

**МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ І НАУКИ УКРАЇНИ
СУМСЬКИЙ НАЦІОНАЛЬНИЙ АГРАРНИЙ УНІВЕРСИТЕТ**

**Інженерно-технологічний факультет
Кафедра енергетики та електротехнічних систем**



МЕХАТРОНІКА ТА АТОМАТИЗАЦІЯ

КОНСПЕКТ ЛЕКЦІЙ

СУМИ – 2026

**МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ І НАУКИ УКРАЇНИ
СУМСЬКИЙ НАЦІОНАЛЬНИЙ АГРАРНИЙ УНІВЕРСИТЕТ**

**Інженерно-технологічний факультет
Кафедра енергетики та електротехнічних систем**

МЕХАТРОНІКА ТА АТОМАТИЗАЦІЯ

КОНСПЕКТ ЛЕКЦІЙ

**для здобувачів 3 та 2 с.т. курсів
за спеціальністю 208 «Агроінженерія»
освітньої програми
«Агроінженерія»
денної та заочної форми здобуття освіти
ступеню вищої освіти «Бакалавр»**

УДК 658.7:656

Укладачі:

Кравченко В. О., к.ф.-м.н, доцент, доцент кафедри енергетики та електротехнічних систем,

Вольвач Т.С., асистент кафедри енергетики та електротехнічних систем,

Савойський О.Ю., к.т.н., доцент, доцент кафедри енергетики та електротехнічних систем.

Мехатроніка та автоматизація: Конспект лекцій для здобувачів освітньої програми «Агроінженерія» денної та заочної форм здобуття освіти ступеню вищої освіти «Бакалавр» / укл.: В. О. Кравченко., Т. С. Вольвач, О. Ю. Савойський - Суми, 2026. – 115 с.

Конспект стане у нагоді здобувачам для підготовки до практичних занять та виконання самостійної роботи.

Рецензенти:

Сіренко Ю. В., Ph.D, доцент, доцент кафедри енергетики та електротехнічних систем СНАУ;

Калнагуз О. М., к.т.н., доцент кафедри агроінжинірингу СНАУ.

Відповідальний за випуск:

Юрченко О. Ю., Ph.D, доцент, завідувач кафедри енергетики та електротехнічних систем СНАУ.

Рекомендовано до видання Радою із забезпечення якості освітньої діяльності та якості вищої освіти інженерно-технологічного факультету СНАУ.

Протокол № 6 від «14» травня 2026 року

ЗМІСТ

ВСТУП	5
ТЕМАТИЧНИЙ ПЛАН.....	6
ТЕМА 1. ЕЛЕКТРИЧНЕ КОЛО ПОСТІЙНОГО СТРУМУ	7
ТЕМА 2. ЕЛЕКТРИЧНІ КОЛА ЗМІННОГО СТРУМУ	30
ТЕМА 3. ЕЛЕКТРОМАГНІТНІ ПРИСТРОЇ ТРАНСФОРМАЦІЇ ЕНЕРГІЇ....	42
ТЕМА 4. АСИНХРОННІ ЕЛЕКТРИЧНІ МАШИНИ	60
ТЕМА 5. ЗАГАЛЬНІ ВІДОМОСТІ ПРО ЕЛЕКТРОПРИВОД ВИРОБНИЧИХ МАШИН І МЕХАНІЗМІВ.....	84
ТЕМА 6. ЗАГАЛЬНІ ПОНЯТТЯ ПРО СИСТЕМИ АВТОМАТИЧНОГО КЕРУВАННЯ.....	91
ТЕМА 7. ЕЛЕМЕНТИ СИСТЕМ АВТОМАТИЧНОГО КЕРУВАННЯ	100
СПИСОК РЕКОМЕНДОВАНОЇ ЛІТЕРАТУРИ	116

ВСТУП

Конспект лекцій з дисципліни «Мехатроніка та автоматизація» розроблено для здобувачів вищої освіти спеціальності 208 «Агроінженерія» освітньої програми «Агроінженерія» денної та заочної форм здобуття освіти ступеня вищої освіти «Бакалавр».

Сучасне аграрне виробництво дедалі активніше впроваджує електротехнічні, електромеханічні, мехатронні та автоматизовані системи, які забезпечують підвищення продуктивності, енергоефективності, надійності й безпеки технологічних процесів. Ефективна експлуатація виробничих машин і механізмів потребує від фахівця не лише практичних навичок, а й розуміння принципів роботи електричних кіл, електромагнітних пристроїв, електричних машин, електроприводів та систем автоматичного керування.

Метою конспекту лекцій є формування у здобувачів базових теоретичних знань щодо будови, принципів дії, характеристик та особливостей використання електротехнічних і автоматизованих систем у виробничих процесах. Матеріал спрямований на засвоєння основ аналізу електричних кіл постійного і змінного струму, розуміння роботи трансформаторів та асинхронних електричних машин, ознайомлення з основами електропривода, а також із загальними принципами побудови систем автоматичного керування та їх елементної бази.

У конспекті послідовно розглянуто теми, що охоплюють основи електротехніки, електромеханіки й автоматики. Особливу увагу приділено практичному значенню цих питань для агроінженерії, зокрема застосуванню електроприводів, датчиків, первинних перетворювачів і систем керування у виробничих машинах, механізмах та технологічному обладнанні.

Конспект лекцій може бути використаний здобувачами під час аудиторної роботи, самостійного опрацювання навчального матеріалу, підготовки до практичних занять, модульного контролю, заліку або іспиту. Наведений матеріал сприяє формуванню системного уявлення про взаємозв'язок електротехнічних, механічних та автоматизованих складових сучасних технічних систем.

Засвоєння матеріалу дисципліни створює підґрунтя для подальшого вивчення спеціальних інженерних дисциплін, виконання курсових і кваліфікаційних робіт, а також для майбутньої професійної діяльності у сфері експлуатації, обслуговування, модернізації та впровадження автоматизованих технічних засобів в агропромисловому виробництві.

ТЕМАТИЧНИЙ ПЛАН

№ з/п	Назва розділу, теми	Кількість годин
		Денна форма
1	Тема 1. Електричне коло постійного струму	2
2	Тема 2. Електричні кола змінного струму	2
3	Тема 3. Електромагнітні пристрої трансформації енергії	2
4	Тема 4. Асинхронні електричні машини	2
5	Тема 5. Загальні відомості про електропривод виробничих машин і механізмів	2
6	Тема 6. Загальні поняття про системи автоматичного керування	2
7	Тема 7. Елементи систем автоматичного керування	2
	Разом годин:	14

ТЕМА 1. ЕЛЕКТРИЧНЕ КОЛО ПОСТІЙНОГО СТРУМУ

Перелік питань

- 1.1 Електричне коло і його елементи.
- 1.2 Класифікація електричних струмів, ЕРС і напруг.
- 1.3 Елементи електричних кіл і їхні графічні зображення.
- 1.4 Закон Ома.
- 1.5 Робота й потужність постійного струму.
- 1.6 Схеми з'єднання елементів кола.
- 1.7 Закони Кірхгофа.

1.1 Електричне коло і його елементи

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

Елементи кола, призначені для генерування електричної енергії, називають джерелами живлення або джерелами електричної енергії, а елементи, що використовують електричну енергію, – приймачами (споживачами) електричної енергії.

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

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

Зв'язуючою ланкою між джерелом і приймачем електричної енергії виступають передавальні елементи. До цієї групи належать електричні проводи, трансформатори, випрямлячі, прилади контролю і керування та ін.

1.2 Класифікація електричних струмів, ЕРС і напруг

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

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

Електричний струм, величина й напрям якого залишаються незмінними, називають постійним струмом (рис. 1.1, а) і позначають прописною літерою *I*.

Якщо за t секунд пройшло q кулонів електричного заряду, то сила постійного струму

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

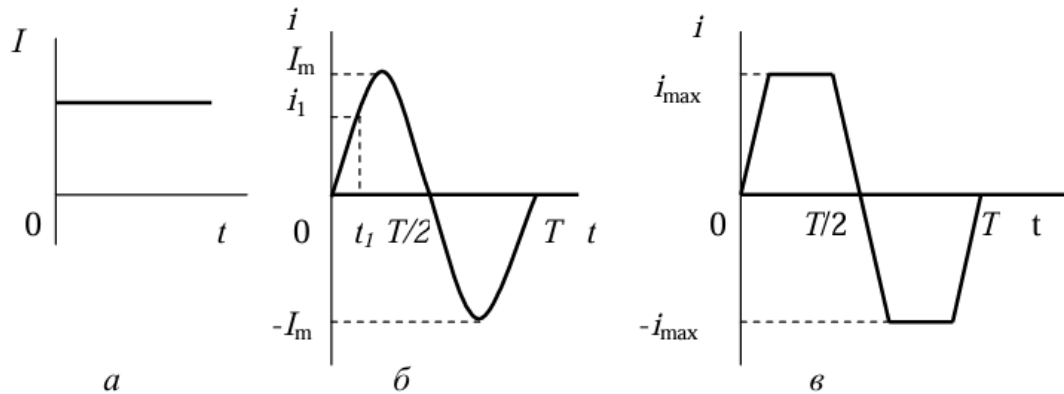


Рис. 1.1 – Різні форми кривих струму: постійний (а), періодичні (б і в)

Звідси заряд, що переносить постійний струм за час t , дорівнює

$$q = It. \quad (1.2)$$

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

$$i = dq/dt. \quad (1.3)$$

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

Форми кривих струмів, що змінюються, досить різноманітні. Домінуюче значення серед них мають періодичні струми. Періодичним називають такий струм, миттєві значення якого повторюються через рівні проміжки часу. Найменший проміжок часу, після закінчення якого миттєві значення струму повторюються, називають періодом і позначають літерою T . Кількість періодів за одну секунду називають частотою періодичного струму. Частоту вимірюють у Герцах (Гц) і позначають літерою f . Частота й період пов'язані співвідношенням

$$f = 1/T. \quad (1.4)$$

Струм, що змінюється за гармонійним законом, називають синусоїдальним струмом (рис. 1.1, б). Синусоїдальний струм промислової частоти 50 Гц прийнято називати змінним струмом, хоча в теорії кіл під змінним струмом розуміють будь-який струм, що змінює величину і напрям.

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

Найбільше значення синусоїдального струму називають амплітудою і позначають прописною літерою I з нижнім індексом t (I_m). Найбільше значення несинусоїдального струму позначають малою літерою i з нижнім індексом max (i_{max}).

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

Сукупність величин, що характеризують вплив на коло ЕРС і виникаючих в результаті цього впливу напруг і струмів, зумовлює режим роботи електричного кола та його елементів.

