \div 0,4$  eВ, а їх ширина – доли одиниці мкм.

**Вольт-амперна характеристика  $p$ - $n$  переходу.** Розглянемо вплив на  $p$ - $n$  перехід зовнішньої напруги. Якщо до  $p$ - $n$  переходу підвести зовнішню напругу, полярність якої направлена назустріч контактній різниці

потенціалів переходу (рис. 13.6, а), то дірки  $p$  – області, відштовхуючись від додатного потенціалу зовнішнього джерела, наближаються до  $p$ - $n$  переходу.

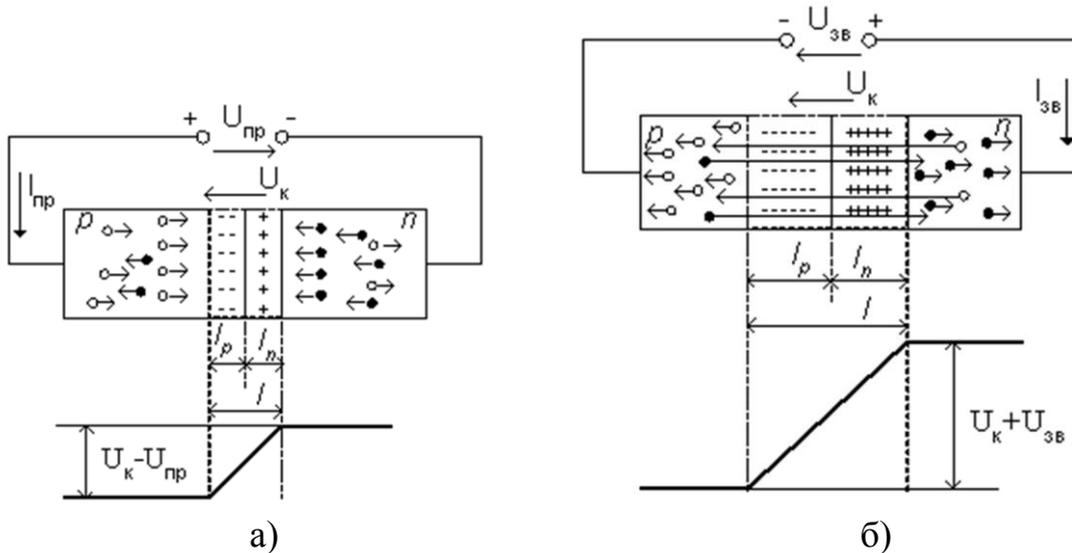


Рис. 13.6 Потенціальний бар'єр  $p$ - $n$  переходу

Це приводить до часткової рекомендації з негативними іонами акцепторної домішки і звуження  $p$ - $n$  переходу з боку  $p$  області. Аналогічно, електрони  $n$  області, зміщуючись під впливом негативного полюсу зовнішньої напруги до  $p$ - $n$  переходу, рекомбінують з додатними іонами донорної домішки звужують  $p$ - $n$  перехід з боку  $n$  області.

Потенціальний бар'єр  $p$ - $n$  переходу зменшується, що приводить збільшення дифузійних переміщень через нього основних носіїв зарядів. Через  $p$ - $n$  перехід та у зовнішньому колі виникає струм, який називається прямим струмом  $I_{пр}$   $p$ - $n$  переходу, а зовнішня напруга з розглянутою полярністю – прямою напругою  $U_{пр}$ . Якщо змінити полярність зовнішнього джерела напруги на протилежну (в цьому разі напругу будемо називати зворотною  $U_{зв}$ ), то основні носії зарядів (дірки  $p$  області і електрони  $n$  області) будуть притягуватись до відповідних полюсів зовнішнього джерела напруги (рис. 13.6, б). Це приведе до розширення  $p$ - $n$  переходу і збільшення його потенційного бар'єру на величину зовнішньої напруги.

Неосновні носії зарядів (електрони  $p$  області і дірки  $n$  області) будуть відштовхуватись від полюсів зовнішнього джерела напруги і зміщуватися до  $p$ - $n$  переходу. Поле  $p$ - $n$  переходу учиняє на неосновні носії зарядів притягувану дію, а тому вони цим полем (дрейфовим способом) будуть переміщуватись через перехід і зумовлювати через  $p$ - $n$  перехід і у зовнішньому колі струм, який називається зворотним струмом  $I_{зв}$ .

Таким чином, зворотний струм є струмом неосновних носіїв, які, як відомо, в основному виникають під дією температури. Тому зворотний струм ще називають тепловим.

Струм через  $p-n$  перехід визначається залежністю

$$I_{p-n} = I_0 \left( e^{\frac{\pm U_{\text{зп}}}{\varphi_T}} - 1 \right),$$

де  $I_0$  – зворотній струм насичення,

“+” – відповідає прямій зовнішній напрузі, а “-” – зворотній,

$\varphi_T$  – тепловий потенціал.

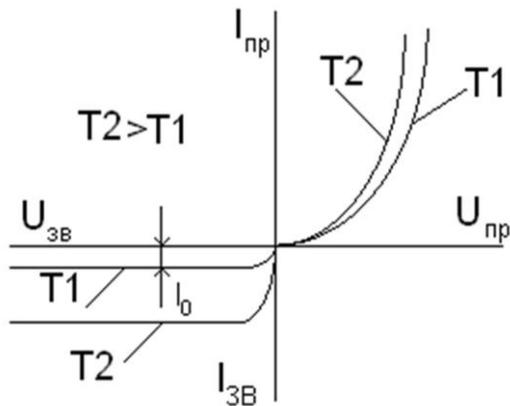


Рис. 13.7 ВАХ  $p-n$  переходу

На рис. 13.7 наведені вольт-амперні характеристики (ВАХ)  $p-n$  переходу, побудовані згідно вище поданого виразу для різних зовнішніх температур. Як відомо, прямий струм  $p-n$  переходу утворюється основними носіями, а зворотний – неосновними. Через те, що концентрація основних носіїв заряду на декілька порядків перевищує концентрацію неосновних носіїв, прямий струм на декілька порядків більший ніж зворотній. Цим зумовлюються вентильні властивості  $p-n$  переходу.

**Пробій  $p-n$  переходу.** Під пробієм  $p-n$  переходу розуміють явище різкого збільшення струму через перехід. В залежності від причин, які спричиняють зростання струму через  $p-n$  перехід розрізняють тепловий і електричний пробій. Електричний пробій буває лавинним і тунельним. Тепловий пробій зумовлюється збільшенням числа носіїв заряду в  $p-n$  переході за рахунок їх термогенерації, якщо відведення від переходу в навколишній простір в одиницю часу тепла буде меншим ніж його збільшення під дією струму (рис. 13.8, гілка 1). Це приводить до надмірного розігріву  $p-n$  переходу та його розплавлення. Цей пробій є незворотнім.

Лавинний пробій зумовлений лавинним розмноженням носіїв заряду у разі ударної іонізації атомів швидкими носіями. Сутність його у тому, що неосновні носії заряду у  $p-n$  переході під дією зворотної напруги прискорюються полем і при русі в ньому зіштовхуються з атомами кристалічних ґраток. При відповідній напруженості електричного поля носії заряду набувають енергію достатню для вибивання валентних електронів, тобто появи додаткових пар носіїв заряду – електронів і дірок. Ці заряди, в свою чергу, прискорюються і в разі зіткнення з атомами також утворюють додаткові носії заряду. Цей процес носить лавинний характер і може відбуватись у відносно широких  $p-n$  переходах. Збільшення струму переходу (збільшення рухомих носіїв заряду в  $p-n$  переході) приводить до

зменшення його опору, внаслідок чого напруга на  $p-n$  переході залишається практично незмінною (гілка 2 на рис. 13.8). Цей процес буде зворотнім, якщо зростання струму не спричинить накопиченню тепла в  $p-n$  переході. В разі порушення рівноваги між накопиченням тепла в  $p-n$  переході і його віддачею в навколишній простір настає тепловий пробій (пунктирна частина гілки 2).

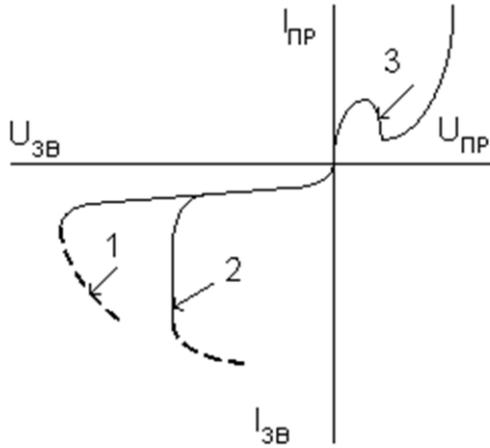


Рис. 13.8 Пробій  $p-n$  переходу

В основі тунельного пробію лежить явище безпосереднього відриву валентних електронів від атомів кристалічних ґраток під впливом великого електричного поля. Утворені таким чином додаткові дірки і електрони збільшують струм через  $p-n$  перехід. Тунельний пробій відбувається у вузьких  $p-n$  переходах, в яких при порівняно невеликій напрузі має місце висока напруженість електричного поля (рис. 13.8, гілка 3).

В кремнієвих напівпровідниках тунельний пробій настає при напруженості  $U_K \geq 4 \cdot 10^5$  В/см, а у германієвих – при  $U_K \geq 2 \cdot 10^5$  В/см. Тунельний пробій є зворотнім.

Зазвичай виділяють дві ємності  $p-n$  переходу: дифузійну і бар'єрну. Дифузійна ємність – це ємність прямо зміщеного  $p-n$  переходу

$$C_D = dQ_3 / dU = I \cdot \tau / \varphi_m,$$

де  $\varphi_m$  – час життя неосновних носіїв заряду.

Зворотно зміщений  $p-n$  перехід характеризується бар'єрною ємністю

$$C_B = (\xi_0 \cdot \xi_{HP} \cdot S_i / \ell) \sqrt{U_K / U_{зв}},$$

де  $\xi_0$  і  $\xi_{HP}$  – відповідно діелектрична проникність вакууму і напівпровідника,  $S_i$  – площа  $p-n$  переходу,  $\ell$  – ширина  $p-n$  переходу,  $U_K$  – висота потенційного бар'єру,  $U_{зв}$  – величина зворотної напруги.

### 13.2 Напівпровідникові прилади

**Напівпровідникові резистори** – це прилади з двома виводами, електричні властивості яких залежать від типу і міри легірування домішок в напівпровідникових матеріалах.

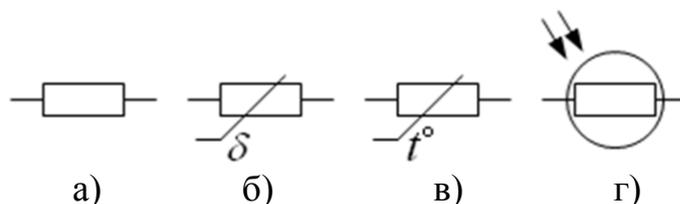


Рис. 13.9 Напівпровідникові резистори

Умовні позначення деяких з них подані на рис. 13.9: лінійні резистори (а), тензорезистори (б), терморезистори: (термістори і позістори – в) та фоторезистори (г). Питомий опір перших слабо залежать від зовнішніх факторів. Практично не залежить він і від зміни в широкому діапазоні напруги і струму. Тому вони використовуються в інтегральних мікросхемах.

Для інших напівпровідникових резисторів, навпаки, характерна сильна залежність їх питомого опору від різних зовнішніх факторів: механічних дій (б), зовнішньої температури (в) та світлового потоку (г). Тому вони використовуються в якості первинних перетворювачів неелектричних величин в електричні (датчиків).

**Напівпровідниковим діодом** називають напівпровідниковий прилад з одним *p-n* переходом і двома виводами.

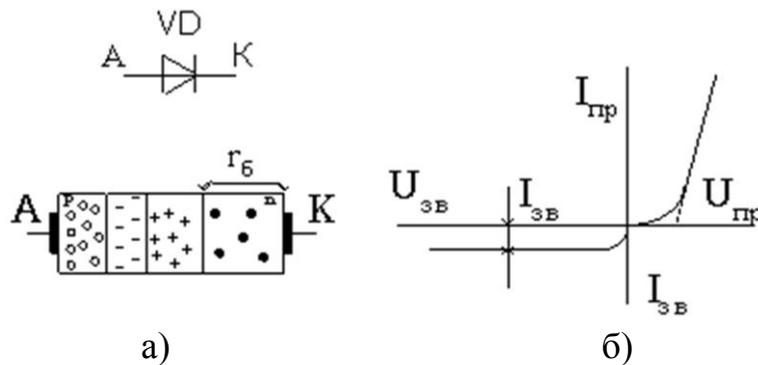


Рис. 13.10 Напівпровідниковий діод

За функціональним призначенням, принципом створення *p-n* переходу і використанню тих чи інших його властивостей діоди діляться на випрямні, імпульсні, високочастотні, стабілітрони, тунельні, варікапи, фотодіоди, світлодіоди та інші. Умовні позначення діодів на схемах приведені на рис. 13.10. Більшість діодів виконують на основі несиметричних *p-n* переходів. Вивід від *p*-області називають анодом, а від *n*-області – катодом. Розглянемо особливості побудови, характеристики і параметри найбільш вживаних діодів.