1.3 Елементи електричних кіл і їхні графічні зображення

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

Аналогічно називають і елементи кіл: «електрична машина постійного струму», «електрична машина змінного струму», «джерело постійного струму», «приймач змінного струму» та ін.

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

Електричні кола постійного і змінного струмів розрізняють також за способом з'єднання їхніх елементів – нерозгалужені й розгалужені кола, за кількістю джерел електричної енергії – кола з одним і кількома джерелами електричної енергії. Зустрічаються ще інші найменування кіл.

Електричне коло, що складається з лінійних елементів, називають лінійним колом. Електричне коло, до якого входить хоча б один нелінійний елемент, називають нелінійним колом. Розрахунок режимів нелінійних кіл досить громіздкий, тому, для спрощення, його виконують на лінійних ділянках характеристик нелінійних елементів (ділянка a-b характеристики 2 на рис. 1.2).

Приймачі електричної енергії як елементи електричного кола мають властивості поглинати електричну енергію з кола й перетворювати її на інші види енергії (необоротний процес), створювати свої магнітні й електричні

поля, енергії яких можуть накопичуватися і за певних умов повертатися назад до кола (оборотний процес). Щоб характеризувати ці властивості, вводять поняття параметрів елемента. Розрізняють наступні параметри елемента кола: опір, індуктивність і ємність.

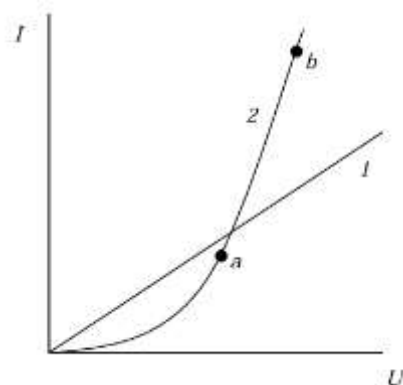


Рис. 1.2 – Характеристики елементів кола: 1 – лінійна, 2 – нелінійна

Опір (R) – параметр, що характеризує здатність елемента поглинати енергію з електричного кола й перетворювати її на інші види енергії (теплову або світлову). Відомо, що потужність (P , p) перетворення електричної енергії пропорційна квадрату струму (I^2 , i^2), тому величина цього параметра – опір – визначається відношенням $R = P/I^2$ для постійного струму і $R = p/i^2$ для змінного струму. Одиницею виміру опору є Ом.

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

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

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

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

Основну властивість джерела електричної енергії – здатність створювати й підтримувати різницю потенціалів на окремих ділянках кола, а також збуджувати й підтримувати електричний струм у замкненому колі –

характеризують його електрорушійною силою (ЕРС). Величина ЕРС (E , e) дорівнює тій енергії, що набуває позитивного заряду завбільшки 1 Кл, переміщуючись по джерелу під дією сторонніх сил. Якщо за час dt джерелом змінного струму проходить заряд $dq = i \cdot dt$, то енергія, що розвивається джерелом, $dW = e \cdot dq = e \cdot i \cdot dt$ і миттєва потужність $p = dW/dt = e \cdot i$. Для джерела постійного струму енергія і потужність, що розвиваються, відповідно дорівнюють: $W = E \cdot I \cdot t$ та $P = E \cdot I$.

Проходження струму джерелом супроводжується втратою енергії усе редині джерела на нагрівання. Ці втрати характеризуються параметром опору R . Тому параметр опору поряд з ЕРС є важливим параметром джерела. У певних випадках у джерелах змінного струму враховують також параметр індуктивності L .

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

Елементи кола, для опису роботи яких, окрім пасивних параметрів, необхідно вводити ЕРС або струм, називають активними. До активних елементів належать усі джерела електричної енергії і деякі приймачі, при описі процесів у яких не можна обмежитися тільки пасивними параметрами (акумулятори при зарядженні, двигуни постійного струму та ін.).

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

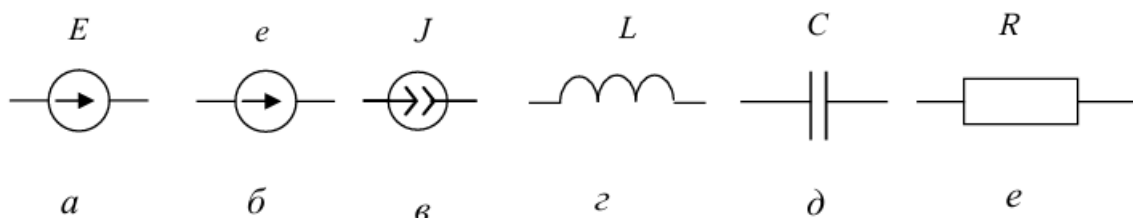


Рис. 1.3 – Графічні позначення ідеальних елементів: джерело ЕРС постійного струму (а), джерело ЕРС змінного струму (б), джерело струму (в), індуктивність (г), ємність (д), резистор (е)

Джерела електричної енергії поділяють на джерела ЕРС і джерела струму, схеми заміщення яких показані на рисунку 1.4. Властивості джерела

електричної енергії визначаються його вольт-амперною (зовнішньою) характеристикою – залежністю вихідної напруги від струму $U(I)$.

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

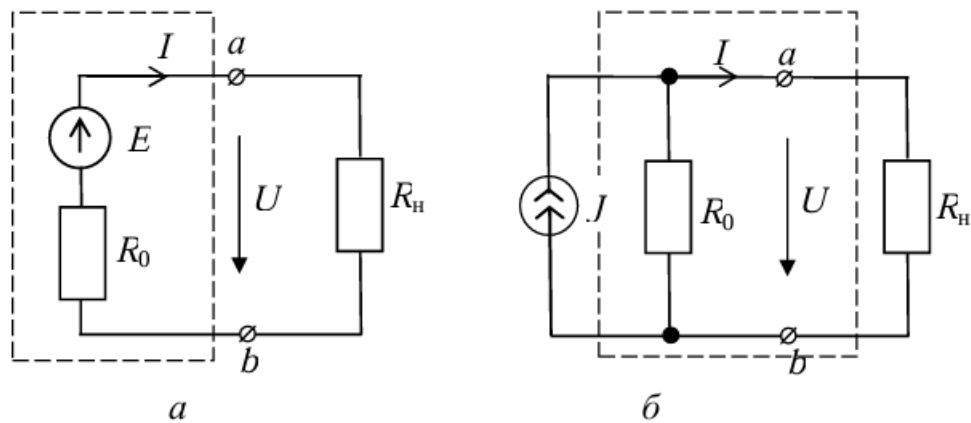


Рис. 1.4 – Схеми заміщення джерел ЕРС (а) і струму (б)

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

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

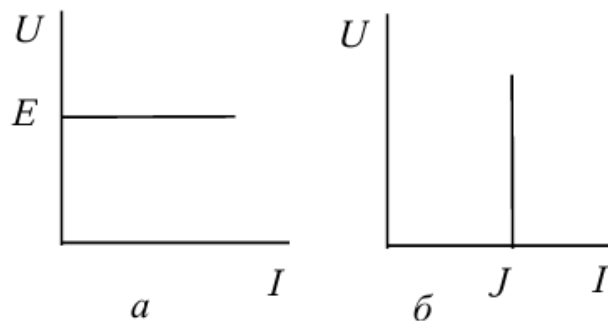


Рис. 1.5 – Зовнішні характеристики: а – ідеального джерела ЕРС; б – ідеального джерела струму

Джерело з великим внутрішнім опором можна замінити ідеалізованою моделлю, в якій $R_0 = \infty$ і $E = \infty$ і для якої є справедливим вираз $E/R_0 = J$. Таке

джерело називають ідеальним джерелом струму з од ним параметром J . Струм джерела струму не залежить від напруги на його вихідних затискачах, а його зовнішня характеристика має вигляд прямої $I=J = \text{const}$ (рис. 1.5, б).

Графічне зображення електричного кола за допомогою умовних позначень його елементів називають схемою кола. Елементи електричних кіл на схемах зображають за допомогою умовних графічних позначень. Схеми дозволяють отримати наочне уявлення щодо структури електричного кола, по рядку з'єднання його елементів.

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

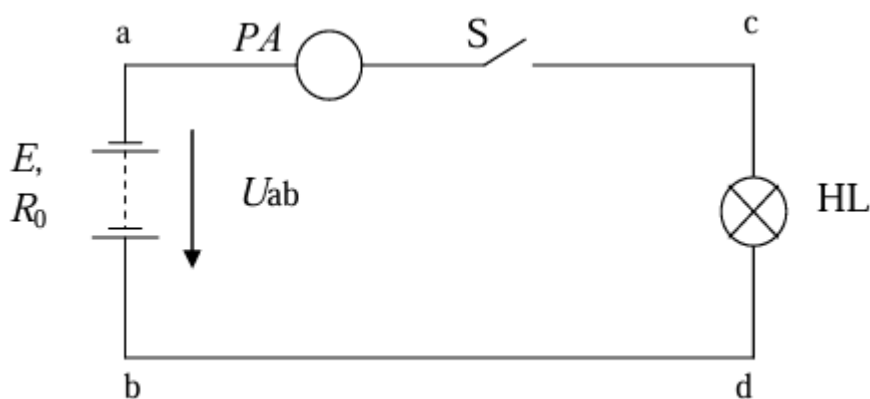


Рис. 1.6 – Схема найпростішого електричного кола

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

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

Ідеальні елементи у схемі заміщення дозволяють врахувати параметри, які істотно впливають на фізичні процеси в колі. Параметри реальних елементів, що не мають істотного впливу на фізичні процеси, при цьому не враховують. Наприклад, для урахування необоротного процесу поглинання енергії елементом кола до схеми заміщення вводять резистивний елемент. Індуктивні та ємнісні елементи вводять до схеми заміщення в тому випадку, коли хочуть врахувати вплив магнітного або електричного поля.

Елемент кола можна зобразити різними схемами заміщення залежно від того, для яких цілей ця схема призначена. Наприклад, індуктивну котушку в колі постійного струму для врахування її нагріву подають у схемі заміщення тільки одним резистивним елементом. Але при вивченні фізичних процесів у котушці зі змінними струмами її представляють послідовно з'єднаними

резистивним та індуктивним ідеальними елементами. А у випадку роботи котушки в колах високої частоти для неї складають схему заміщення з резистивного, індуктивного та ємнісного елементів.

При розробці проектної і конструкторської документації на електрообладнання застосовують електричні схеми, які, на відміну від схем заміщення, виконують у повній відповідності з чинними на певний момент часу стандартами, наприклад, стандартами ЄСКД – Єдиної системи конструкторської документації. При розробці стандартів на правила оформлення графічних документів ураховують рекомендації міжнародних організацій: ІСО (Міжнародна організація із стандартизації), МЕК (Міжнародна електротехнічна комісія) та ін. Розрізняють схеми електричні принципові, структурні, функціональні, монтажні.

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

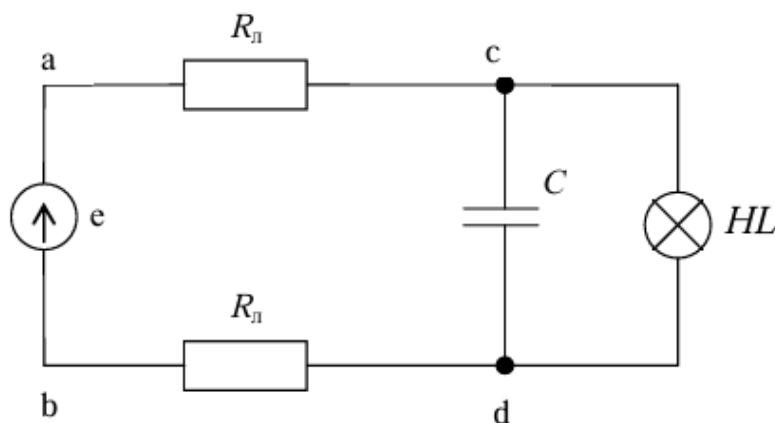


Рис. 1.7 – Схема кола змінного струму

Джерело живлення утворює внутрішню ділянку кола, а приймачі разом із сполучними проводами-зовнішню ділянку кола, або просто зовнішнє коло. Затискачі (полюси) a й b джерела, до яких приєднують зовнішнє коло, називають вихідними затискачами (полюсами) джерела. Затискачі a й b одночасно є і входними затискачами зовнішнього кола.

У деяких випадках зовнішнє коло розбивають на дві характерні ділянки: лінію електропередачі (сполучні проводи) і споживач електричної енергії (електроприймач). На рисунку 1.7 ділянки a - c і b - d утворюють лінію електропередачі з опором $2R_{\text{л}}$, а ділянка c - d з підключеними конденсатором C і лампою розжарювання HL є електроприймачем. У цьому разі затискачі c - d – це входні затискачі електроприймача.

Затискачі зовнішнього кола, за допомогою яких його приєднують до проводів, що йдуть від джерела, називають входними затискачами (полюсами) зовнішнього кола.

Частину кола, що має два полюси, називають двополюсником. Розрізняють двополюсники активні (що містять джерела) й пасивні (що не містять джерела).

З'єднання елементів мережі, при якому сила струму на всіх ділянках однакова, називають послідовним з'єднанням. Будь-який замкнений шлях, що проходить кількома послідовно з'єднаними ділянками, називають контуром електричного кола.

Ділянку кола, уздовж якої на будь-який момент часу струм має однакове значення, називають гілкою, а місце з'єднання трьох або більшої кількості гілок – вузлом.

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

1.4 Закон Ома

У 1827 р. німецький вчений Ом експериментально вивів закон, що встановлює залежність між трьома основними параметрами електричного кола: струмом, напругою та опором. Закон Ома для всього кола формулюється в такий спосіб: сила струму в електричному колі прямо пропорційна величині ЕРС джерела й зворотно пропорційна повному опору кола:

$$I = \frac{E}{R_{\Pi}}, \quad (1.5)$$

де I – сила струму в колі, А;

E – ЕРС джерела, В;

R_{Π} – повний опір кола, Ом.

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

$$R_{\Pi} = R_H + R_L + R_0. \quad (1.6)$$

Для окремої ділянки кола закон Ома має вигляд

$$I = \frac{U}{R}, \quad (1.7)$$

де I – сила струму на ділянці кола, А;

U – напруга (падіння напруги) на цій ділянці, В;

R – електричний опір ділянки кола, Ом.

З закону Ома випливає, що

$$U = I \cdot R, \quad (1.8)$$

тобто падіння напруги U (іноді позначається ΔU) на ділянці кола прямо пропорційне силі струму та величині опору. Таким чином, якщо на ділянці

кола з незмінним опором зростає сила струму, то падіння напруги на цій ділянці збільшилось.

З закону Ома також випливає, що

$$R = \frac{U}{I}. \quad (1.9)$$

Співвідношення (1.9) дозволяє обчислити величину опору ділянки кола за відомими величинами прикладеної до неї напруги й сили струму в ній. Відмітимо, що співвідношення (1.9) не можна розглядати як залежність величини електричного опору від падіння напруги або від сили струму. Відомо, що електричний опір провідника залежить від його геометричних розмірів та від температури. Однак вираз (1.9) дає можливість дослідним шляхом установити величину опору провідника шляхом виміру сили струму і падіння напруги на ньому.

1.5 Робота й потужність постійного струму.

Робота електричного струму. При проходженні електричного струму провідником здійснюється робота з переміщення зарядів. З курсу фізики відомо, що робота, виконана електричним струмом на ділянці кола, прямо пропорційна падінню напруги на цій ділянці, силі струму й часу, протягом якого проходить цей струм:

$$A = U \cdot I \cdot t. \quad (1.10)$$

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

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

З формули (1.10), використовуючи різні форми запису закону Ома можна одержати наступні співвідношення:

$$A = I^2 \cdot R \cdot t; \quad (1.11)$$

$$A = \frac{U^2 \cdot t}{R}. \quad (1.12)$$

Залежно від типу споживача процес здійснення роботи електричним струмом супроводжується перетворенням електричної енергії на теплову (у нагрівальних приладах), на механічну (в електродвигунах) або світлову (в освітлювальних приладах).

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

$$P = \frac{A}{t}. \quad (1.13)$$

З виразу (1.13) можемо записати

$$P = U \cdot I, \quad (1.14)$$

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

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

Із співвідношення (1.14) шляхом нескладних перетворень можна отримати наступні формули для розрахунку потужності:

$$P = I^2 \cdot R; \quad (1.15)$$

$$P = \frac{U^2}{R}. \quad (1.16)$$

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

$$P_{\text{п}} = E \cdot I_{\text{н}}. \quad (1.17)$$

Оскільки ЕРС джерела дорівнює сумі падінь напруг на зовнішній і внутрішній ділянках кола, можемо записати

$$P_{\text{п}} = (U + U_0) I_{\text{н}} = U \cdot I_{\text{н}} + U_0 \cdot I_{\text{н}}. \quad (1.18)$$

Величина $U \cdot I_{\text{н}}$ виражає потужність, що розвивається на зовнішній ділянці кола, тобто потужність, спожиту навантаженням. Вона називається корисною потужністю (потужність навантаження):

$$P_{\text{н}} = U \cdot I_{\text{н}}. \quad (1.19)$$

Величина $U_0 \cdot I_{\text{н}}$ виражає потужність, що витрачається усередині джерела і називається потужністю втрат:

$$P_{\text{втр}} = U_0 \cdot I_{\text{н}}. \quad (1.20)$$

У практичних розрахунках у схемі заміщення часто враховують і опір лінії $R_{\text{л}}$. У цьому випадку потужність втрат визначають як

$$P_{\text{втр}} = U_0 \cdot I_{\text{н}} + U_{\text{л}} \cdot I_{\text{н}} = I_{\text{н}}^2 \cdot (R_0 + R_{\text{л}}). \quad (1.21)$$

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

$$P_{\text{п}} = P_{\text{н}} + P_{\text{втр}}. \quad (1.22)$$

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

$$\eta = \frac{P_{\text{н}}}{P_{\text{п}}}, \text{ або у відсотках } \eta = \frac{P_{\text{н}}}{P_{\text{п}}} 100\%. \quad (1.23)$$

Коефіцієнт корисної дії (ККД) можна виразити і через інші величини, що характеризують електричне коло :

$$\eta = \frac{P_H}{P_{\Pi}} = \frac{U \cdot I_H}{E \cdot I_H} = \frac{U}{E}, \quad (1.24)$$

або

$$\eta = \frac{P_H}{P_H + P_0} = \frac{I_H^2 \cdot R_H}{I_H^2 \cdot R_H + I_H^2 \cdot R_0} = \frac{R_H}{R_H + R_0}, \quad (1.25)$$

або

$$\eta = \frac{U}{E} = \frac{E - U_0}{E} = 1 - \frac{U_0}{E} = 1 - \frac{I_H \cdot R_0}{I_{K3} \cdot R_0} = 1 - \frac{I_H}{I_{K3}}. \quad (1.26)$$

На рисунку 1.8 показаний графік залежності ККД джерела від струму навантаження. При холостому ході струм дорівнює нулю і ККД дорівнює 1. При короткому замиканні струм досягає максимального значення, але ККД при цьому дорівнює нулю, оскільки ніякої корисної роботи джерело не виконує, і вся енергія витрачається усередині джерела.

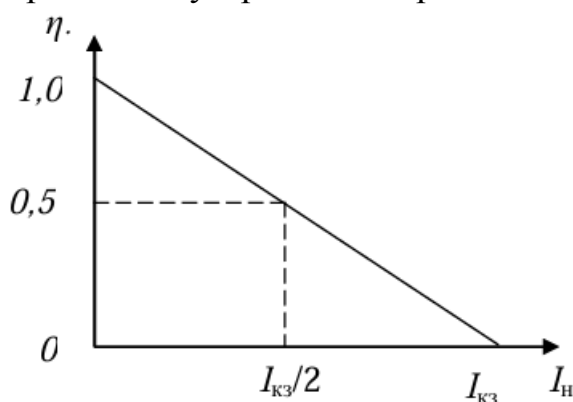


Рис. 1.8 – Залежність $\eta = f(I_H)$

Рівність ККД при холостому ході одиниці означає, що при наближенні режиму роботи джерела до режиму холостого ходу його ККД наближається до одиниці. Це має місце тоді, коли опір навантаження багаторазово перевищує внутрішній опір джерела. Втрати енергії усередині джерела в цьому випадку значно менші за корисну потужність.

Із графіка видно, що при дотриманні умови одержання максимальної корисної потужності від джерела при $I_H = I_{K3}/2$ його ККД становить усього 0,5.

Електричні генератори силових установок розраховані на роботу в режимах, що забезпечують максимально високий ККД. У сучасних генераторів він досягає 98–99%.