Випрямні діоди призначені для випрямлення змінного струму низької частоти. Електронно-дірковий перехід має площинну конструкцію, щоб пропускати великі струми і виконується на високоомному матеріалі (для одержання великих зворотних напруг). Вони виконуються на основі несиметричних *p-n* переходів. Область з малою концентрацією домішок, яка називається базою, має опір  $r_b = 1 \div 30 \text{ Ом}$ , яка з'єднана послідовно з *p-n* переходом (рис. 13.10, а). Збільшення прямої напруги знижує висоту потенціального бар'єру і він перестає впливати на величину прямого струму. Прямий струм через діод буде визначатися лише величиною  $r_b$  і лінійно залежати від прямої напруги  $U_{пр}$ , рис. 13.10, б. Цей відрізок ВАХ називається омичним і він є робочим.

Основними параметрами випрямних діодів є:

- $I_{пр\ ср}$  – максимальне значення прямого струму через діод;
- $I_{зв}$  – зворотній струм через діод при максимальній температурі;
- $U_{пр}$  – середнє значення падіння напруги на діоді при  $I_{пр\ ср}$ ;
- $U_{зв\ max}$  – максимально допустима зворотна напруга.

**Стабілітрон** – це напівпровідниковий діод, робота якого базується на використанні явища електричного пробоя  $p$ - $n$  переходу. У низьковольтних стабілітронів (з малим опором бази) найбільш можливий тунельний пробій, а у стабілітронів з високоомною базою пробій має лавинний характер. На рис. 13.11 наведено умовне зображення стабілітрона та його вольт–амперна характеристика.

Основні параметри стабілітронів:

- $U_{ст\ ном}$  – номінальна напруга стабілізації,
- $I_{ст\ min}$  – мінімальний струм стабілітрона,
- $I_{ст\ ном}$  – номінальний струм стабілітрона,
- $I_{ст\ max}$  – максимальний струм стабілітрона.

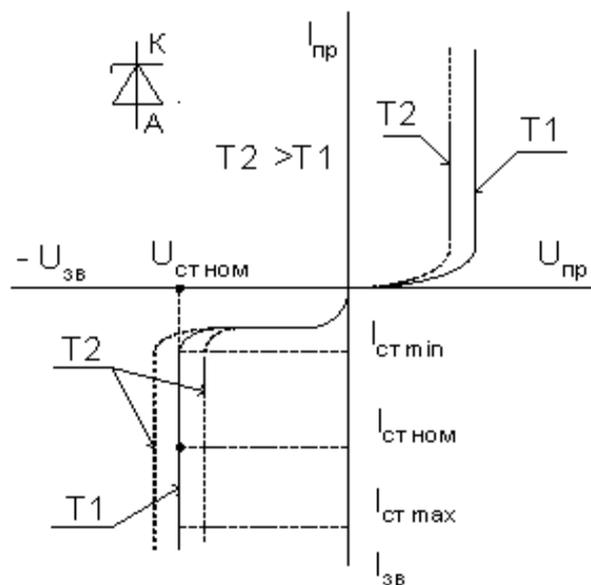
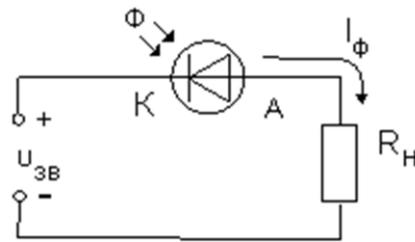


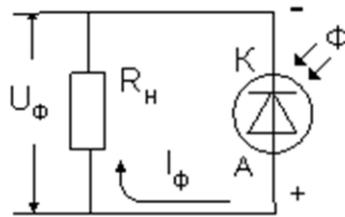
Рис. 13.11 Умовне зображення та ВАХ стабілітрона

**Фотодіоди** – це фотоелектричні прилади з одним  $p$ - $n$  переходом, параметри яких змінюються під дією квантів променевої енергії. Робота фотодіодів базується на явищі внутрішнього фотоефекту, сутність якого полягає в іонізації атомів кристалічних решіток напівпровідника чи домішок у ньому квантами променевої енергії. В разі іонізації атомів вихідного напівпровідника генеруються електронно-діркові пари, які підвищують провідність напівпровідника. Фотоефект виникає у разі перевищення енергії квантів світла ширини забороненої зони.

Фотодіод може працювати як із зовнішнім джерелом живлення (фотодіодний режим, або режим фотоперетворювача, рис. 13.12, а) так і без нього (режим фотогенератора, рис. 13.12, б).



а)



б)

Рис. 13.12. Фотодіод

**Світлодіоди** – це напівпровідникові прилади, які, за рахунок процесів, що відбуваються в *p-n* переході при протіканні через нього прямого струму, генерують оптичне випромінювання.

Випромінювання відбувається за рахунок рекомбінації носіїв заряду у високоомній області (базі). Неосновні носії заряду, які інжектуються із емітера, рекомбінують у базі з основними носіями заряду (переходять із зони провідності у валентну зону). При цьому випромінюється вивільнена енергія у вигляді квантів світла. Довжина хвилі  $\lambda$  випромінювального світла визначається енергією кванта, яка приблизно дорівнює ширині забороненої зони напівпровідника. Колір випромінювального світла залежить від довжини хвилі  $\lambda$ , що залежить від матеріалу напівпровідника.

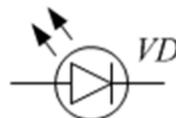


Рис. 13.13 Умовне позначення світлодіоду

Світлодіоди із арсеніду галію ( $\lambda=0,9\div 1,4$  мкм) випромінюють інфрачервоне випромінювання, з фосфіду галію ( $\lambda=0,7$  мкм) – червоне, з карбіду кремнію ( $\lambda=0,53$  мкм) – жовто-зелене випромінювання. Умовне зображення світлодіодів наведено на рис. 13.13.

Світлодіоди широко використовуються в якості індикаторних приладів та швидкодіючих джерел світла (їх перемикання відбувається за  $10^{-7} \div 10^{-9}$  с).

### 13.3 Транзистори та транзисторні підсилювачі

**Біполярний транзистор** – це тришарова структура  $n-p-n$  або  $p-n-p$  типу, яка має два  $p-n$  переходи і виводи від кожного шару. За послідовністю чергування типу шарів біполярні транзистори поділяються на  $p-n-p$  транзистори (рис. 13.14, а) та  $n-p-n$  транзистори (рис. 13.14, б). На цьому ж рисунку наведено умовні графічні зображення транзисторів на принципових електричних схемах та їх символічне позначення (VT).

Шар, що є джерелом носіїв заряду (електронів або дірок), називається емітером (Е), шар, який збирає заряди, називається колектором (К), а центральний шар – базою (Б). Назву біполярний транзистор має тому, що струм у нього створюється двома типами носіїв заряду: дірками і електронами.

У будові емітера, бази і колектора є свої особливості. Виготовляючи транзистор, концентрацію основних носіїв в емітері (введенням домішки)

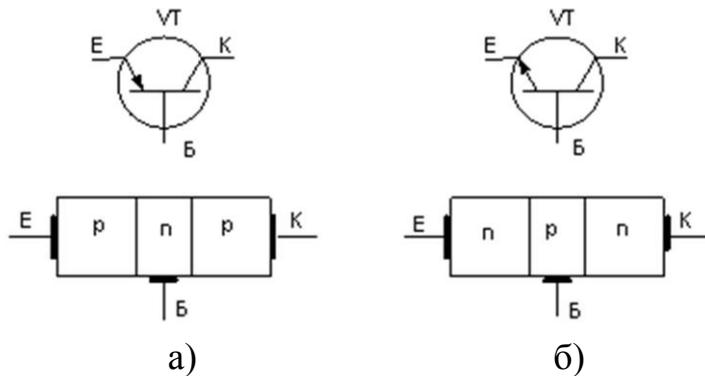


Рис. 13.14 Транзистори

роблять більшою ніж у колекторі, а концентрація основних носіїв у базі набагато менше ніж в колекторі, а тим більше ніж в емітері. Електронно-дірковий перехід між емітером і базою називається емітерним, а між базою і

колектором - колекторним. На умовному зображенні транзисторів емітер позначається стрілкою, яка завжди направлена від  $p$  області до  $n$  області.

Шари напівпровідників утворюють два  $p-n$  переходи – емітерний ( $P_e$ ) і колекторний ( $P_k$ ). Полярність зовнішніх джерел вибирають такими, щоб емітерний перехід був зміщений у прямому напрямку, а колекторний – у зворотному. Це приводить до зменшення потенціального бар'єру емітерного переходу і збільшення потенціального бар'єру колекторного переходу.

В результаті зменшення бар'єру емітерного переходу відбувається дифузія дірок з емітера в базу і електронів із бази в емітер. Електронною складовою дифузійного струму через емітерний перехід можна знехтувати, тому що  $p_p \gg n_n$ . Таким чином, струм емітера  $I_e$  утворюється за рахунок дифузійного переміщення дірок через емітерний перехід.

Під дією сил дифузії дірки рухаються через базу в напрямку колектора, частково рекомбінують з електронами бази, утворюючи базовий струм  $I_b$ . Оскільки база є тонкою і має малу концентрацію домішок, то основна частина дірок інжектованих емітером досягає колекторного переходу. Полем колекторного переходу, зміщеного у

зворотному напрямку дірки переміщуються у колекторний шар, створюючи колекторний струм  $I_k$ , тобто емітерний струм дорівнює сумі колекторного і базового струмів і їх зв'язок підпорядкований першому закону Кірхгофа  $I_e = I_k + I_b$ .

Відношення колекторного струму  $I_k$  транзистора до емітерного струму  $I_e$  називається коефіцієнтом передачі струму емітера  $\alpha = I_k / I_e$ .

Коефіцієнт  $\alpha$  менший одиниці і знаходиться в межах 0,9 ... 0,999.

Використовуючи наведені вирази, можна визначити зв'язки між колекторним і базовим, а також емітерним і базовим струмами:

$$I_k = [\alpha / (1 - \alpha)] I_b = \beta I_b ; I_e = [1 / (1 - \alpha)] I_b = (1 + \beta) I_b,$$

де  $\beta = \alpha / (1 - \alpha)$  – коефіцієнт підсилення транзистора за струмом.

Коефіцієнт підсилення струму бази транзисторів знаходиться у межах 50...200.

Присутність у базовій та колекторній областях власних неосновних носіїв заряду, для яких зворотно зміщений перехід є прискорюючим, приводить до появи додаткової некерованої складової струму колектора  $I_{k0}$ . Оскільки основною причиною появи неосновних носіїв заряду є температура, то цей струм ще називають тепловим.

У базовому колі тепловий струм направлений назустріч базовому струму, що зменшує його величину. Таким чином, загальний струм колектора складається з керованої ( $\beta I_b$ ) і некерованої (теплової  $I_{k0}$ ) складових

$$I_k = \beta I_b + I_{k0}.$$

Базовий струм з урахуванням теплової складової буде дорівнювати

$$I_b = I_e / (1 + \beta) - I_{k0} = I_k / \beta - I_{k0}.$$

У транзисторах  $n-p-n$  типу назви і функції усіх трьох шарів аналогічні розглянутого  $p-n-p$  транзистора, змінюється тільки тип носіїв заряду і полярність зовнішніх джерел живлення.

В залежності від того, який електрод транзистора є спільним для вхідного і вихідного кіл, транзистори у схемах можуть вмикатись трьома способами: за схемою зі спільною базою (СБ), за схемою зі спільним емітером (СЕ) та за схемою зі спільним колектором (СК), рис. 13.15. В подальшому будемо розглядати основну схему вмикання транзистора, схему зі спільним емітером.

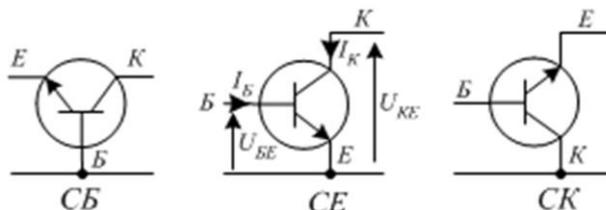


Рис. 13.15 Схеми вмикання транзисторів

Розглянемо статичні характеристики транзистора. Транзистор, ввімкнений за будь-якою схемою (СК, СБ, СЕ) характеризується такими фізичними величинами: вхідна і вихідна напруга та вхідний і вихідний струм. Взаємозв'язок між цими величинами визначають сімейство вхідних і вихідних статичних вольт-амперних характеристик транзистора.