Теплова дія струму. При проходженні електричного струму провідником, останній нагрівається. Тобто в провіднику відбувається перетворення електричної енергії на теплову. Фізична сутність явища полягає в тому, що носії зарядів, що рухаються упорядковано, зіштовхуючись з атомами речовини, віддають їм частину своєї енергії. За рахунок цього тепловий рух останніх стає більш інтенсивним. Наприклад, у металах „вільні” електрони співударяються з іонами кристалічних ґрат і віддають їм частину своєї

кінетичної енергії, у зв'язку з цим коливальний рух іонів підсилюється і, як наслідок, зростає температура провідника.

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

$$Q = A = U \cdot I \cdot t \text{ або } Q = I^2 \cdot R \cdot t. \quad (1.27)$$

Кількість тепла тут виражається в джоулях.

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

Кількість тепла, що виділяється у провіднику при проходженні ним електричного струму, яка виражена в калоріях, розраховується як

$$Q = 0,24 \cdot I^2 \cdot R \cdot t. \quad (1.28)$$

Співвідношення (1.28) вперше було отримано дослідним шляхом незалежно один від одного англійським вченим Д. П. Джоулем (1841 р.) і вченим Е. Х. Ленцем (1842 р.) і називається закон Джоуля-Ленца – кількість тепла, яка виділена електричним струмом у провіднику, прямо пропорційна квадрату сили струму, величині опору провідника і часу, протягом якого проходить струм. Окрім формули (1.28) закон Джоуля-Ленца може бути виражений наступними формулами:

$$Q = 0,24 \cdot U \cdot I \cdot t \text{ або } Q = 0,24 \frac{U^2}{R} t. \quad (1.29)$$

Оскільки у системі СІ теплова енергія вимірюється в джоулях, то закон Джоуля-Ленца записують у вигляді:

$$Q = I^2 \cdot R \cdot t \quad (1.30)$$

1.6 Схеми з'єднання елементів кола

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

Послідовне з'єднання елементів кола. При послідовному з'єднанні n елементів струми заданої (рис. 1.9, а) і еквівалентної (рис. 1.9, б) схем будуть однаковими. Тому для них можна написати рівняння

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

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

і визначити з нього еквівалентний опір:

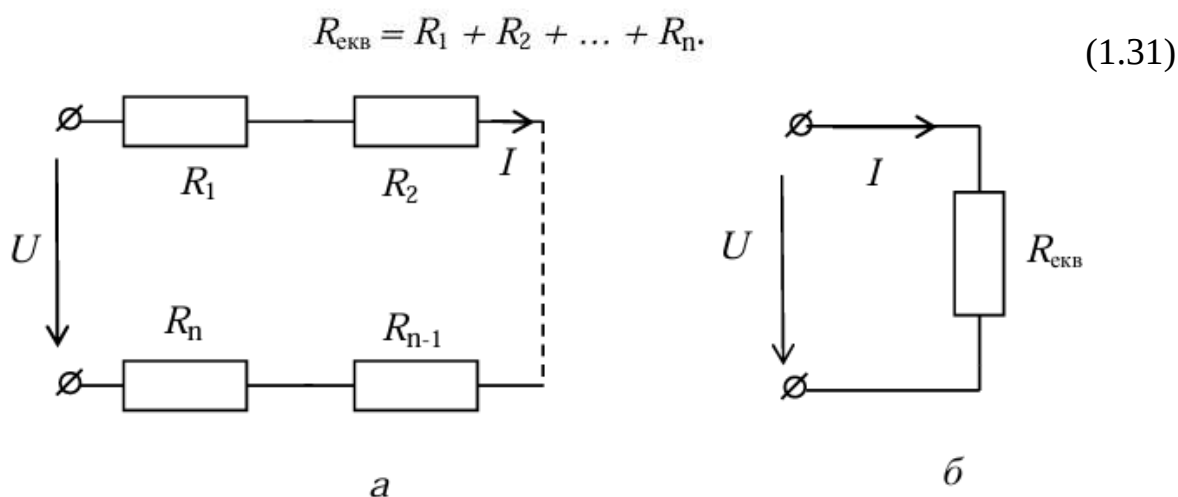


Рис. 1.9 – Схема кола з послідовним з'єднанням активних опорів (а) і її еквівалентний опір (б)

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

для струму

$$I = U/R_{\text{екв}}; \quad (1.32)$$

для напруги n-го елемента

$$U_n = R_n \cdot U/R_{\text{екв}}; \quad (1.33)$$

для потужності споживання енергії n-м елементом

$$P_n = R_n \cdot I^2 = R_n \cdot U^2/R_{\text{екв}}^2. \quad (1.33)$$

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

1. З рівнянь (1.32) і (1.33) видно, що між напругою на вході схеми, струмом і напругою її окремих елементів є лінійна залежність. Усяка зміна напруги U в k разів спричиняє зміну струму й напруги кожного елемента теж в k разів. Потужність усього кола і його окремих елементів змінюється при цьому в k^2 разів.

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

Повна взаємозалежність режимів роботи послідовно з'єднаних елементів є характерною ознакою цього з'єднання.

Послідовне з'єднання приймачів використовують у тому випадку, коли їхні номінальні напруги нижчі за напругу мережі. Якщо, наприклад, приймачі

мають номінальні напруги 110 В, а напруга мережі 220 В, то ці приймачі можна з'єднати послідовно і ввімкнути під напругу мережі. Однак при цьому необхідно мати на увазі, що опір приймача зворотно пропорційний його номінальній потужності $R = U_n^2/P_n$. Тому приймач великої номінальної потужності працюватиме з недовантаженням, а приймач малої номінальної потужності – з перевантаженням. Послідовно з'єднані приймачі з однаковими номінальними напругами матимуть найкращі умови роботи при однакових номінальних потужностях.

Послідовні з'єднання елементів досить часто застосовують у різних галузях техніки. Наприклад, при використанні двигунів постійного струму послідовно з колом якоря включають резистори з регульованими опорами для обмеження пускового струму і для регулювання швидкості.

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

Паралельне з'єднання елементів кола. На рисунку 1.10, а показано схему з n пасивними гілками, які приєднані до двох вузлів, різниця потенціалів між якими дорівнює напрузі U джерела. Таким чином, струм у кожній n -й гілці визначається напругою між вузлами й опором цієї гілки R_n або її провідністю $G_n = 1/R_n$:

$$\left. \begin{aligned} I_1 &= \frac{U}{R_1} = G_1 U \\ I_n &= \frac{U}{R_n} = G_n U \end{aligned} \right\}. \quad (1.34)$$

Та обставина, що паралельне з'єднання забезпечує однакову напругу на всіх включених приймачах і їхні незалежні один від одного режими роботи, є важливою перевагою цього з'єднання, завдяки якій воно знайшло широке застосування. Зазвичай, усі приймачі електричної енергії включають у мережу паралельно. Для характеристики роботи паралельного кола визначимо його еквівалентний опір. Умови еквівалентності будуть дотримані, якщо струм $I_{\text{екв}}$, що протікає еквівалентним колом (рис. 1.10, б), дорівнюватиме струму I (рис. 1.10, а) у нерозгалуженій частині кола або сумі струмів окремих паралельних гілок:

$$I_{\text{екв}} = I = I_1 + I_2 + \dots + I_n. \quad (1.35)$$

Підставимо в це рівняння значення струмів з (1.34) і одержимо вираз

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

з якого можна вивести формулу еквівалентної провідності:

$$G_{\text{екв}} = G_1 + G_2 + \dots + G_n = \sum G_k, \quad (1.36)$$

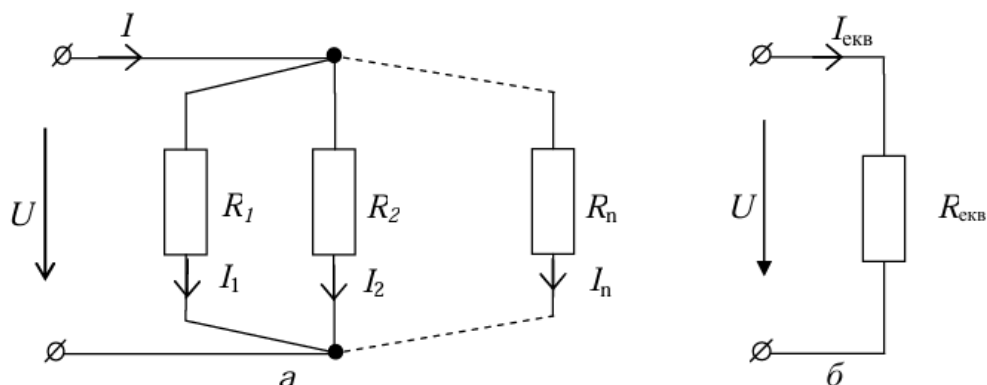


Рис. 1.10 – Схема кола з паралельним з'єднанням резистивних елементів (а) і її еквівалентна схема (б)

або формулу еквівалентного опору

$$\frac{1}{R_e} = \frac{1}{R_1} + \frac{1}{R_2} + \dots + \frac{1}{R_n} = \sum_{i=1}^n \frac{1}{R_i}. \quad (1.37)$$

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

$$R_{екв} = 1/G_{екв}, \quad (1.38)$$

тому він завжди менший найменшого з опорів гілок.

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

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

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

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

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

$$R_{екв} = R_1 \cdot R_2 / (R_1 + R_2). \quad (1.39)$$

Струми гілок цього кола дорівнюють:

$$\left. \begin{aligned} I_1 &= \frac{U}{R_1} = R_{\text{екв}} \frac{I}{R_1 + R_2} \\ I_2 &= \frac{U}{R_2} = R_1 \frac{I}{R_1 + R_2} \end{aligned} \right\} \quad (1.40)$$

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

Змішане з'єднання елементів кола. Змішаним з'єднанням елементів називають сполучення їх послідовних і паралельних з'єднань. Найбільш простим і розповсюдженим у практиці змішаним з'єднанням є коло звичайного паралельного підключення приймачів до розподільного щитка при приєднанні цього щитка до джерела живлення за допомогою проводів.

Схеми змішаного з'єднання різних електротехнічних пристроїв досить різноманітні. Як приклад розглянемо схему на рисунку 1.11, а.