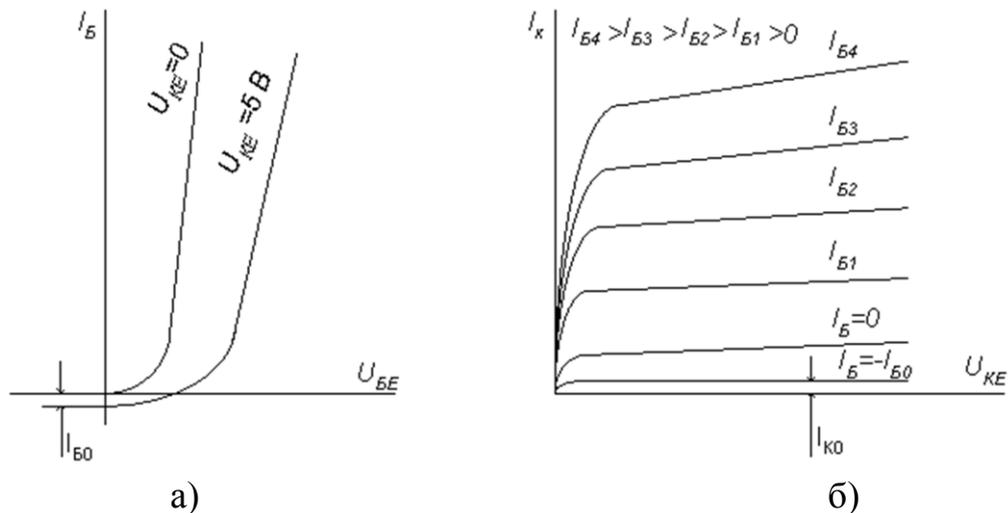


Рис. 13.16 Статичні ВАХ транзистора

Для схеми увімкнення зі спільним емітером вхідна характеристика транзистора – це залежність струму бази  $I_B$  від напруги база-емітер  $U_{BE}$ , за умови що напруга між колектором і емітером незмінна ( $U_{KE} = const$ ), тобто

$$I_B = f(U_{BE})|_{U_{KE}=const}$$

Сімейства вихідних характеристик транзистора – це залежність струму колектора  $I_K$  від напруги колектор-емітер  $U_{KE}$ , за умови що струм бази незмінний ( $I_B = const$ )

$$I_K = \varphi(U_{KE})|_{I_B=const}$$

Сімейства вхідних статичних характеристик наведені на рис. 13.16, а. В разі  $U_{KE}=0$  вхідна характеристика відповідає прямій гілці вольт-амперної характеристики двох паралельно з'єднаних  $p-n$  переходів (емітерного і колекторного). За  $U_{KE} \neq 0$  струм бази зменшується (характеристика зміщується вниз), що пояснюється зменшенням кількості рекомбінацій основних носіїв заряду в області бази.

Вихідні характеристики транзистора у схемі зі СЕ (рис. 13.16, б) починаються з початку координат. В разі  $U_{KE} = 0$  на колекторному переході є напруга  $U_{BE}$ , яка зміщує його в прямому напрямку. З області колектора інжектуються основні заряди у базу, що компенсує потік основних носіїв заряду з емітера в колектор, тобто взаємно врівноважується потік носіїв через колекторний перехід і  $I_K = 0$ .

При підвищенні напруги  $U_{KE}$  пряма напруга на колекторному переході спочатку знижується, зменшується інжекція основних носіїв заряду через колекторний перехід і відповідно збільшується колекторний струм. При

збільшенні  $U_{KE}$  до величини  $0,5 \div 1,5$ . В колекторний перехід зміщується у зворотному напрямку і подальше збільшення колекторного струму відбувається в за рахунок модуляції бази зворотно зміщеним колекторним переходом. В разі збільшення базового струму характеристики будуть зміщуватись в бік збільшення колекторного струму, тому що

$$I_K = \beta I_B + I_{K0}$$

У динамічному режимі роботи транзистора одночасно змінюються вхідна і вихідна напруги та його вхідний і вихідний струми. Так, для схеми зі СЕ, вхідний (базовий) струм залежить від вхідної і вихідної напруг одночасно, тобто динамічна вхідна характеристика описується рівнянням  $I_B = f(U_{BE}) / U_{KE} = var$

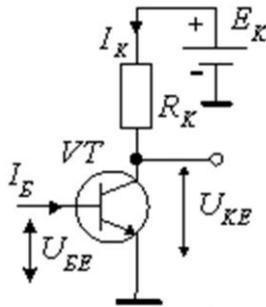


Рис. 13.17

Аналогічно вихідна динамічна характеристика описується рівнянням  $I_K = \varphi(U_{KE}) / I_B = var$

Динамічний режим має місце при вмиканні в колекторне коло резистора  $R_K$  (рис. 13.17). Відповідно до другого закону Кірхгофа, маємо:

$$E_K = U_{KE} + I_K R_K$$

Пряма лінія, що описується цим рівнянням, називається навантажуючою прямою або вихідною динамічною характеристикою. На сімействі вихідних статичних характеристик транзистора навантажувальна пряма будується за двома точками (рис. 13.18):

$$U_{KE} = E_K \text{ (якщо } I_K = 0) \text{ і } I_K = E_K / R_K \text{ (якщо } U_{KE} = 0).$$

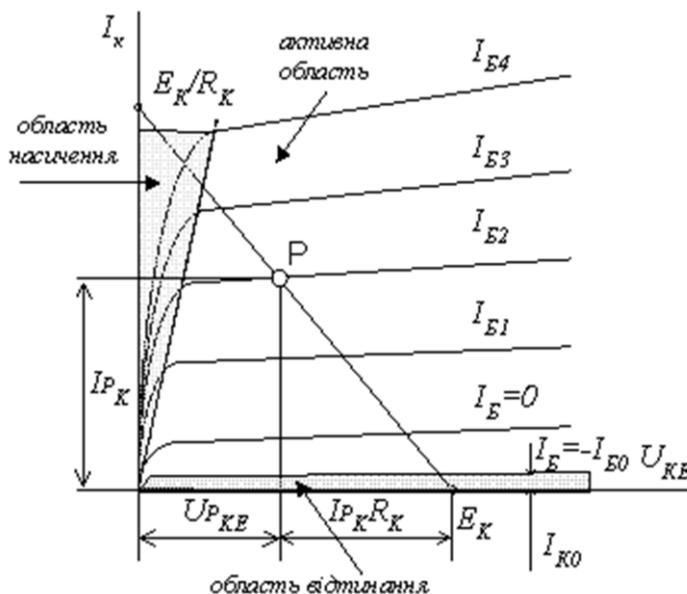


Рис. 13.18 Статичні характеристики транзистора

Навантажувальна лінія і сімейство статичних характеристик транзистора визначають залежність колекторного струму від струму бази і напруги на колекторі за постійною величиною  $E_K$  джерела живлення і незмінному опорі  $R_K$ .

Режим роботи транзистора визначається точкою перетину навантажувальної лінії і статичних характеристик з відповідним базовим струмом.

Ця точка перетину називається робочою точкою, і в залежності від її положення розрізняють три характерні області на динамічній характеристиці або три режими роботи транзистора.

Активний режим (робоча точка знаходиться в активній області), у якому емітерний  $p-n$  перехід транзистора зміщений у прямому напрямі, а колекторний  $p-n$  перехід у зворотному. В такому режимі транзистор працює у схемах підсилювачів електричних сигналів.

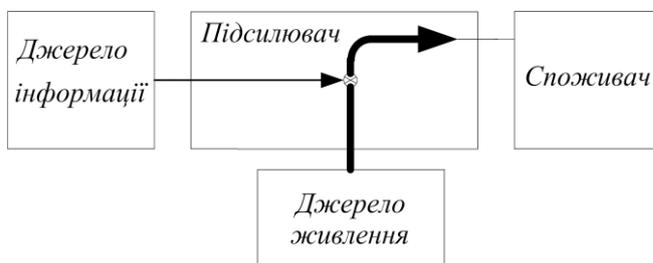
Режим насичення (робоча точка знаходиться в області насичення), у якому обидва  $p-n$  переходи транзистора зміщені у прямому напрямі.

Режим відтинання (робоча точка знаходиться в області відтинання), у якому обидва  $p-n$  переходи зміщені у зворотному напрямі

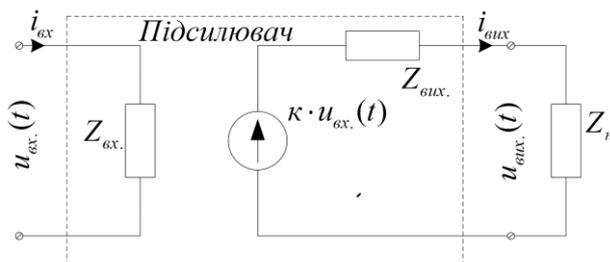
У режимах насичення і відтинання транзистор не має підсилення. Ці режими використовуються при роботі транзисторів в імпульсних схемах.

**Підсилювачем** називається електронний пристрій, призначений для підсилення інформативного параметра сигналу. Структура підсилювача наведена на рис. 13.19, а.

З точки зору теорії електричних кіл підсилювач — це активний чотириполіусник, що має два вхідні і два вихідні затискачі (полюса) і характеризується вхідним  $Z_{вх}$  і вихідним  $Z_{вих}$  опорамі (імпедансами). До вхідних затискачів приєднується джерело вхідного сигналу, а до вихідних навантаження з опором  $Z_{н}$ , рис. 13.19, б.



а)



б)

Рис. 13.19 Підсилювач

Процес підсилення вхідного сигналу здійснюється шляхом зміни опору транзистора, ввімкненого в коло джерела живлення і, таким чином, керуванню потоком енергії від джерела живлення до споживача під дією інформативного сигналу. Підсилююча властивість такого чотириполіусника врахована керованим ідеальним джерелом напруги  $u_{вих}(t) = k \cdot u_{вх}(t)$ .

Властивості підсилювача визначає сукупність його наступних основних технічних показників: коефіцієнти

підсилення (по напрузі, струму, потужності), вхідний і вихідний опори, вихідна потужність, коефіцієнт корисної дії, чутливість, діапазон

підсилюючих частот, а також показники характеризуючи нелінійні, частотні та фазові спотворення підсилюючого сигналу.

Розглянемо роботу **підсилювача з фіксованим струмом бази**. Щоб зрозуміти принцип дії підсилювача, потрібно добре усвідомити крім динамічного режиму транзистора його статичний режим, або режим спокою. В цьому режимі струм колектора транзистора  $I_{PK}$ , напруга між колектором і емітером  $U_{PKE}$ , а також відповідні їм струм бази  $I_{PB}$  та напруга між базою і емітером  $U_{PBE}$  є незмінними. Вони визначаються місцем знаходження робочої точки  $P$  на навантажувальній прямій.

Найпростіша схема, що забезпечить такий режим транзистора  $VT$  типу  $n-p-n$ , показана на рис. 13.20. Її називають схемою з фіксованим струмом бази.

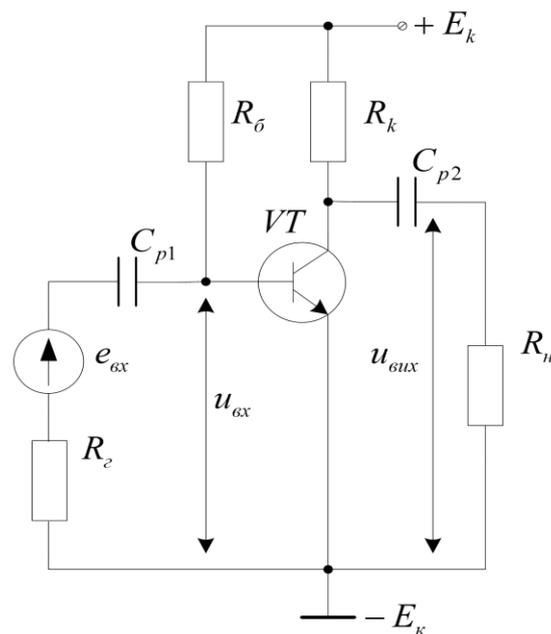


Рис. 13.20 Підсилювач з фіксованим струмом бази

Резистор  $R_b$ , ввімкнений в коло бази транзистора ( $+E_k$ ,  $R_b$ , ділянка база– емітер транзистора,  $-E_k$ ), забезпечує потрібне значення струму бази  $I_{PB}$  і напруги між базою та емітером  $U_{PBE}$ , тобто опори резистора  $R_b$  і ділянки  $EB$  транзистора є дільником напруги джерела живлення  $E_k$ . Значення опору резистора  $R_b$  визначається за виразом:

$$R_b = \frac{E_k - U_{PBE}}{I_{PB}}.$$

Зміни в схемі, а в більшості випадків це напруга між базою та емітером транзистора приводять до зміни струму бази і, як результат, до переміщення робочої точки  $P$  по навантажувальній прямій і, як результат, зміни струму колектора та напруги між колектором і емітером від початкових значень. Подібні зміни в схемі підсилювача викликаються зміною напруги вхідних сигналів, які потребують підсилення.

Конденсатор  $C_{p1}$  служить для приєднання джерела вхідного сигналу з ЕРС  $e_{вх}$  і внутрішнім опором  $R_z$  в коло бази транзистора. Його називають роз'єднуючим постійної і змінної (інформативної) складових вхідного сигналу. З іншої сторони, якщо він буде відсутній, то в колі джерела вхідного сигналу створиться постійний струм від джерела живлення  $E_K$ , який змінить режим роботи джерела вхідного сигналу, наприклад викличе його нагрівання. Конденсатор  $C_{p2}$  на виході підсилювача забезпечує виділення із напруги між колектором і емітером підсиленої змінної (інформативної) складової, що подається в пристрій навантаження з опором  $R_n$ .

Усвідомити роботу підсилювача допоможе його графічний аналіз, рис. 13.21. Його зручно проводити, якщо побудувати по точкам перетину лінії навантаження з вихідними характеристиками, відповідними до різних струмів бази, перехідну характеристику  $I_K = f(I_B)$  і вхідну динамічну  $I_B = f(U_{BE})$ . За вхідну динамічну характеристику зазвичай використовують вхідну статичну характеристику, що відповідає напрузі на колекторі  $U_{KE} \neq 0$ .