Нехай усі опори резистивних елементів гілок і напруга на вході цієї схеми задані й потрібно визначити струми її окремих ділянок. Для розрахунку скористаємося методом еквівалентних перетворень, за яким окремі ділянки схеми з паралельно або послідовно з'єднаними елементами замінюють одним еквівалентним елементом. Поступовим перетворенням ділянок схему спрощують і приводять до найпростішої схеми, що складається з одного еквівалентного елемента. Так, гілки з опорами R_4 і R_5 , схеми на рисунку 1.11, а з'єднані паралельно, і їх можна замінити однією еквівалентною гілкою з опором

$$R_{43} = \frac{R_4 \cdot R_5}{R_4 + R_5} \quad (1.41)$$

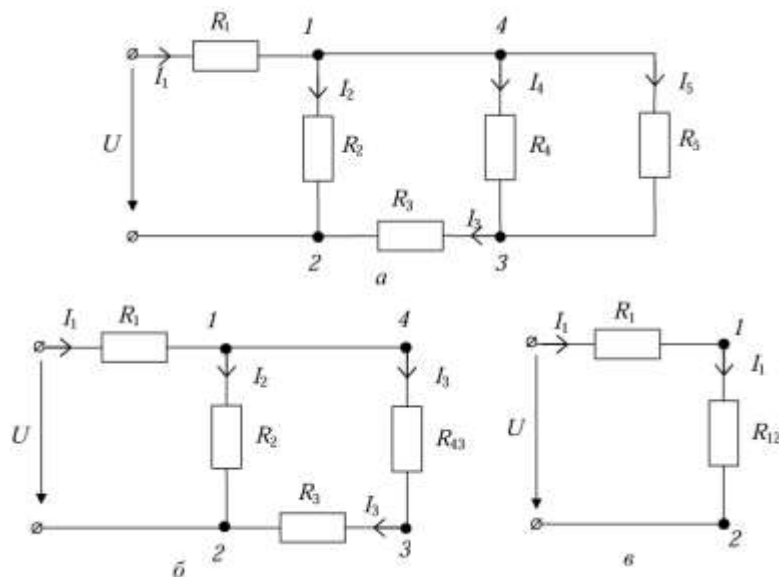


Рис. 1.11 – Схема кола із змішаним з'єднанням резистивних елементів (а) і еквівалентні їй схеми (б) і (в)

Після цього схема трохи спрощується і має вигляд схеми на рисунку 1.11, б, елементи якої з опорами R_3 і R_{43} з'єднані послідовно. У свою чергу гілка 1-4-3-2 з'єднана паралельно з гілкою R_2 , тому еквівалентний опір обох гілок ділянки 1-2

$$R_{12} = \frac{R_2 (R_3 + R_{43})}{R_2 + R_3 + R_{43}}. \quad (1.42)$$

Резистивний елемент з опором R_{12} з'єднаний послідовно з резистивним елементом з опором R_1 , як зазначено на схемі (рис. 1.11, в). Загальний, або вхідний опір цієї схеми $R_{\text{вх}} = R_{12} + R_1$ дає можливість визначити загальний струм вихідної схеми на (рис. 1.11, а):

$$I_1 = U / R_{\text{вх}}. \quad (1.43)$$

Потім, повертаючись до схеми на рисунку 1.11, в, можна знайти на пругу на ділянці 1-2:

$$U_{12} = R_{12} \cdot I_1$$

і струми в резисторах R_2 і R_3 схеми на рисунку 1.11, б:

$$I_2 = U_{12} / R_2 \quad \text{і} \quad I_3 = U_{12} / (R_{43} + R_3). \quad (1.44)$$

Струм I_3 проходить також еквівалентним елементом з опором R_{43} , падіння напруги на якому дорівнює напрузі на ділянці 4-3 вихідної схеми (рис. 1.11, а):

$$U_{43} = I_3 \cdot R_{43}.$$

Знаючи напругу U_{43} , можна знайти струми інших гілок:

$$I_4 = U_{43} / R_4 \quad \text{і} \quad I_5 = U_{43} / R_5. \quad (1.45)$$

Розглянутий вище порядок розрахунку схеми із змішаним з'єднанням пасивних елементів одержав назву методу еквівалентного перетворення. Суть цього методу, як видно з наведеного вище прикладу, збігається до послідовного спрощення схеми з'єднання пасивних елементів шляхом заміни ділянок з послідовним або паралельним з'єднанням елементів їхніми еквівалентними схемами, одержаними з рівнянь для ділянок з послідовним або рівнянь (1.36) і (1.37) для ділянок з паралельним з'єднанням елементів.

Еквівалентні перетворення з'єднань пасивних елементів «зіркою» і «трикутником». Зустрічаються схеми із складним з'єднанням елементів, які не можна віднести ні до паралельного, ні до послідовного з'єднання. Розглянемо одну з таких схем, коли її частина утворює «трикутник», вершинами якого є три вузли, а сторонами – три пасивних гілки, включені між цими вузлами (рис. 1.12, а). Для спрощення розрахунку подібних схем у багатьох випадках буває зручно замінити «трикутник» еквівалентною трипроменевою «зіркою» (рис. 1.12, б) скориставшись наступними співвідношеннями :

$$R_1 = \frac{R_{12} \cdot R_{31}}{R_{12} + R_{23} + R_{31}}; \quad (1.46)$$

$$R_2 = \frac{R_{23} \cdot R_{12}}{R_{12} + R_{23} + R_{31}}; \quad (1.47)$$

$$R_3 = \frac{R_{31} \cdot R_{23}}{R_{12} + R_{23} + R_{31}}. \quad (1.48)$$

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

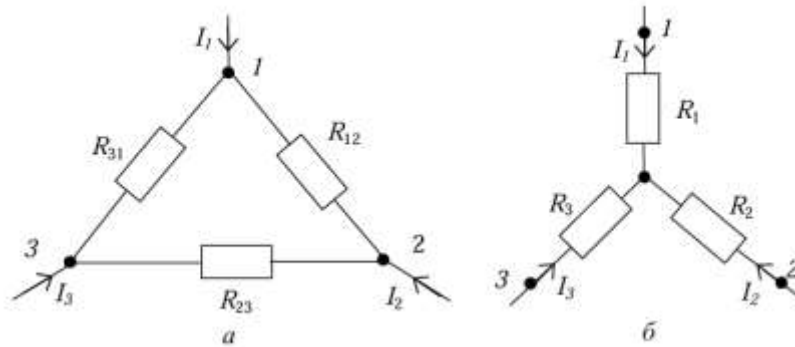


Рис. 1.12 – Еквівалентні з'єднання резисторів «трикутником» (а) і «зіркою» (б)

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

При заміні трипроменевої «зірки» еквівалентним «трикутником» опори резисторів «трикутника» R_{12} , R_{23} , R_{31} можна визначити за відомими опорами резисторів «зірки» R_1 , R_2 , R_3 , скориставшись наступними співвідношеннями:

$$\left. \begin{aligned} R_{12} &= R_1 + R_2 + \frac{R_1 \cdot R_2}{R_3}; \\ R_{23} &= R_2 + R_3 + \frac{R_2 \cdot R_3}{R_1}; \\ R_{31} &= R_3 + R_1 + \frac{R_3 \cdot R_1}{R_2}. \end{aligned} \right\} \quad (1.49)$$

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

1.7 Закони Кірхгофа

У теорії електричних кіл важливе значення мають експериментально встановлені в 1845 р. німецьким фізиком Г. Р. Кірхгофом закони, що мають назву 1-го й 2-го законів Кірхгофа.

Перший закон Кірхгофа формулюють у такий спосіб: алгебраїчна сума струмів, що сходяться у вузлі, дорівнює нулю. Для випадку постійних струмів математичний запис першого закону Кірхгофа має вигляд

$$\sum_{k=1}^n I_k = 0. \quad (1.50)$$

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

Якщо до вузла підключені кілька генераторів струму, то сума струмів, що генеруються ними, $\sum I_r$ повинна з відповідними знаками бути присутньою у лівій частині рівняння (1.50).

Приймемо для схеми на рисунку 1.13 струми, що входять до вузла d, позитивними (I_r і I_1), а струми, що виходять з вузла – негативними (I_2 і I_3). Тоді можемо записати наступне рівняння за першим законом Кірхгофа

$$I_r + I_1 - I_2 - I_3 = 0, \quad (1.51)$$

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

$$I_r + I_1 = I_2 + I_3, \quad (1.52)$$

що відповідає 2-му формулюванню першого закону Кірхгофа, або легко отримується шляхом перетворення співвідношення (1.52).

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

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

$$\sum U_{mn} = 0. \quad (1.53)$$

При цьому умовно вважають позитивними напруги, напрями яких збігаються з напрямом обходу контуру, їх вводять до виразу з позитивними знаками, а напруги, напрями яких протилежні напрямку обходу, – з негативними знаками.

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

$$\sum I \cdot R = \sum E. \quad (1.54)$$

Порядок аналізу кіл. Застосування першого й другого законів Кірхгофа для аналізу електричних кіл дозволяє виконати розрахунок практично будь-якого кола. Як правило, при дослідженні відомі ЕРС і опори усіх елементів схеми й потрібно знайти значення струмів і потужностей у гілках схеми. Порядок розрахунку розглянемо на прикладі схеми кола, що показана на рисунку 1.13.

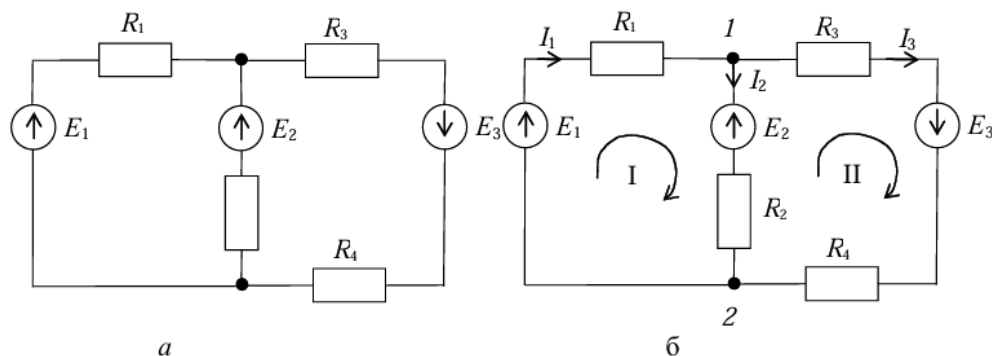


Рис. 1.13 – Схема електричного кола: а – вихідна; б – з нанесеними позначеннями вузлів, струмів і напрямів обходу контурів

1. На вихідну схему довільно наносимо напрями струмів у гілках (на рис. 1.13, б струми I_1 , I_2 і I_3). Якщо в гілці є ЕРС, то напрям струму краще задати співпадаючим з напрямом цієї ЕРС. Наносимо позначення вузлів (вузли 1 і 2 на рис. 1.13, б).

2. Визначаємо кількість вузлів n , гілок m і незалежних контурів k .