Вхідний сигнал підсилювача з напругою  $u_{вх}$  викликає зміну напруги між базою та емітером і, як наслідок, зміну струму бази відповідно до вхідної характеристики, тобто в струмі бази крім постійної складової  $I_{pB}$ , з'являється змінна складова  $i_b$ . Одночасно з цим будуть змінюватись струм колектора  $i_K$ , спад напруги на резисторі  $R_K$  і, як результат, напруга між колектором і емітером, тобто в струмі колектора і в напрузі між колектором і емітером крім постійних складових, з'являться змінні (інформаційні) складові.

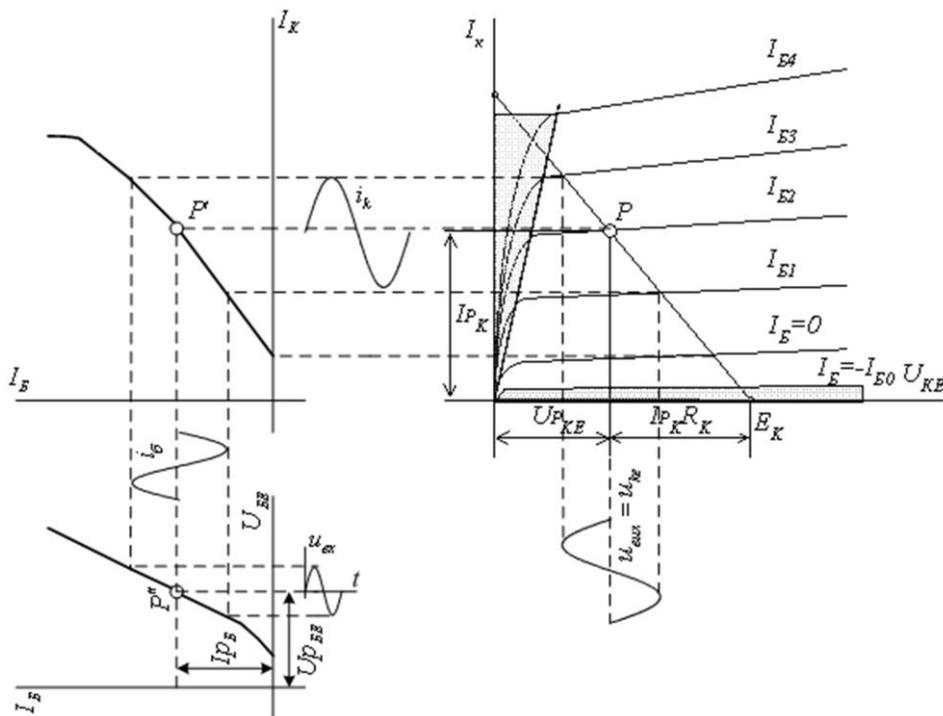


Рис. 13.21 Характеристики підсилювача з фіксованим струмом бази

Змінна складова напруги між колектором і емітером, що дорівнює змінній складовій спаду напруги на резисторі  $R_k$  і зворотна за фазою становить вихідну напругу підсилювача,  $u_{вих} = -R_k i_k$ . Для напруги вхідного сигналу справедливо співвідношення  $u_{вх} = R_{вх} \cdot i_{вх}$ , де  $R_{вх}$  – вхідний опір підсилюючого каскаду, приблизно дорівнює вхідному опору транзистора, а вхідний струм підсилювача струму бази,  $i_{вх} \approx i_b$ . Оскільки  $i_k > i_b$ ,  $R_k > R_{вх}$ , то коефіцієнт підсилення по напрузі  $K_u = u_{вих} / u_{вх} \gg 1$ .

Якщо діапазон зміни напруги вхідного сигналу укладається в лінійні ділянки вхідних і вихідних характеристик транзистора, то форма вихідної напруги підсилювача буде повторювати форму вхідної.

**Підсилювач з фіксованою напругою бази.** Схема каскаду підсилювача з фіксованим струмом бази відзначається простотою забезпечення початкового стану робочої точки за допомогою єдиного джерела живлення  $E_k$ . Однак такий спосіб забезпечення початкового місця робочої точки  $P$  на навантажувальній прямій придатний тільки за малих коливань температури транзистора (від температури залежить опір ділянки база– емітер транзистора  $VT$ ).

Більш ефективною являється схема каскаду підсилення з фіксованою напругою бази, рис. 13.22.

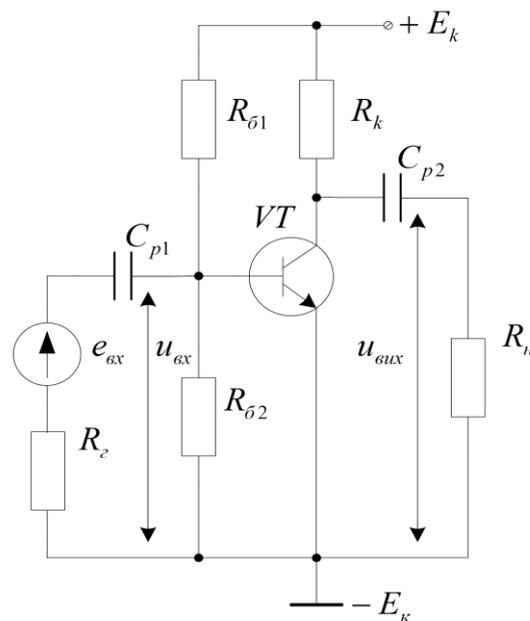


Рис. 13.22 Підсилювач з фіксованою напругою бази

В цій схемі резистори  $R_{б1}$  і  $R_{б2}$ , приєднані паралельно джерелу живлення  $E_k$ , складають ділянку напруги. Опір ділянки визначається із очевидних співвідношень:

$$R_{б1} = \frac{E_k - U_{PBE}}{I_0 + I_{PB}}, \quad R_{б2} = \frac{U_{PBE}}{I_0},$$

де  $I_0$  – струм ділянки, зазвичай вибирають в межах  $(2 \div 5) I_{PB}$ .

В цьому випадку збільшується стабільність роботи підсилювача, оскільки зміна струмів в колах транзистора за різних причин мало впливає на величину  $U_{PBE}$ , що визначає початкове місце робочої точки  $P$  на навантажувальній прямій, тобто  $U_{PBE} = R_{\delta 2} I_{\delta}$ .

Основний дестабілізуючий фактор, що порушує сталість роботи транзисторного підсилювача являється залежність параметрів транзистора від температури. З її підвищенням збільшується колекторний струм за рахунок збільшення кількості неосновних носіїв заряду в напівпровідниковій структурі транзистора. Це приводить до зміщення робочої точки з її початкового стану. Тому побудова схем транзисторних підсилювачів вимагає приймати заходи для термостабілізації початкового місця робочої точки  $P$  на навантажувальній прямій. Для цього в коло емітера вмикають резистор  $R_E$  і конденсатор  $C_E$ , рис. 13.23. Як результат назустріч напрузі  $U_{PBE}$ , що визначає початковий стан робочої точки і є спадом напруги на резисторі  $R_{\delta 2}$  ввімкнена напруга, що є падінням напруги на резисторі  $R_E$ , тобто  $U_{PBE} = R_{\delta 2} I_{\delta} - R_E I_E$ .

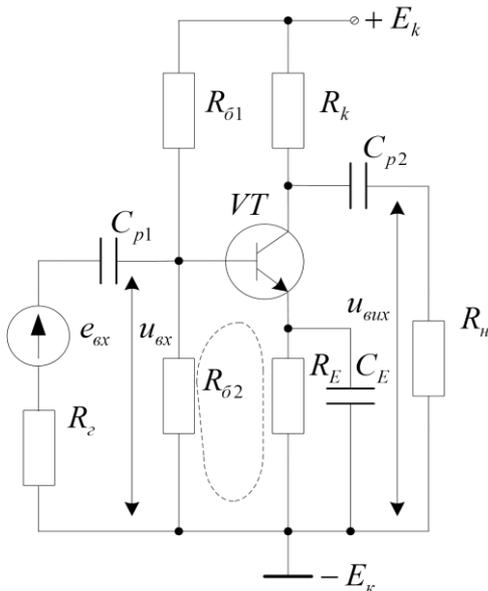


Рис. 13.23 Схема з термостабілізацією

В разі збільшення температури, постійна складова колекторного струму збільшиться. Так як  $I_{PE} = I_{PK} + I_{PB}$ , то збільшення струму  $I_{PK}$  приведе до збільшення струму емітера  $I_{PE}$  і, як наслідок, спаду напруги на резисторі  $R_E$ . В результаті напруга між базою і емітером  $U_{PBE}$  зменшиться, що приведе до зменшення струму бази  $I_{PB}$  і, як наслідок, зменшенню струмів колектора  $I_{PK}$  і емітера  $I_{PE}$ .

Введення в коло емітера тільки резистора  $R_E$  і відсутності конденсатора  $C_E$  змінить роботу підсилюючого каскаду не тільки в режимі спокою, а також за наявності вхідного сигналу. Тому для термостабілізації робочої

точки тільки по постійній складовій струму емітера, паралельно резистору  $R_E$  включають конденсатор  $C_E$  такої величини, щоб його опір для нижньої граничної частоти  $f_n$  підсилюючих сигналів був набагато менший за  $R_E$ .

Для оцінки коефіцієнта підсилення підсилювача на різних частотах підсилюючих сигналів користуються **амплітудно-частотними** (АЧХ) та **фазочастотними** (ФЧХ) характеристиками, рис. 13.24.

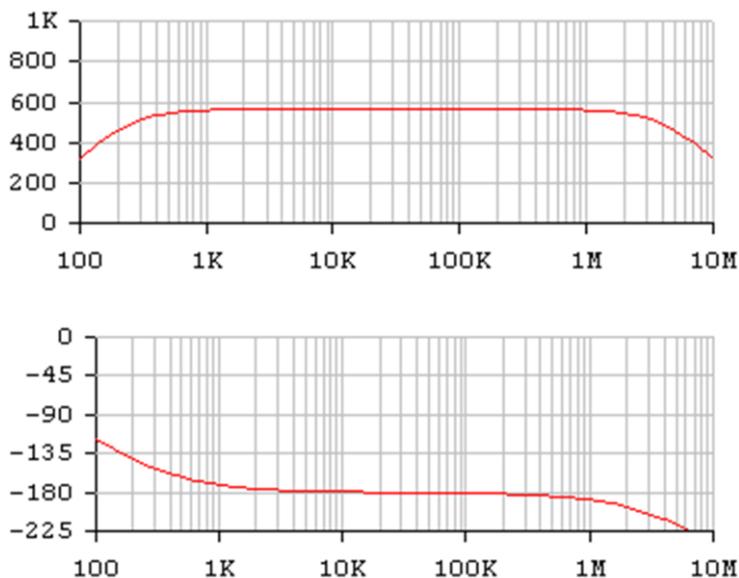


Рис. 13.24 АЧХ та ФЧХ підсилювача

На рис 13.24 по осі абсцис застосована шкала десяткових логарифмів і тоді значення частоти виражаються у десяткових логарифмічних одиницях частоти – декадах (дк).

По осі ординат застосована лінійна шкала зменшення коефіцієнта підсилення та відхилення кута зсуву фази вихідного сигналу по відношенню до його значення  $180^{\circ}$  в області нижніх і верхніх частотах називають частотними

спотвореннями. Причиною цих спотворень є наявність в схемі підсилювача реактивних елементів: котушок індуктивності, конденсаторів, між електродних ємностей елементів підсилювача, ємностей монтажу та інше. А назва, частотні спотворення, обумовлена тим, що гармоніки складного сигналу, проходячи через підсилювач, матимуть неоднаковий зсув по фазі і форма вихідного сигналу спотворюється.

Частотні спотворення характеризується коефіцієнтом частотних спотворень, який визначається відношенням коефіцієнта підсилення на даній частоті  $K_f$ : до коефіцієнта підсилення на середній частоті  $K_{cp}$ ,

$$M = K_f / K_{cp}.$$

Часто допустиме значення коефіцієнта частотних спотворень приймають рівним  $M = K_f / K_{cp} = 1/\sqrt{2} = 0,707$ .

Частоти  $f_n$  та  $f_v$ , на яких коефіцієнт частотних спотворень дорівнює допустимому, називаються граничними частотами, а діапазон частот, у якому коефіцієнт частотних спотворень не перевищує допустимих значень, тобто  $\Delta f = f_v - f_n$  називають смугою пропускання підсилювача.

**Зворотним зв'язком** (ЗЗ) називається передача енергії вихідного сигналу або його частини на вхід підсилювача. Пристрій, за допомогою якого передається вихідний сигнал підсилювача на його вхід називають ланкою зворотного зв'язку.

Зворотні зв'язки в підсилювачах зазвичай створюють спеціально. Проте інколи вони виникають за рахунок паразитних ємностей, внутрішніх опорів джерел живлення і інше. Такі зворотні зв'язки називають паразитними.

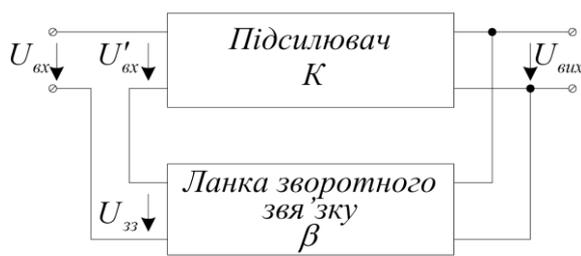


Рис. 13.25 Зворотні зв'язки

Зворотний зв'язок називається додатним, якщо частина вихідного сигналу додається до вхідного сигналу підсилювача, якщо ж частина вихідного сигналу віднімається від вхідного, то зворотній зв'язок називається від'ємним.

За способом увімкнення зворотного зв'язку на вході підсилювача розрізняють послідовний і паралельний зворотний зв'язок.

Якщо джерело вхідного сигналу і вихід ланки зворотного зв'язку увімкнені послідовно, то такий зворотний зв'язок називають послідовним, а якщо паралельно, то паралельним. Найбільш поширене використання має підсилювач з послідовним від'ємним зворотним зв'язком за напругою, рис. 13.25.

Визначимо коефіцієнт підсилення підсилювача з таким зворотнім зв'язком, використовуючи наступні співвідношення:

$$U_{вих} = KU'_{вх}, \quad U_{вих} = K_{\beta} U_{вх}, \quad U'_{вх} = U_{вх} \pm U_{зз}, \quad U_{зз} = \beta U_{вих},$$

тоді

$$K_{\beta} = \frac{K}{1 - (\pm \beta K)},$$

Де  $\pm \beta k$  називають фактором зворотного зв'язку; знак “+” відповідає додатному зворотному зв'язку, а знак “-” від'ємному.

Аналіз виразу коефіцієнта підсилення підсилювача з зворотнім зв'язком показує, що від'ємний зворотний зв'язок зменшує коефіцієнт підсилення в  $(1 + K\beta)$  раз. Незважаючи на це від'ємний зворотний зв'язок використовують для покращення параметрів і характеристик підсилювача.

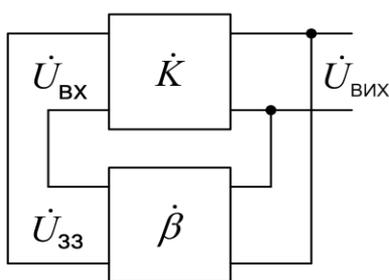


Рис. 13.26 Генератор електричних коливань

Додатний зворотний зв'язок навпаки, збільшує коефіцієнт підсилення. Це приводить до нестійкої роботи підсилювача, тому вона використовується для побудови електронних генераторів електричних коливань. Їх функціональна схема складається з підсилювача з коефіцієнтом підсилення  $K$  і кола додатного зворотного зв'язку з коефіцієнтом передачі зворотного зв'язку  $\beta$ , рис. 13.26.

**Операційні підсилювачі (ОП).** Принципова схема ОП надзвичайно складна. Виготовляються вони у вигляді інтегральних мікросхем, мають два входи (прямий і інверсний) і один вихід. Характеризуються значним коефіцієнтом підсилення за напругою (прийнято вважати  $K_u \rightarrow \infty$ ), великим вхідним ( $R_{вх} \rightarrow \infty$ ) і малим вихідним ( $R_{вих} \rightarrow 0$ ) опорами. Раніше ОП були призначені тільки для виконання математичних операцій над сигналами, звідси і походить їх назва.

На сучасному етапі розвитку електроніки операційний підсилювач став універсальним базовим елементом і входить до складу більшості електронних пристроїв. Умовні позначення операційного підсилювача на електричних схемах наведені на рис. 13.27. Якщо на прямий вхід подати сигнал, то вихідний сигнал операційного підсилювача матиме ту саму полярність, якщо сигнал постійний і ту саму фазу, якщо сигнал синусоїдний. Вихідний сигнал має протилежну полярність для постійного характеру сигналу і фазу зсунуту на  $180^\circ$  для синусоїдного, якщо сигнал подати на інверсний вхід.

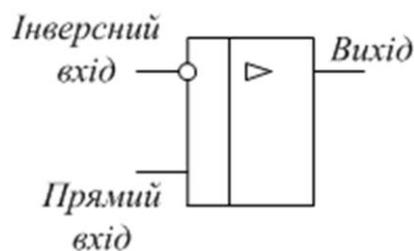


Рис. 13.27 Позначення ОП

До основних параметрів операційного підсилювача відносять:

$K_u$  - коефіцієнт підсилення за напругою;

$K_p$  - коефіцієнт підсилення за потужністю;

$U_{вих.макс}$  - максимальне значення вихідної напруги;  $f_n$  - нижня гранична частота сигналу, що підсилюється;

$R_{вх}$  - вхідний опір;

$R_{вих}$  - вихідний опір.

Важливою для ОП є його передаточна характеристика  $u_{вих} = f(u_{вх})$ , (рис. 13.28).

Оскільки підсилювач має два входи (прямий і інверсний), то ця характеристика відображає роботу ОП при поданні сигналу на кожний вхід окремо за умови без і з наявністю зворотного зв'язку. Величина вихідного сигналу на виході підсилювача обмежується максимальною напругою  $U_{вих.макс}$  додатного чи від'ємного значення, яка досягає  $(0.9 \div 0.95)$  напруги живлення  $E_k$ . На цих ділянках зміна вхідного сигналу не буде викликати зміни вихідного сигналу, тобто напруга на виході буде залишатись сталою.

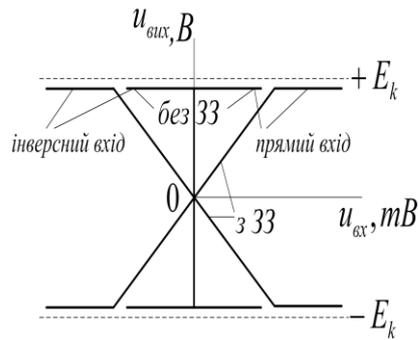


Рис. 13.28 Передаточна характеристика ОП

На похилих ділянках характеристики величина вихідної напруги буде визначатися коефіцієнтом підсилення

$$K_u = \frac{\Delta u_{вих}}{\Delta u_{вх}}$$

У випадку наявності сигналів на обох входах ОП, його вхідна напруга визначатиметься алгебраїчною сумою напруг на цих входах

$$\Delta u_{вх} = \Delta u_{вх2} - \Delta u_{вх1}$$

ОП мають рівномірну амплітудно – частотну характеристику аж до конче низьких частот, рис. 13.29. Враховуючи це, ОП використовуються в якості підсилювачів постійного струму.

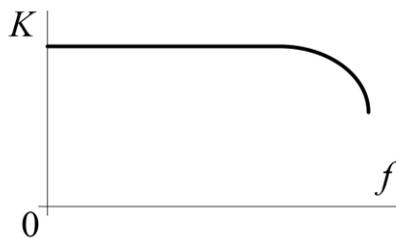


Рис. 13.29 АЧХ операційного підсилювача

## ТЕМА 14: ЕЛЕКТРИЧНІ ВИМІРЮВАННЯ

### 14.1. Засоби електричних вимірів

Засоби електричних вимірів — це технічні засоби, які використовують для електричних вимірів і мають нормовані метрологічні якості.

В метрології розрізняють 5 видів засобів технічних вимірів :

- міри;
- електровимірювальні прилади;
- вимірювальні перетворювачі;
- електровимірювальні установки;
- інформаційно-вимірювальні системи ( ІВС ).

1) Міри — засоби електричних вимірів, які призначені для відтворення фізичної величини заданого розміру.

Існують зразкові та робочі міри. Зразкові міри призначені для відтворення та збереження одиниць виміру та передачі їх значень робочим мірам. Найвищею зразковою мірою вважають державний еталон. Робочі міри призначені для цілей вимірювання на підприємстві.

Міри бувають однозначні та багатозначні. Однозначна міра відтворює величину одного розміру. Багатозначна — відтворює ряд однойменних величин різного розміру.

2) Електровимірювальні прилади — засоби електричних вимірів, призначені для вироблення сигналів вимірювальної інформації у формі, зручній для безпосереднього сприйняття спостерігачем.

Прилади, показання яких є неперервною функцією зміни величини, що вимірюється, зветься аналоговими. Прилади, показання яких є дискретною функцією вимірюваної величини, представлені у цифровій формі, зветься цифровими. Також всі прилади поділяються на показуючі та реєструвальні. Показуючі прилади здійснюють тільки зчитування інформації, а реєструвальні – зчитування та реєстрацію інформації. Реєструвальні, у свою чергу, можуть бути самопишучі та друкуючі. Самопишучі прилади здійснюють запис показань у вигляді діаграм та графіків. Друкуючі прилади здійснюють друк результатів у цифровій формі.

3) Вимірювальні перетворювачі — засоби електровимірів, які призначені для вироблення сигналів вимірювальної інформації у формі, зручній для обробки, зберігання та подальшої передачі інформації, але недосяжній безпосередньому сприйманню спостерігачем. Поділяються на електричні та неелектричні перетворювачі. Електричні перетворювачі здійснюють перетворення електричних величин у електричні, але іншого розміру чи фізичної природи (наприклад, шунти, мостові схеми, підсилювачі та ін.). Неелектричні перетворювачі здійснюють перетворення неелектричних величин у електричні (термоопори, індуктивні та ємнісні перетворювачі, фотоелементи та ін.).

4) Електровимірювальні установки - сукупність функційно об'єднаних засобів вимірів (мір, вимірювальних приладів та перетворювачів), а також допоміжних пристроїв, які призначені для вироблення вимірювальної інформації, зручної для безпосереднього сприйняття спостерігачем та розташованих в одному місці. Загальними вимогами пристроїв, які належать до електровимірювальної установки, є згодженість по точності, швидкодії та вимірюваній величині.

5) Інформаційно-вимірювальні системи (ІВС) - сукупність засобів вимірів та допоміжних пристроїв, з'єднаних між собою загальними каналами зв'язку. Вони призначені для автоматичного одержання вимірювальної інформації від ряду джерел, а також для передачі, обробки та представлення її у тій чи іншій формі. Пристрої, які належать до ІВС, територіально можуть бути віддалені одне від одного. Сучасні ІВС являють собою мікропроцесорні системи.

#### **14.2. Основні характеристики засобів вимірювання**

Будь-який вимірювальний прилад повинен мати визначені характеристики, які забезпечують отримання найбільш точних результатів вимірювання. До них відносяться:

1) Можливість вимірювання тієї чи іншої фізичної величини у прийнятих одиницях вимірювання.

2) Діапазон вимірів приладу – різниця між найбільшим та найменшим значеннями величин, які можуть вимірюватися з вимагаємою точністю. Найбільше та найменше значення діапазону вимірювань називають відповідно нижньою та верхньою границями вимірювань або початковим та кінцевим значенням шкали.

3) Точність вимірів – ступінь наближеності результату вимірювання до його справжнього значення.

Точність вимірювання аналогових приладів характеризується похибками засобів вимірювань :

а) **абсолютна похибка** засобів вимірювань :

$$\Delta A = A_x - A_0;$$

де  $A_x$  – виміряне значення;

$A_0$  – дійсне значення.

б) **поправка** – величина, яка дорівнює абсолютній похибці з протилежним знаком :

$$П = -\Delta A = A_0 - A_x;$$

в) **відносна похибка** – відношення абсолютної похибки до дійсного значення, взяте у відсотках:

$$\delta = \frac{\Delta A}{A_0} \cdot 100\%.$$

Дуже часто у знаменнику для відносної похибки замість  $A_0$  беруть  $A_x$  і тоді відносна похибка:

$$\delta = \frac{\Delta A}{A_x} \cdot 100\%,$$

що доцільно, оскільки значення  $A_x$  відоме, а різниця між обома виразами для відносної похибки є дуже малою величиною і тим меншою, чим менша абсолютна похибка вимірювання;

г) **зведена похибка** – відношення абсолютної похибки до нормованого значення, взяте у відсотках:

$$\gamma = \frac{\Delta A}{A_N} \cdot 100\%,$$

де  $A_N$  – нормоване значення.

Нормоване значення  $A_N$  для приладів з нулем із одного боку шкали дорівнює кінцевому значенню діапазону. Для шкал з нулем всередині шкали – арифметичній сумі по модулю граничних значень діапазону;

д) **варіація** — різниця між значеннями вимірюваної величини при прямому та зворотньому ході стрілки приладу:

$$\Delta B = A_{x(np)} - A_{x(зв)}.$$

Варіація виникає внаслідок недосконалості механічної частини приладу: тертя в опорах, зазорів, люфтів;

е) **зведена варіація** – відношення варіації до нормованого значення, взяте у відсотках:

$$B\% = \frac{\Delta B}{A_N} \cdot 100\%$$

Для визначення класа точності прилада розраховують зведену похибку і зведену варіацію в кожній оціфрованій точці шкали. Вибірають найбільше одержане значення і порівнюють зі стандартною шкалою класів точності приладів:

**0.05; 0.1; 0.2; 0.5; 1.0; 1.5; 2.5; 5.0**

**Класом точності** вважається найближче більше число з цієї шкали.

Для цифрових приладів абсолютна похибка підраховується як і для аналогових :

$$\Delta A = A_x - A_0.$$

Відносна похибка цифрових приладів підраховується за формулою :

$$\delta = \pm \left[ c + d \cdot \left( \frac{A_N}{A_x} - 1 \right) \right] \%,$$

де  $c$  – величина, яка чисельно дорівнює зведеній похибці цифрового приладу;

$d$  – безрозмірний коефіцієнт, який вибирається із ряду

$$(10; 6; 5; 3; 2; 1.5) \cdot 10^{-n}$$

при  $n = 1, 2, 3, \dots$

Класи точності цифрових приладів завжди записують у вигляді дроби:

$$c/d,$$

причому завжди повинна виконуватися нерівність  $c/d > 1$ .