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

3. Для незалежних контурів довільно задаємо напрям обходу (на рис. 1.13, б контури I і II, напрям обходу за годинниковою стрілкою).

Для визначення невідомих струмів у гілках треба скласти систему лінійних алгебраїчних рівнянь, кількість яких дорівнює кількості невідомих струмів. За першим законом Кірхгофа можна скласти $n-1$ незалежних рівнянь. Використати всі n рівнянь неможливо, оскільки одне з них обов'язково буде залежним. Це пов'язано з тим, що струми гілок увійдуть до рівнянь, які складені для всіх n вузлів, двічі, причому з різними знаками (зі знаком «-» при записі струму спрямованого від одного вузла, і зі знаком «+» при записі цього ж струму, спрямованого до другого вузла). При додаванні всіх рівнянь ліва й права частини дорівнюватимуть нулю, а це означає, що одне з рівнянь можна одержати складанням $n-1$ рівнянь і заміною знаків усіх струмів на протилежні.

Таким чином, n -не рівняння завжди буде залежним, тому використати його для визначення струмів не можна.

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

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

6. Розв'язуємо отриману систему лінійних алгебраїчних рівнянь відносно невідомих струмів у гілках.

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

$$\sum E \cdot I = \sum I^2 \cdot R, \quad (1.55)$$

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

Схема електричного кола на рисунку 1.13, а містить два вузли ($n = 2$), три гілки ($m = 3$) і два незалежних контури:

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

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

$$I_1 - I_2 - I_3 = 0. \quad (1.56)$$

За другим законом Кірхгофа необхідно скласти два рівняння для двох незалежних контурів (на схемі рис. 1.13, б контури I і II). З урахуванням прийнятих напрямів обходу контурів ці рівняння мають вигляд:

для контуру I

$$R_1 \cdot I_1 + R_2 \cdot I_2 = E_1 - E_2; \quad (1.57)$$

для контуру II

$$-R_2 \cdot I_2 + (R_3 + R_4) \cdot I_3 = E_2 + E_3. \quad (1.58)$$

При складанні рівнянь (1.57), (1.58) зі знаком плюс записуємо ті доданки, у яких струм і ЕРС мають напрями, що збігаються з напрямом обходу контуру.

Розв'язуючи систему рівнянь (1.56), (1.57) і (1.58), можна визначити невідомі струми (три рівняння, три невідомих I_1 , I_2 , I_3). Якщо в результаті розв'язання цих рівнянь вийдуть від'ємні значення струмів, то це означає, що

істинні напрями струмів у гілках кола протилежні напрямом, прийнятим на рисунку 1.13, б.

Складаємо рівняння балансу потужностей і виконуємо перевірку рішення. Для нашого випадку (рис. 1.13, б) рівняння балансу потужностей має вигляд

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

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

Контрольні питання

1. Що розуміють під електричним колом? Під ділянкою кола?
2. Назвіть основні елементи електричного кола і їхнє призначення.
3. Що розуміють під електричним струмом?
4. Які існують види електричного струму? В яких одиницях його вимірюють?
5. Що розуміють під ЕРС? В яких одиницях її вимірюють?
6. Чим відрізняється амплітудне значення змінного струму від максимального значення змінного струму? Чим відрізняються власні струми в цьому випадку?
7. Дайте визначення закону Ома для всього кола.
8. В яких режимах може працювати джерело?
9. Поясніть закон Джоуля-Ленца.
10. Запишіть формули еквівалентного перетворення «зірки» на «трикутник», «трикутника» на «зірку».
11. Поясніть фізичний зміст першого (другого) закону Кірхгофа.
12. Скільки незалежних рівнянь можна скласти за першим законом Кірхгофа для схеми довільної конфігурації?
13. Скільки незалежних рівнянь можна скласти за другим законом Кірхгофа для схеми довільної конфігурації?
14. Поясніть алгоритм знаходження невідомих струмів для схеми довільної конфігурації за першим і другим законами Кірхгофа.

ТЕМА 2. ЕЛЕКТРИЧНІ КОЛА ЗМІННОГО СТРУМУ

Перелік питань

- 2.1 Основні відомості про змінний струм
- 2.2 Елементи схем заміщення зі змінними струмами
- 2.3 Діючі й середні значення періодичних напруг і струмів
- 2.4 Активні й реактивні складові провідності й струму
- 2.5 Підвищення коефіцієнта потужності в колах змінного струму

2.1 Основні відомості про змінний струм

Кола із змінними струмами, порівняно з колами постійного струму, мають ряд особливостей. Ці особливості визначаються тим, що змінні струми й напруги окремих елементів електротехнічних пристроїв породжують у них змінні електричне й магнітне поля. У результаті зміни цих полів у електричному колі виникають явища самоіндукції, взаємної індукції і струмів зсуву, що мають істотний вплив на електромагнітні процеси, аналіз яких ускладнюється.

Змінний струм має широке застосування, оскільки він легко трансформується і передається на великі відстані при високій напрузі та малих втратах. Окрім того, електричні машини та інші електротехнічні пристрої, які призначені для роботи в колах змінного струму, відносно прості й надійні в експлуатації.

Змінний струм застосовують у різних галузях електротехніки (електропривод, електротермія, електрозв'язок, радіотехніка та ін.). Його використання на підприємствах будівельної галузі та на будівельних майданчиках дозволяє ефективно реалізовувати багато технологічних процесів.

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

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

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

З усіх можливих форм періодичних струмів найбільшого поширення набули синусоїдальні струми. Вони мають ту перевагу, що дозволяють найбільш економічно здійснювати виробництво, передачу, розподіл і використання електричної енергії. За допомогою синусоїдальних струмів вдається зберегти незмінними форми кривих напруг і струмів на всіх ділянках складного лінійного електричного кола.

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

У різних галузях техніки використовують досить широкий діапазон частот синусоїдального струму залежно від технічних потреб. В авіації, наприклад, успішно застосовують синусоїдальний струм частотою 400 Гц, тому що при такій частоті знижуються габаритні розміри й вага авіаційного електрообладнання. В електротермічних установках використовують діапазон частот 500 Гц – 50 МГц. Частоти від кількох сотень мегагерц до мільярда герців застосовують у радіотехніці.

У цій темі розглядаються питання відносно кіл із струмами, які змінюються за довільним законом. При аналізі подібних кіл змінного струму використовують електричні схеми заміщення, що складаються з ідеальних елементів – ідеального джерела ЕРС, резистивного елемента, індуктивного елемента, ємнісного елемента й елемента взаємної індукції. Кожний з цих елементів відбиває певне явище і вводиться до схеми заміщення, коли це явище хочуть урахувати.

Ідеальні елементи R , L , C (рис. 2.1, а, б, в) є пасивними, тому позитивні напрямки струмів і напруг у них збігаються. У джерелі живлення на рисунку 2.1 збігаються позитивні напрями струму й ЕРС. Позитивний напрям напруги джерела протилежний позитивному напрямку його ЕРС. При цих напрямках позитивні значення миттєвих потужностей приймача $p = u \cdot i$ та джерела $p = e \cdot i$ означають, що перший з них працює приймачем, а другий – джерелом. При негативних значеннях миттєвих потужностей перший працює в режимі джерела, а другий – в режимі приймача.

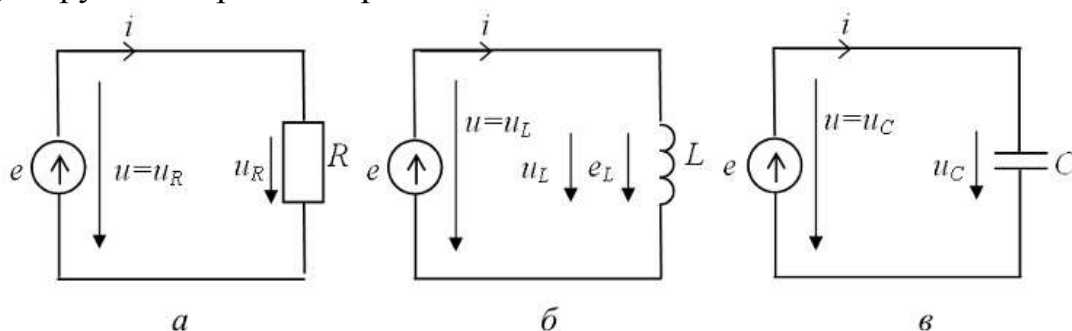


Рис. 2.1 – Позитивні напрямки ЕРС, струму й напруги ідеальних резистивного (а), індуктивного (б) та ємнісного (в) елементів

2.2 Елементи схем заміщення зі змінними струмами.

Резистивний елемент схем заміщення. Резистивний елемент є пасивним елементом схеми заміщення, що характеризує наявність в елементі, який заміщують, необоротних процесів перетворення електричної енергії на інші види енергії. Параметром резистивного елемента є його активний опір R , у

якому поглинається електрична енергія, яка дорівнює енергії, що споживає реальний елемент електричного кола, який заміщують. Резистивний елемент, наприклад, може характеризувати опір реального провідника струму, що протікає по ньому. При цьому в резистивному елементі розсіюється енергія, яка дорівнює тепловій енергії, що виділяється у провіднику. Необхідно мати на увазі, що активний опір такого провідника більше його опору постійному струму. Це пояснюється тим, що щільність змінного струму розподіляється нерівномірно перерізом провідника – має місце поверхневий ефект (витіснення струму до поверхні провідника), внаслідок чого втрати енергії на нагрівання зростають. Опір провідника, що характеризує ці втрати, збільшується.

Резистивним елементом у схемі заміщення враховують також наявність втрат енергії в магнітному осерді котушки, що включена до кола зі змінним струмом.

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

$$u = R \cdot i. \quad (2.1)$$

Рівняння (2.1) вказує на досить важливу властивість резистивного елемента: крива u повторює форму кривої струму, тобто криві напруги і струму резистивного елемента подібні.

Миттєва потужність резистивного елемента визначається за формулою

$$p = u \cdot i = R \cdot i^2, \quad (2.2)$$

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

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

В електричних колах постійного струму магнітне поле, створене струмом, не змінюється і, отже, не впливає на режим роботи кола. У колах зі змінним струмом будь-яка зміна струму I в елементі кола відповідно до закону електромагнітної індукції супроводжується наведенням ЕРС e у цьому елементі. Це явище називають самоіндукцією, а наведену при цьому ЕРС – ЕРС самоіндукції.

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

$$e = \frac{-d\Phi}{dt}.$$

Знак мінус, відповідно до закону Ленца, показує, що індукований струм завжди прагне протидіяти зміні магнітного потоку контуру.