4) Швидкодія приладів, яка визначається часом встановлення показань. Відлік показань приладу можна робити тільки після приходу рухомої системи в стале положення, тому різні прилади мають різну швидкодію. Згідно стандарту швидкодія приладу визначається максимальним числом вимірів в одиницю часу, яке може бути зроблено з нормованою точністю.

5) Чутливість прилада – це його реакція на вхідний сигнал. Визначається як співвідношення похідної вихідного сигналу  $Y$  до похідної вхідного  $X$ :

$$S = dY/dX.$$

Для стрілкових приладів чутливість визначається як похідна кута відхилення рухомої частини  $\alpha$  по величині  $X$ , яка вимірюється:

$$S = d\alpha/dx,$$

де  $d\alpha$  — кут відхилення стрілки.

Поняття „чутливість” не слід ототожнювати з поняттям „поріг чутливості”. Поріг чутливості для приладів – мінімальне значення вхідного сигналу, при якому відбувається помітна зміна вихідного сигналу.

6) Вид рівняння шкали приладу. Визначається його статичною характеристикою. Шкали бувають: лінійні (рівномірні) та квадратичні (нерівномірні). Більш зручними у використанні є прилади з лінійними шкалами. Такі прилади не мають зони нечутливості – зони, обмеженої на шкалі чорною крапкою, у якій не зберігається вказаний клас точності.

На шкалі приладу завжди нанесені поділki. Поділкою шкали називають частину шкали між двома сусідніми позначками, а ціна поділки  $C_{II}$  — різниця значень величини, яка відповідає одній поділці (двом сусіднім позначкам) шкали. Ціною найменшого розряду цифрового вимірювального приладу є різниця між двома найближчими показами цього засобу вимірювань.

7) Метрологічна надійність приладу – визначає ймовірність отримання певних результатів за допомогою прилада протягом даного часу. Це поняття зв'язують не з явними відмовами (механічна поламка, втрата працездатності), а з прихованими відмовами, під якими, у даному випадку, належить розуміти вихід похибки вимірювання за межі встановленого допуску при збереженні загальної працездатності прилада.

Метрологічна надійність визначає частоту міжповірочних інтервалів.

8) Ряд загальних вимог до прилада: вага, габарити, технологічність виготовлення, вартість, ремонтоздатність, зручність в експлуатації.

### 14.3. Основні типи електромеханічних приладів

З погляду принципу дії вимірювального механізму показувальні прилади електромеханічної групи поділяють на прилади магнітоелектричної, електромагнітної, електродинамічної, індукційної та електростатичної систем. Якщо до складу вимірювального кола засобу вимірювань входить попередній перетворювач масштабу чи роду вимірюваної величини, наприклад, електронний підсилювач чи електронний перетворювач роду вимірюваної величини, або ж термоелектричний чи випрямний перетворювач, то прилади називаються, відповідно, електронними, термоелектричними чи випрямними.

#### 14.3.1 Магнітоелектричні прилади

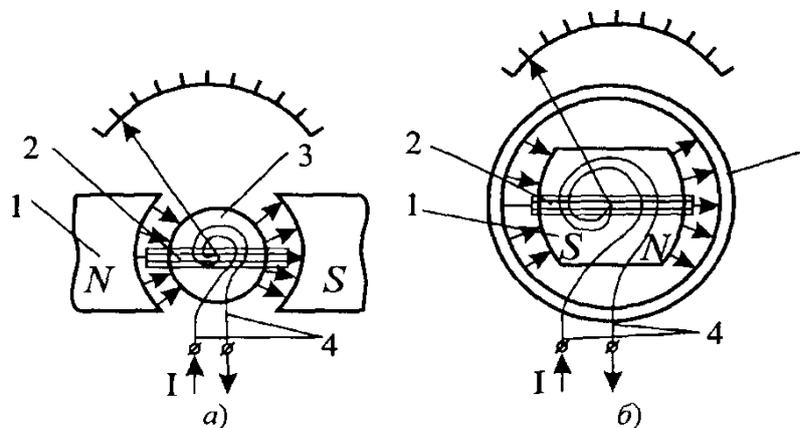


Рис. 14.1 Магнітоелектричні вимірювальні механізми

Активними елементами *магнітоелектричних ВМ* (рис.14.1), тобто елементами, які беруть участь у створенні обертального моменту, є рухома рамка 2, що обертається в однорідному магнітному полі між полюсами постійного магніта 1 та осердям 3. Існують магнітоелектричні прилади із зовнішнім магнітом та з внутрішньорамковим магнітом. В останніх ефективніше використовується енергія постійного магніта і вони можуть бути порівняно малих розмірів. Для підведення струму до рамки служать дві спіральні пружини 4, які також призначені для створення протидіючого моменту. Якщо через обмотку рамки протікає струм  $i$ , то він створює обертальний момент, пропорційний цьому струмові, і викликає обертання рамки. При цьому спіральні пружини створюють протидіючий момент, пропорційний до кута обертання  $\alpha$ .

Якщо через рамку проходить постійний струм  $I$ , то усталене відхилення вказівника (усталений кут обертання  $\alpha$ ) буде пропорційним цьому струмові.

Перевагами магнітоелектричних приладів є висока точність та чутливість, мале споживання потужності, лінійність шкали; наявність

постійного магніту дає високу степінь захищеності від зовнішніх полів. Виготовляються прилади аж до класів точності 0.1 та 0.2.

Недоліки: вимірювання тільки постійного струму, невисока перевантажувальна здатність, відносно висока вартість, складність конструкції.

### 14.3.2 Електромагнітні прилади

В основу принципу дії *електромагнітних вимірювальних механізмів* закладено правило, за яким на феромагнітне тіло в магнітному полі діє сила, пропорційна квадрату магнітної індукції. Магнітна індукція, в свою чергу, створюється струмом  $I$ , що протікає через котушку вимірювального механізму, а обертальний момент, що виникає, пропорційний  $I^2$ .

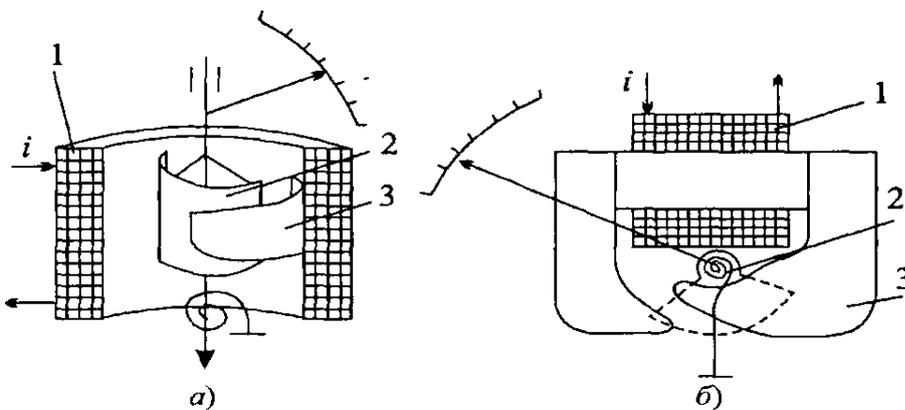


Рис. 14.2 Електромагнітні вимірювальні механізми

У вимірювальних механізмах сучасних електромагнітних приладів обертальний момент створюється силою відштовхування між однаково намагніченими рухомим та нерухомим осердями в результаті проходження через котушку 1 (рис. 14.2) струму  $I$ , що вимірюється. При цьому осердя 2, що закріплене на осі, буде повертатись на деякий кут  $\alpha$ . Протидіючий момент створюється спіральними пружинами з лінійною характеристикою. Форма котушки, а отже, і осердь може бути круглою (рис. 14.2,а) або плоскою (рис. 14.2,б). В останньому випадку може бути значно зменшене споживання приладу з одночасним збільшенням обертального моменту за рахунок розміщення нерухокої котушки на феромагнітному осерді.

Перевагами електромагнітних приладів є можливість вимірювати постійний та змінний струм, стійкість до перевантажень, простота конструкції, невелика вартість приладу.

Недоліки: квадратичність шкали, тобто шкала має на початку зону нечутливості; крім того, котушка утворює дуже слабе магнітне поле, тому мала степінь захищеності від зовнішніх магнітних полів. Класи точності цих приладів невисокі – від 1,0 і більше.

### 14.3.3 Електродинамічні прилади

Різновидами вимірювальних приладів, покази яких пропорційні добутку двох величин, є прилади на базі вимірювальних механізмів *електродинамічної системи*.

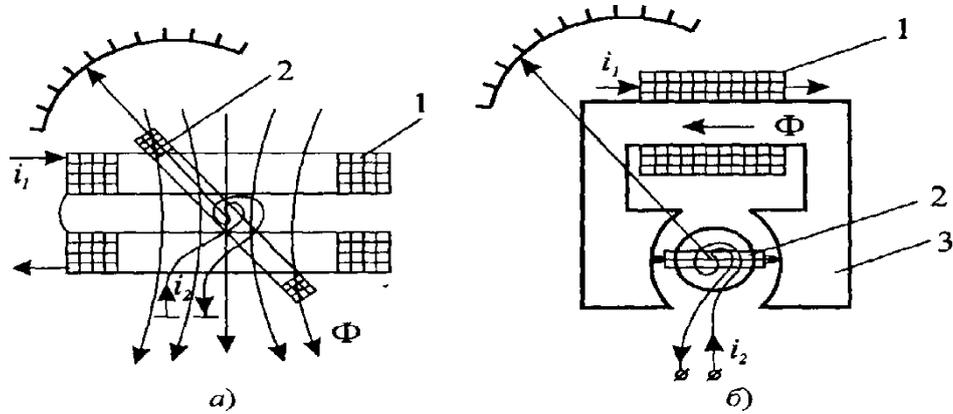


Рис. 14.3 Електро- та ферродинамічні вимірювальні механізми

Принцип дії приладів базується на взаємодії магнітних потоків, що створюються в результаті проходження через дві послідовно з'єднані нерухомі котушки 1 та рухоми рамку 2 відповідно струмів  $i_1$  та  $i_2$ . В результаті цієї взаємодії утворюється обертальний момент, і стрілка, що з'єднана з рамкою, повертається на деякий кут (рис.14.3).

Вимірювальні механізми електродинамічної системи при послідовному з'єднанні нерухомих котушок та рухомиї рамки можуть бути використані для піднесення до квадрату струму, що через них протікає, а отже, для створення амперметрів чи вольтметрів середньоквадратичних значень відповідно струму чи напруги. Таким чином, електродинамічні прилади можуть використовуватись як амперметри (А), вольтметри (V) та ватметри (W), змінюється тільки схема підключення котушок.

За конструкцією є два різновиди приладів електродинамічної системи: з вимірювальним механізмом без ферромагнітного осердя і з вимірювальним механізмом, в якому магнітний потік, що створюється струмом  $I$  проходить через шихтований (виконаний з набору листів) магнітопровід (осердя).

Прилади з вимірювальним механізмом без ферромагнітного осердя (їх називають електродинамічними) можуть працювати у порівняно широкому частотному діапазоні (до декількох кілогерц). Однак такі прилади значною мірою піддаються впливу зовнішнього магнітного поля, якщо в ньому не передбачене екранування або астатичне виконання вимірювального механізму (два ідентичні вимірювальні механізми на спільній осі, в яких обертальні моменти від зовнішнього поля направлені в протилежних напрямках і взаємно компенсуються). Ферродинамічні прилади відрізняються від електродинамічних тим, що нерухома котушка

розташована у ферромагнітному сердечнику. Це дає можливість для розвинення більш потужного поля, підвищуючи чутливість приладу та захищеність від зовнішніх полів. Проте, присутність в конструкції нелінійного елемента погіршує клас точності приладу. Ці прилади працюють, в основному, на змінному струмі.

Переваги: прилади працюють на постійному та змінному струмі, чутливість достатньо висока, достатня надійність, здатність вимірювати  $\cos \varphi$ , потужність, напругу. Класи точності здебільшого 0.1; 0.5.

Недоліки: слабка захищеність від зовнішніх полів (електродинамічні), квадратична шкала, значна залежність від температури зовнішнього середовища та частоти при вимірюванні змінного струму.

#### 14.3.4 Електростатичні прилади

В електростатичному вимірювальному механізмі обертальний момент утворюється у результаті взаємодії двох систем заряджених провідників, одна з яких рухома.

Прилад складається з нерухомих металевих пластин 2, та легкої рухомої алюмінієвої пластини 1, яка закріплюється на одній вісі із дзеркалом, що відбиває промінь на шкалу показчика (рис. 14.4). При підключенні до зажимів напруги, що вимірюється  $U$ , нерухомі пластини отримують заряд одного знаку, а рухома – іншого. Під дією електростатичного поля рухома пластина буде втягуватися у простір між нерухомими пластинами, повертаючи вісь та дзеркало.

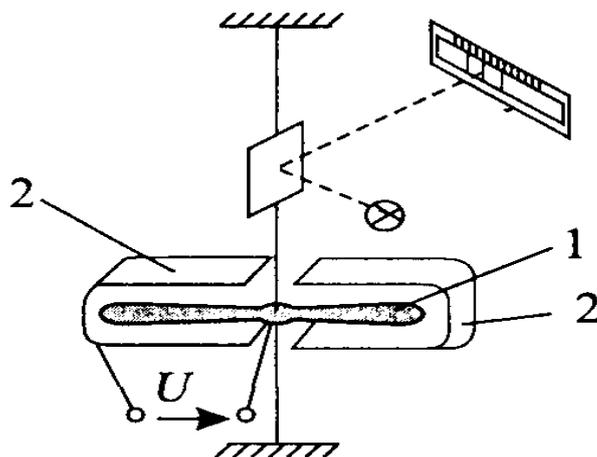


Рис. 14.4 Електростатичний вимірювальний механізм

Безпосередньо дані прилади вимірюють тільки напругу та застосовуються у вольтметрах.