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

$$e_L = -\frac{d\Psi_L}{dt}. \quad (2.3)$$

Величина власного потокозчеплення індуктивного елемента Ψ_L пропорційна величині струму i у ньому: $\Psi_L = L \cdot i$.

Тому формула для ЕРС самоіндукції може бути записана в такому вигляді:

$$e_L = -L \cdot \frac{di}{dt}. \quad (2.4)$$

З (2.3) і (2.4) видно, що індуктивність L будь-якого елемента кола можна розглядати як коефіцієнт пропорційності між потокозчепленням Ψ_L і струмом i -го елемента, або як коефіцієнт пропорційності між швидкістю зміни струму елемента кола di/dt і ЕРС самоіндукції e , наведеної в цьому елементі.

При дослідженні кіл з ЕРС самоіндукції умовилися позитивний напрям ЕРС самоіндукції брати співпадаючим з позитивним напрямом струму, що наводить цю ЕРС. Тому стрілка ЕРС e і стрілка струму i на схемі рисунку 2.1, б мають однаковий напрям. Відповідно до цього дійсний напрям ЕРС збігається з напрямом, що позначений на схемі стрілкою при збільшенні струму в колі, коли $di/dt > 0$, а $e > 0$; зростаючий у колі струм наводить ЕРС e , дійсний напрям якої протилежний напрямку, позначеному стрілкою.

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

$$u = -e = L \frac{di}{dt} = \frac{d\Psi}{dt}. \quad (2.5)$$

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

Розглянемо зміни струму в індуктивному елементі схеми на (рис. 2.1, б). Якщо протягом певного інтервалу часу миттєве значення струму є позитивним ($i > 0$) і визначається зростаючою ділянкою кривої ($di/dt > 0$), то напруга на індуктивному елементі буде також позитивною ($u > 0$). Це означає, що у вказаному інтервалі часу напрям напруги u збігається з позитивним напрямом цієї напруги, позначеним на схемі стрілкою.

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

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

Ємнісний елемент схем заміщення. Між різними частинами електротехнічних пристроїв існує електричне поле зарядів, які знаходяться на цих частинах пристроїв. Ємнісний елемент (конденсатор) вводять до схеми заміщення реального кола зі змінним струмом, коли хочуть урахувати вплив змінного електричного поля елементів кола.

Якщо між обкладинками конденсатора прикладена змінна напруга u_c (рис. 2.1, в), то на його обкладинках накопичується заряд

$$q = C \cdot u_c, \quad (2.6)$$

де коефіцієнт пропорційності C називають ємністю конденсатора.

Напруга й струм ємнісного елемента пов'язані рівнянням

$$i = \frac{dq}{dt} = C \frac{du_c}{dt}. \quad (2.7)$$

Якщо напруга u_c зростає, то струм позитивний ($i > 0$). Це означає, що в цей момент часу струм має напрям, що збігається з умовним позитивним напрямком напруги u_c (рис. 2.1, в). Заряд і енергія електричного поля $W_e = C \cdot u_c^2 / 2 = q \cdot u_c / 2$ при цьому зростають. Енергія від джерела передається електричному полю.

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

$$u_c = \frac{1}{C} \int i dt + const. \quad (2.8)$$

При розгляді процесів у колах зі змінними струмами постійну $const$ у рівнянні (2.8) зазвичай вважають рівною нулю, тому що напруга u_c не має при цьому постійної складової ($u_c = const = 0$).

2.3 Діючі й середні значення періодичних напруг і струмів

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

Значення періодичного струму, що дорівнює такому значенню постійного струму, яке за час одного періоду спричиняє той самий тепловий або електродинамічний ефект, що й періодичний струм, називають діючим

значенням періодичного струму. Діючі значення струму, на пруги й ЕРС позначають прописними буквами без індексів: I , U , E .

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

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

З цього рівняння одержують діюче значення струму

$$I = \sqrt{\frac{1}{T} \int_0^T i^2 dt}, \quad (2.9)$$

яке дорівнює середньоквадратичному значенню періодичного струму.

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

$$U = \sqrt{\frac{1}{T} \int_0^T u^2 dt} \quad \text{та} \quad E = \sqrt{\frac{1}{T} \int_0^T e^2 dt}. \quad (2.10)$$

Електровимірювальні прилади теплової, електромагнітної, електродинамічної і електростатичної систем мають рухомі частини, відхилення яких пропорційні середньоквадратичним значенням вимірюваних ними величин. Тому ці прилади вимірюють діючі значення періодичних струмів і напруг.

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

Середнє значення потужності за період визначається рівнянням

$$P_{\text{сеп}} = \frac{1}{T} \int_0^T p dt = \frac{1}{T} \int_0^T u i dt. \quad (2.11)$$

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

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

$$\left. \begin{aligned} I_{\text{сеп}} &= \frac{2}{T} \int_0^{T/2} i dt; \\ U_{\text{сеп}} &= \frac{2}{T} \int_0^{T/2} u dt; \\ E_{\text{сеп}} &= \frac{2}{T} \int_0^{T/2} e dt. \end{aligned} \right\}. \quad (2.12)$$

2.4 Активні й реактивні складові провідності й струму

У колах синусоїдального струму величину, обернену комплексу повного опору Z , називають комплексом повної провідності й позначають буквою Y :

$$\underline{Y} = \frac{1}{\underline{Z}}. \quad (2.13)$$

Як і всяке комплексне число, комплекс провідності має дійсну частину, що позначають буквою G і називають активною провідністю, і уявну частину, яку позначають буквою B і називають реактивною провідністю.

Якщо коло активно-індуктивне, то його комплекс опору $\underline{Z} = R + jX_L$ й комплекс провідності

$$\underline{Y} = \frac{1}{R + jX_L} = \frac{R - jX_L}{R^2 + X_L^2} = \frac{R}{Z^2} - j \frac{X_L}{Z^2}, \quad (2.14)$$

$$\text{або} \quad \underline{Y} = G - jB_L, \quad (2.15)$$

де активна G і реактивна B_L провідності визначають співвідношеннями

$$G = R / Z^2 \quad \text{і} \quad B_L = X_L / Z^2. \quad (2.16)$$

Якщо коло активно-ємнісне, то його комплекс опору $\underline{Z} = R - jX_C$, а комплекс провідності

$$\underline{Y} = \frac{1}{R - jX_C} = \frac{R + jX_C}{R^2 + X_C^2} = \frac{R}{Z^2} + j \frac{X_C}{Z^2}, \quad (2.17)$$

$$\text{або} \quad \underline{Y} = G + jB_C. \quad (2.18)$$

Порівняння виразів (2.14) і (2.15) показує, що активну G і реактивну Y провідності активно-ємнісного й активно-індуктивного кіл визначають за однаковими формулами. Відмінність у тому, що уявна частина комплексу провідності додатна для ємнісного кола й від'ємна для індуктивного кола.

При використанні векторних діаграм для аналізу явищ у колах синусоїдального струму користуються також розкладанням вектора струму на його активну $\dot{I}_a$ й реактивну $\dot{I}_p$ складові. Це розкладання можна провести графічно або аналітично.

Розглянемо графічний спосіб розкладання струму.

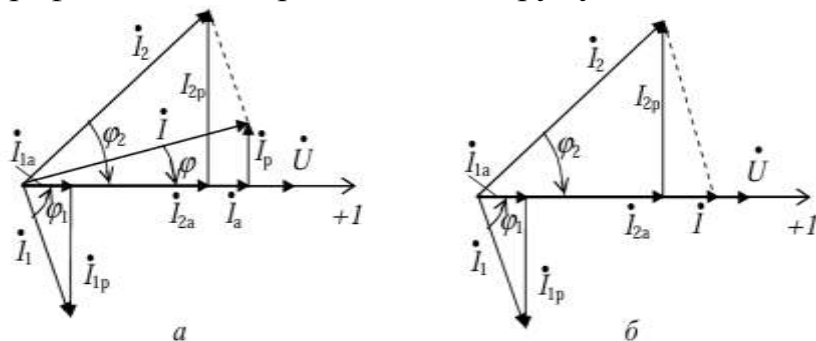


Рис. 2.2 – Розкладання загального вектора струму розгалуженого кола на активні й реактивні складові

Кожний із векторів струму на діаграмі розкладений на дві складові: активну, що співпадає за фазою з вектором напруги, і реактивну, що перпендикулярна вектору напруги. Оскільки струми збігаються за фазою з напругою тільки в активних елементах, а відстають або випереджають за фазою напругу на $\pi/2$ тільки в реактивних елементах, складові струму $\dot{I}_a$ й $\dot{I}_p$ називають активною і реактивною складовими.

Модулі активних і реактивних складових струмів $\dot{I}_1$ і $\dot{I}_2$ відповідно:

$$\begin{aligned} I_{1a} &= I_1 \cos \varphi_1, & I_{1p} &= I_1 \sin \varphi_1, \\ I_{2a} &= I_2 \cos \varphi_2, & I_{2p} &= I_2 \sin \varphi_2. \end{aligned}$$

Складові струму й провідності можна використати для визначення потужності кола:

$$\begin{aligned} P &= U \cdot I \cos \varphi = U \cdot I_a = G \cdot U^2, \\ Q_L &= U \cdot I \sin \varphi_L = U \cdot I_{lp} = B_L \cdot U^2, \\ Q_C &= U \cdot I \sin \varphi_C = U \cdot I_{cp} = B_C \cdot U^2. \end{aligned}$$

При аналітичному способі розкладання струм будь-якої гілки представляють добутком комплексних значень напруги й провідності:

$$\dot{I} = \underline{Y} \cdot \dot{U} = (G + jB) \cdot \dot{U} = G \cdot \dot{U} + jB \cdot \dot{U} = \dot{I}_a + \dot{I}_p. \quad (2.19)$$

У співвідношенні (2.19) величину $\dot{I}_a = G \cdot \dot{U}$ називають активною, а величину $\dot{I}_p = jB \cdot \dot{U}$ – реактивною складовою струму.

Користуючись активною і реактивними складовими провідності й струму, зручно проводити аналіз режимів розгалуженого кола.

Комплекс еквівалентної повної провідності цього кола

$$\underline{Y} = \underline{Y}_1 + \underline{Y}_2 = G_1 - jB_L + G_2 + jB_C,$$

$$\text{або} \quad \underline{Y} = G_1 + G_2 - j(B_L - B_C) = G_e \pm jB_e. \quad (2.20)$$

Якщо реактивна провідність індуктивної гілки більша за реактивну провідність ємнісної гілки ($B_L > B_C$), то $\underline{Y} = G_e - jB_e$, і коло є активноіндуктивним. Струм нерозгалуженої ділянки такого кола, дорівнює струму джерела живлення, відстає за фазою від напруги джерела. При $B_L < B_C$ коло є активно-ємнісним, і струм випереджає за фазою напругу на цій ділянці.