Для створення необхідного для нормальної роботи обертального моменту в електростатичних вимірювальних механізмах потрібна порівняно висока напруга. Тому електростатичні прилади випускають як

вольтметри з номінальною напругою не нижче ніж 10 В і, як кіловольтметри, переважно до 30 кВ. У вольтметрах на низькі напруги (до сотен вольт) вимірювання ємності пов'язане із зміною активної площини пластин. У вольтметрах на великі напруги – із зміною відстані між пластинами.

Перевагами електростатичних вольтметрів є: дуже мале споживання енергії, яке відчутно проявляється хіба що на високих частотах, незалежність показів у широкому частотному діапазоні аж до десятків мегагерц, порівняно високий клас точності, залежно від межі вимірювання та частотного діапазону основна похибка може бути зведена до 0,5... 0,1 %.

Враховуючи вказані вище позитивні особливості електростатичних вимірювальних механізмів, останні використовують також для побудови ватметрів для вимірювань потужності малопотужних об'єктів та в колах високої напруги, а в поєднанні з електронними підсилювачами - високочутливих електронних ватметрів.

До недоліків можна віднести залежність показань приладу від електростатичних полів, від температури, частоти та вологості.

### 14.3.5 Індукційні прилади

Індукційний вимірювальний механізм використовується, в основному, в лічильниках електричної енергії в колах змінного струму. Також існують ватметри індукційної системи, які мають схожу будову.

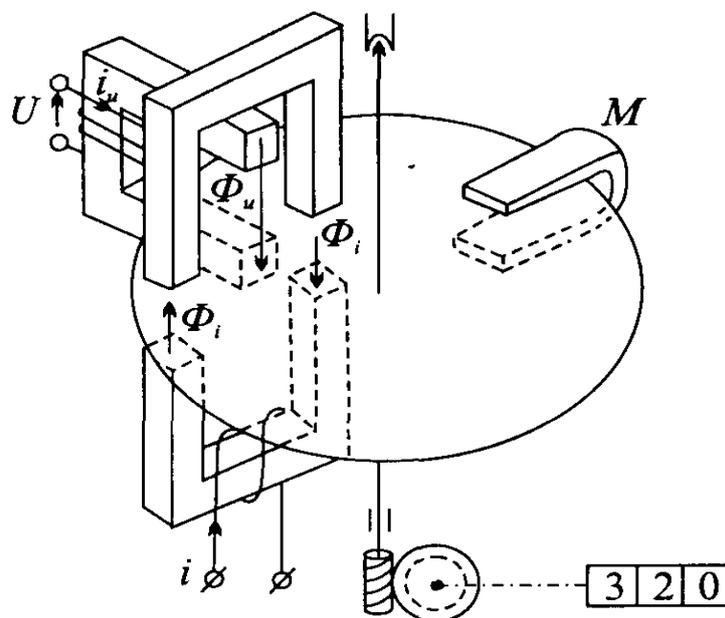


Рис. 14.5 Вимірювальний механізм індукційного лічильника

Вимірювальний механізм має два незалежні магнітопроводи, які рознесені в просторі (рис. 14.5). Обмотка одного з магнітопроводів є обмоткою кола напруги (підключається до навантаження паралельно),

обмотка другого магнітопроводу є струмовою (підключається послідовно). По обмотках електромагнітів течуть змінні струми  $i_u$  та  $i$ , зсунуті по фазі на кут  $\varphi$ . Ці струми утворюють магнітні потоки  $\Phi_u$  та  $\Phi_i$ , які також зсунуті по фазі на кут  $\varphi$ . Магнітні потоки, у свою чергу, наводять у диску вихрові струми, утворюючи обертальний момент  $M_{об}$ . Вісь легкого алюмінієвого диску, що знаходиться між осердями, з'єднана черв'ячною передачею з лічильником.

Кількість обертів диска за визначений проміжок часу пропорційна швидкості обертання, яка, у свою чергу, залежить від струму та напруги. Таким чином, результуючий сигнал пропорційний спожитій енергії. У приладі немає протидіючого моменту, гальмівний момент утворюється постійним магнітом М.

Переваги: великий обертальний момент, малий вплив зовнішніх полів, висока надійність та невисока вартість, стійкість до перевантажень.

Недоліки: залежність від частоти струму, величини напруги, зовнішньої температури. Прилади застосовуються тільки у мережах змінного струму.

## **14.4. Цифрові вимірювальні прилади**

### **14.4.1 Основні поняття та структурна схема**

Цифрові засоби вимірювальної техніки виникли через потреби практики в суттєвому підвищенні точності, швидкодії і чутливості засобів вимірювань. У свою чергу, їх висока швидкодія та точність привели до нагромадження великих масивів даних про результати вимірювань, що стимулювало здійснення повної автоматизації складних процедур прямих, опосередкованих, сукупних і сумісних вимірювань на основі засобів обчислювальної техніки. Необхідність в повній автоматизації різноманітних виробничих процесів та експериментальних досліджень з опрацюванням, накопиченням, передаванням на значні відстані і реєстрацією результатів вимірювань стало потужним стимулом у розвитку елементної бази цифрової вимірювальної техніки – мікроелектроніки.

Сьогодні цифрові засоби охоплюють практично всі вимірювані в промисловості та наукових дослідженнях фізичні величини. З метою уніфікації елементної бази та забезпечення зручності в користуванні, фізичним носієм вимірювальної інформації у них вибрані електричні сигнали, найчастіше напруга постійного струму, які мають ряд незаперечних переваг перед рештою сигналів, а саме: універсальність, дистанційність, наявність добре розроблених методів та засобів опрацювання, можливість реєстрації швидкоплинних процесів, простота узгодження із засобами цифрової обчислювальної техніки (комп'ютерами).

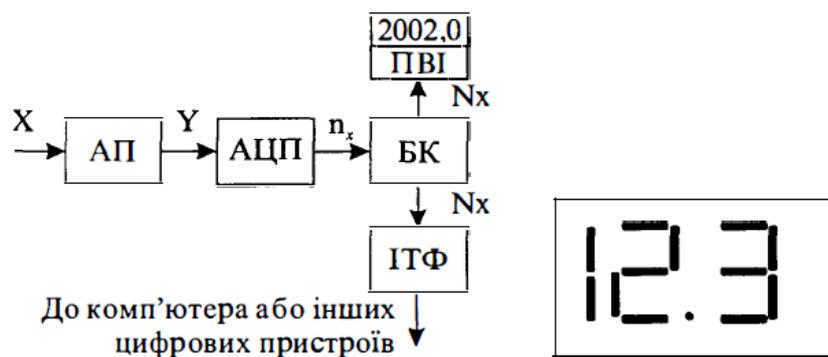


Рис. 14.6. Узагальнена структурна схема цифрового вимірювального приладу

Цифрові засоби вимірювальної техніки (рис. 14.6) в загальному випадку складаються із вхідного аналогового перетворювача (АП) вимірюваної фізичної величини  $X$  в електричну вихідну величину  $Y$ , аналого-цифрового перетворювача (АЦП), обчислювального та керуючого блоку (БК), пристроїв відображення інформації (ПВІ) і стандартного (може бути і декілька, які працюють за різними стандартами обміну інформацією) інтерфейсу (ІТФ), що і визначило їх основну роль у вимірювально-обчислювальних комплексах.

З погляду функціонального призначення цифрові засоби вимірювальної техніки розділяються на аналого-цифрові перетворювачі (АЦП), цифро-аналогові перетворювачі (ЦАП), цифрові вимірювальні прилади та цифрові вимірювальні системи.

В аналого-цифровому перетворювачі здійснюються три базові операції над вхідною величиною: її часова дискретизація, квантування за рівнем і кодування отриманих квантованих значень. Дискретизація сигналу означає заміну неперервної в часі величини її окремими вибірками, взятими в певні моменти часу (рис. 14.6, а). Суть квантування полягає у заміні неперервних значень сигналу в області його інтенсивності (рівня) квантованими (дозволенними) значеннями – подібно як при заокругленні чисел (рис. 14.6, б).

Квантований номер, що відповідає вибірці вхідної величини в певний момент часу, зображується певним кодом і подається цифровим сигналом, який в більшості практичних випадків незалежно від використовуваної системи числення є бінарним, тобто подається лише двома різними рівнями. Загалом АЦП не мають відлікових і (або) реєструвальних пристроїв і є базовою частиною складніших приладів або вимірювально-обчислювальних систем. Сучасні інтелектуальні АЦП можуть видавати вихідні сигнали також і в аналоговому виді, здебільшого уніфікованих стандартних сигналів напруги або постійного струму.

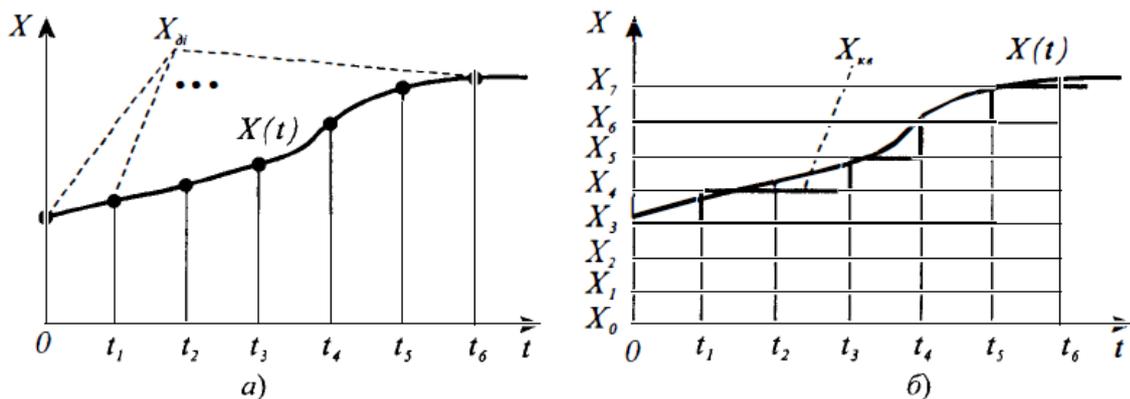


Рис. 14.6. Дискретизація в часі та квантування за рівнем вимірюваної величини

ЦАП призначені для зворотного перетворення кодових сигналів в пропорційні їм аналогові (напругу, струм, кут, тощо). Вони застосовуються при побудові деяких АЦП, формування кодо-керованих зразкових сигналів, а також (разом з вихідними підсилювачами, фільтрами, оберненими перетворювачами, тощо) для створення аналогових сигналів, які використовують для збудження об'єкта дослідження.

Завдяки успіхам мікроелектроніки багато різновидів АЦП і ЦАП серійно виготовляються у вигляді інтегральних мікросхем, мають високі метрологічні характеристики при невеликій вартості та об'ємно-масових показниках.

Цифрові вимірювальні прилади (ЦВП) є засобами вимірювань у повному розумінні цього слова, вони автоматично видають числове значення вимірюваної величини на цифровому відліковому пристрої (цифровий індикатор, табло, дисплей тощо). В сучасних інтелектуальних цифрових приладах у блоці обчислення, побудованому на основі однокристальних мікроконтролерів, для визначення результату вимірювання у цифровій формі відбуваються такі вимірювальні операції, як корекція похибок (адитивних, мультиплікативних та нелінійних складових) вимірювального тракту, лінеаризація загальної функції перетворення, цифрова фільтрація та усереднення тощо.

В багатьох сучасних цифрових приладах передбачений, крім цифрового, і аналоговий вихідний сигнал, здебільшого, у вигляді стандартних уніфікованих сигналів постійного струму або напруги постійного струму для використання в системах керування технологічними процесами, для передачі на значні відстані, для здійснення аналогового відображення або реєстрації вимірювальної інформації, яке для оператора при наявності багатьох вимірюваних величин є більш інформативним, порівняно з цифровим.

У зв'язку із швидким поширенням і розвитком спеціалізованих однокристальних мікро-ЕОМ та комп'ютерних мереж змінюються

можливості і властивості цифрових вимірювальних систем. Крім функцій збору та опрацювання отриманої вимірювальної інформації, з'являються нові можливості: аналіз даної інформації, інтелектуальні функції, пов'язані із змінами алгоритмів та структурних схем вимірювання і контролю необхідних величин досліджуваних об'єктів та вироблення сигналів керування для зміни стану контрольованого об'єкта.

Основними перевагами ЦВП є:

- висока швидкодія – до сотень мільйонів вимірювань за секунду, що об'єктивно вимагає використання засобів обчислювальної техніки для опрацювання результатів вимірювань;
- висока точність, яка, за умов наявності автоматичного калібрування і опрацювання результатів перетворень, може наближатися до точності робочих еталонів одиниць фізичних величин;
- відсутність суб'єктивних складових похибки відліку, наявність яких (при обмеженій довжині шкали) лімітує максимально можливу точність аналогових приладів;
- наявність кодового вихідного сигналу є зручним для його опрацювання, запам'ятовування, реєстрації і передачі на великі відстані без похибок та корекцією збоїв;
- можливість зменшення складових похибки вимірювального кола, в тому числі і систематичних, автоматичними калібруваннями і (або) уведенням поправок. Причому, в багатьох випадках, апаратна частина ЦВП не змінюється, переробляється тільки програмне забезпечення і перепрограмуються постійні запам'ятовувальні пристрої, що особливо зручно в ЦВП для наукових досліджень;
- можливість забезпечення високої завадостійкості перетворення аналог-код за допомогою цифрової фільтрації результатів перетворень;
- можливість визначення статистичних параметрів вимірюваних процесів на базі програмної реалізації відомих теоретичних математичних залежностей.

До недоліків ЦВП слід віднести певну незручність для оператора у порівнянні даного показу з границями вимірювання. Якщо аналогову інформацію оператор оцінює миттєво, то цифрову – повинен запам'ятовувати та зіставляти з границями вимірювання. Час зчитування показів та імовірність помилок при цьому зростає, що й послужило основною причиною для використання аналогових засобів вимірювань на диспетчерських пультах складних технічних об'єктів, наприклад, електростанцій.

#### **14.4.2 Цифрові осцилографи**

Цифровий осцилограф дозволяє одночасно спостерігати на екрані сигнал і отримувати чисельні значення ряду його параметрів з більшою точністю, ніж це можливо шляхом зчитування цих величин з екрана

електронно-променевого осцилографа. Це можливо тому, що параметри сигналу вимірюються безпосередньо на вході цифрового осцилографа, тоді як сигнал, що пройшов через канал вертикального відхилення звичайного осцилографа, може бути вимірний з істотними помилками. Ці помилки можуть досягати 10%.

Основними параметрами, вимірюваними сучасними цифровими осцилографами, є амплітуда сигналу, його частота або тривалість. На екрані осцилографа, крім самих осцилограм, відображається стан органів керування (чутливість, тривалість розгорнення й т.п.).

Передбачений вивід інформації з осцилографа на принтер, флеш-пам'ять та локальну мережу. Однак цим не обмежуються можливості цифрових осцилографів. Мікропроцесор цифрового осцилографа дозволяє визначати діюче значення напруги, розтягувати в часі фрагменти записаного в пам'ять сигналу, додавати й віднімати сигнали на різних каналах, визначати частотний спектр сигналу шляхом застосування швидкого перетворення Фур'є та ін.

Таким чином, до основних переваг цифрових осцилографів можна віднести:

- високу точність вимірів;
- широку смугу пропускання;
- можливість зберігати зображення в пам'яті осцилографа або зовнішньому носії;
- яскраве, кольорове, чітке зображення сигналів на будь-якій швидкості розгорнення;
- можливість виявлення імпульсних перешкод;
- автоматичні засоби виміру параметрів сигналів;
- можливість підключення до комп'ютера, принтера або плоттера;
- можливості математичної й статистичної обробки сигналу;
- засоби самодіагностики й самокалібрування.

Недоліки цифрових осцилографів:

- висока вартість та складність в керуванні;
- затримка відображення на дисплеї на час, необхідний для обробки сигналів.

#### **14.4.3 Цифрові мультиметри. Застосування мікропроцесорів у вимірювальній техніці**

Функціональна схема сучасного цифрового (процесорного) приладу показана на рис. 14.7. Основними пристроями такого приладу є вхідні пристрої (кондиціонер сигналів), АЦП, процесор (мікропроцесор), пристрої відображення, реєстрації та пересилання вимірювальних даних (інтерфейс), пристрої керування, введення даних та команд керування (клавіатура), а також пристрої живлення пристрою

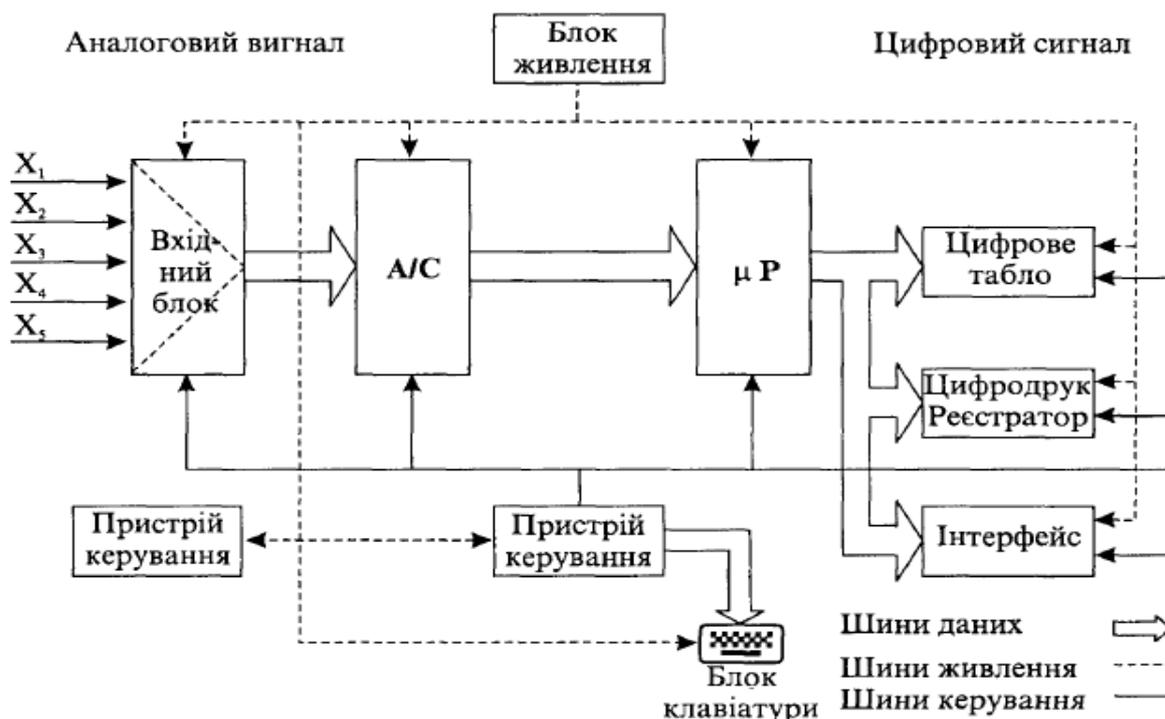


Рис. 14.7. Функціональна схема цифрового процесорного приладу

Шляхом різного виду перетворень вхідної величини значення вихідного сигналу вхідного блока доводять до номінального діапазону перетворення АЦП. Останні, здебільшого, виготовляються на заданий діапазон вхідної напруги, наприклад в діапазонах 0-1В; 0-2В; 0-5В; 0-10В або у двополярних діапазонах. Тому незалежно від роду і виду вихідного сигналу вимірювального перетворювача (сенсора) на виході вхідного пристрою мусить бути сформований сигнал із заданими властивостями, найголовніша з яких – це заданий діапазон її зміни. Цей елемент вимірювального каналу називають нормалізуючим перетворювачем, чи перетворювачем з уніфікованим вихідним сигналом. Останнім часом в зарубіжній літературі з вимірювальної техніки такі пристрої називають кондиціонерами сигналів, а відповідні вимірювальні операції носять називається *кондиціонуванням вимірювального сигналу*. Дослівно англійський термін *conditioning* – означає покращувати стан, а термін *conditioned* – відповідний нормі чи стандарту. Тобто кондиціонований сигнал – це сигнал, що відповідає встановленим нормам.

Всі цифрові операції з опрацювання результатів перетворень АЦП здійснюється в мікропроцесорі відповідно до вибраної програми та команд, що можна вводити з клавіатури. Результати можуть відображатися у різній формі, запам'ятовуватися, реєструватися чи пересилатися до інших користувачів. Зазвичай аналогова та цифрова частини приладу гальванічно розділені (оптичним чи трансформаторним

зв'язком), чим забезпечується високий рівень захисту від завад спільного виду.

Завдяки відносній схемній простоті та можливості досягнення високих метрологічних властивостей АЦП з квантуванням частотно-часових параметрів приладобудівна промисловість багатьох країн світу серійно випускає на їх основі вимірювачі частоти, відношення частот, періоду, проміжків часу, фази. Основні технічні характеристики визначаються, у першу чергу, параметрами генератора опорної частоти та швидкодією елементної бази. Блок керування сучасних цифрових приладів виконується, здебільшого, на базі мікропроцесорів або однокристальних мікро-ЕОМ, що дає змогу легкого розширення їх функціональних можливостей. Тому вимірювачі частотно-часових параметрів є мультиметрами, призначені для вимірювання частоти, періоду, проміжків часу, відношення (різниці) частот, фази. Виготовляють високочастотні (діапазон вимірюваних сигналів до десятків – сотень гігагерц) та низькочастотні (починаючи від тисячних – десятитисячних герца) універсальні частотоміри.

Серед цифрових приладів найточнішим є вольтметри постійного струму на основі АЦП з інтегруючим перетворенням, в тому числі типу сигма-дельта. Завдяки інтегруючому перетворенню вхідного сигналу суттєво послаблюється вплив зовнішніх та внутрішніх завад та шумів.

Сучасні цифрові мультиметри дають можливість вимірювання напруги постійного струму, постійного струму, напруги змінного струму, змінного струму, електричного опору; діапазон вимірювання діючого значення напруги змінного струму частотою від  $1,5\text{Гц}$  до  $1\text{МГц}$  – від  $1\text{мкВ}$  до  $750\text{В}$  з похибкою не більшою  $\pm 0,015\%$ ; електричного опору постійного струму від  $10\text{мкОм}$  до  $1\text{ГОм}$  з похибкою не більшою  $\pm 0,00015\%$ . Технічна характеристика мультиметрів з ширшими функціональними можливостями: напруга постійного струму від  $100\text{нВ}$  до  $1000\text{В}$  з похибкою  $\leq \pm 0,002\%$ ; діюче значення напруги змінного струму від  $1\text{мкВ}$  до  $750\text{В}$  з похибкою  $\leq \pm 0,05\%$ ; постійний струм від  $1\text{мкА}$  до  $2\text{А}$  з похибкою  $\leq \pm 0,02\%$ ; діюче значення змінного струму від  $10\text{мкА}$  до  $2\text{А}$  з похибкою  $\leq \pm 0,05\%$ ; електричний опір з чотири- та дво-провідною лінією зв'язку від  $1\text{МОм}$  до  $20\text{МОм}$  з похибкою  $\leq \pm 0,002\%$ ; температуру в комплекті з платиновим термоперетворювачем опору від  $-200$  до  $+600\text{ }^\circ\text{C}$  з похибкою  $\leq \pm 0,1\text{ }^\circ\text{C}$ .

## Література

1. Паначевний Б.І., Свергун Ю.Ф. Загальна електротехніка: Підручник. – К.: Каравела, 2018. – 296 с.
2. Блантер С.Г., Суд И.И. Электрооборудование нефтяной и газовой промышленности. – М.: Недра, 1980.– 488 с.
3. Меньшов Б.Г., Ершов М.С., Яризов А.Д. Электротехнические установки и комплексы в нефтегазовой промышленности. – М.: Недра. 2000. – 437с.
4. Михайленко В.В., Маков Д.К., О.М. Скринник О.М. Конспект лекцій з навчальної дисципліни «Електротехніка та електроніка» для студентів всіх форм навчання. / Уклад.: В.В. Михайленко, Д.К. Маков, О.М. Скринник, Ю.М. Чуняк, Д.К. Зіменков, О.В. Петрученко – К.: НТУУ ”КПІ ім. Ігоря Сікорського” 2017. – 61 с.
5. Трегуб А.П. Электротехника. – К.: Вища шк., 1987. – 600 с.
6. Паначевний Б.І. Курс електротехніки: Підручник. – Харків: Торнадо, 1999. – 288 с.
7. Алиев И.И. Справочник по электротехнике и электрооборудованию.- М.: Высш. шк, 2002.- 255с.
8. Усатенко С.Т., Каченюк Т.К., Терехова М.В. Выполнение электрических схем по ЕСКД.- М.: Издательство стандартов, 1989.- 325с.
9. Справочник по электроснабжению и электрооборудованию: В 2 т. /Под общей ред. А.А.Федорова.- М.: Энергоатомиздат, Т1, 1986, Т2, 1987.
10. Молчанов Г.В., Молчанов А.Г. Машины и оборудование для добычи нефти и газа. – М.: Недра, 1984.
11. Николич А.С. Поршневые буровые насосы. – М.: Недра, 1973.

## ЗМІСТ

Вступ .....	3
1. Тема 1. Основні поняття та закони електротехніки. Електричні кола постійного струму .....	5
2. Тема 2. Лінійні однофазні кола змінного струму .....	10
3. Тема 3. Трифазні електричні кола .....	21
4. Тема 4. Трансформатори .....	27
5. Тема 5. Електричні апарати .....	39
6. Тема 6. Асинхронні машини .....	50
7. Тема 7. Синхронні машини .....	61
8. Тема 8. Машини постійного струму .....	66
9. Тема 9. Основи електроприводу. Типові режими роботи електроприводів .....	76
10. Тема 10. Системи електроприводів об'єктів НГП .....	89
11. Тема 11. Електропостачання об'єктів НГП .....	109
12. Тема 12. Перспективи розвитку електроенергетики в Україні .....	126
13. Тема 13. Основи електроніки .....	136
14. Тема 14. Електричні вимірювання .....	160
Рекомендована література .....	176