У паралельному колі з індуктивними і ємнісними приймачами можливе явище, коли загальний струм кола (струм нерозгалуженої ділянки) і напруга на вході кола збігаються за фазою. Це явище називають резонансом струму.

Реактивні складові струмів індуктивної і ємнісної гілок при резонансі струмів рівні за величиною і протилежні за фазою (рис. 2.3, б). Отже, при резонансі струмів будь-якого паралельного кола його реактивний індуктивний струм $\dot{I}_L$ і реактивний ємнісний струм $\dot{I}_C$ взаємно компенсуються. Коло являє собою активний опір, еквівалентна провідність якого дорівнює сумі активних провідностей гілок:

$$\underline{Y} = G_e = G_1 + G_2.$$

Коло має тільки активні складові струмів

$$\dot{I} = \dot{I}_{1a} + \dot{I}_{2a}$$

і споживає тільки активну енергію, тому що реактивні потужності пропорційні реактивним складовим їхніх струмів:

$$Q_L = U \cdot I_L \quad \text{і} \quad Q_C = U \cdot I_C,$$

а коливання цих потужностей перебувають у протифазі.

Отже коло при резонансі струмів не споживає від джерела реактивної енергії. У ньому має місце взаємний обмін енергіями між електричним і магнітним полями. Джерело живлення тільки компенсує втрату енергії в активних опорах гілок.

Якщо коло складається з двох паралельно з'єднаних ідеальних індуктивного і ємнісного елементів (рис. 2.3, а). Умови резонансу струмів такого кола $\dot{I}_L = \dot{I}_C$ або $B_L = B_C$, або $1/X_L = 1/X_C$ збігаються до умови $X_L = X_C$. Внаслідок відсутності активних опорів, загальний струм цього кола дорівнює нулю ($\dot{I} = 0$), хоча в кожній з гілок проходить струм $\dot{I}_L = \dot{I}_C$ (рис.2.3, б).

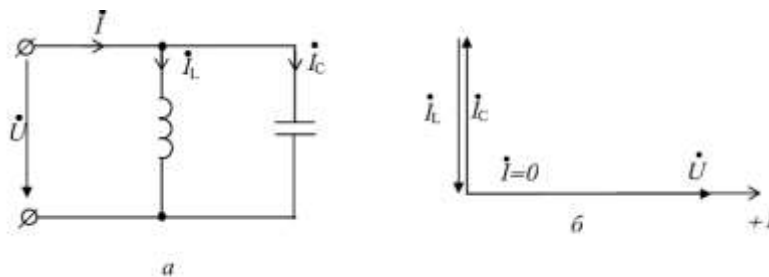


Рис. 2.3 – Еквівалентна схема паралельного з'єднання двох ідеальних індуктивного і ємнісного елементів (а) та її векторна діаграма (б)

2.5 Підвищення коефіцієнта потужності в колах змінного струму

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

$$P = U \cdot I \cdot \cos \varphi \quad (2.21)$$

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

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

$$I = \frac{P}{U \cos \varphi}. \quad (2.22)$$

Генератори, що живлять споживачів, розраховані на певну номінальну потужність $S_n = U_n \cdot I_n$. При заданій напрузі U_n вони можуть бути навантажені струмом, що не перевищує номінального значення. Тому збільшення струму споживача внаслідок зниження його $\cos$ не повинно перевищувати певних меж. Щоб струм генератора не був вище за номінальний при зниженні $\cos \varphi$ споживача, необхідно знижувати його активну потужність. У цьому випадку генератор буде повністю навантажений за струмом і недовантажений за активною потужністю.

Для збереження незмінної активної потужності споживача при зниженні $\cos \varphi$ можна було б скористатись генератором на більшу номінальну потужність, щоб збільшення струму внаслідок зниження $\cos \varphi$ не перевищувало його номінальне значення. У цьому випадку активна потужність $P = S_n \cos \varphi$, на яку буде навантажений генератор, становить тільки частину номінальної потужності S_n . Наприклад, при зниженні $\cos \varphi$ від 1 до 0,5 навантаження генератора становить тільки 50% від його номінальної потужності. Таким чином, $\cos \varphi$ показує, як використовується номінальна потужність джерела, і тому його називають коефіцієнтом потужності.

Робота споживача з малим коефіцієнтом потужності, крім погіршення умов економічного використання джерела живлення, призводить до збільшення потужності втрат у лінії передачі електричної енергії від джерела до споживача. Якщо опір проводів цієї лінії R , то потужність втрат у ній

$$\Delta P = R \cdot I^2 = R \cdot \frac{P^2}{U^2 \cos^2 \varphi}. \quad (2.23)$$

Потужність втрат, як видно з (2.23), тим більша, чим нижче $\cos \varphi$ установки. Отже, чим нижче $\cos \varphi$ споживача, тим дорожча передача до нього електроенергії.

Щоб підвищити економічність енергетичних установок, вживають заходів щодо підвищення коефіцієнта потужності споживачів. Ідея підвищення $\cos \varphi$ полягає в наступному. Загальний струм індуктивного споживача розглядають таким, що складається з активної й реактивної складових. Активна потужність споживача при певній напрузі визначається активною складовою струму: $P = U \cdot I_a$, тому при заданому значенні активної потужності активна складова струму повинна залишатися незмінною. Знизити струм споживача в цьому випадку можна тільки за рахунок зменшення індуктивної складової струму споживача. Це можна здійснити шляхом

паралельного увімкнення до навантаження будь-якого приймача з ємнісним струмом, наприклад батареї спеціальних конденсаторів.

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

На рисунку 2.4, а показана еквівалентна схема споживача $R_{cn} + jX_{cn}$ і батареї конденсаторів C , а на рисунку 5.12, б – її векторна діаграма. З діаграми видно, що для одержання кута зсуву фаз необхідної величини ємнісна гілка кола повинна мати струм, який дорівнює різниці реактивних складових струмів споживача до компенсації кута зсуву фаз $\dot{I}_p$ і після компенсації кута зсуву фаз $\dot{I}_p$:

$$\dot{I}_c = \dot{I}_p - \dot{I}_p \quad (2.24)$$

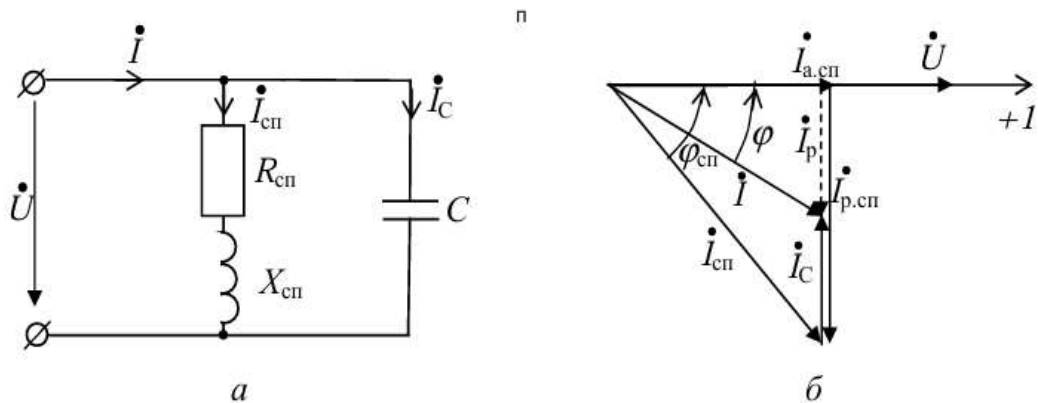


Рис. 2.4 – Еквівалентна схема споживача і батареї конденсаторів (а) і її векторна діаграма (б)

З векторної діаграми ці струми можна визначити через активну складову струму споживача $\dot{I}_a$:

$$I_p = I_a \tan \phi_{cn} \quad \text{і} \quad I_p = I_{acn} \tan \phi$$

Тому вираз (2.24) можна переписати у вигляді

$$I_c = I_a (\tan \phi_{cn} - \tan \phi) \quad (2.25)$$

Струм I_c в цьому рівнянні може бути виражений через напругу і ємність ($I_c = U \cdot \omega C$), а струм I_a – через потужність і напругу ($I_a = P/U$). Тому замість (2.25) матимемо інше рівняння:

$$U \cdot \omega C = \frac{P}{U} (\tan \phi_{cn} - \tan \phi),$$

з якого можна знайти шукане значення ємності батареї конденсаторів:

$$C = \frac{P}{\omega U^2} (\tan \phi_{cn} - \tan \phi). \quad (2.26)$$

Найчастіше за допомогою батарей конденсаторів компенсацію кута зсуву фаз регулюють до значень $\cos\phi$ 0,9–0,95.

Контрольні питання

1. Який електричний струм вважається змінним струмом? Періодичним струмом?
2. Назвіть причини широкого розповсюдження змінного струму.
3. Яка частота змінного струму набула найбільшого поширення?
4. Дайте характеристику резистивного, індуктивного і ємнісного елементів електричного кола.
5. Поясніть, в чому полягає явище індуктивності.
6. Поясніть відмінності фізичних процесів в індуктивному елементі при проходженні через нього постійного і змінного струму.
7. У яких одиницях вимірюється індуктивність?
8. Сформулюйте закон електромагнітної індукції.
9. Напишіть умову настання резонансу струмів, виражену через опори паралельних гілок.
10. Чому і як намагаються підвищити коефіцієнт потужності в електричних колах?

ТЕМА 3. ЕЛЕКТРОМАГНІТНІ ПРИСТРОЇ ТРАНСФОРМАЦІЇ ЕНЕРГІЇ

Перелік питань

- 3.1. Загальні відомості про трансформатори
- 3.2. Однофазний трансформатор
- 3.3. Паспортні дані й зовнішня характеристика трансформатора
- 3.4. Трифазні трансформатори
- 3.5. Автотрансформатори
- 3.6. Вимірювальні трансформатори

3.1. Загальні відомості про трансформатори

Трансформатор – це електротехнічний пристрій, призначений для перетворення змінного струму однієї напруги на змінний струм іншої напруги тієї ж частоти.

Трансформатор складається із сталевго осердя і обмоток. Осердя зібране з тонких листів електротехнічної сталі, ізолюваних один від одного з метою зниження втрат потужності на гістерезис і вихрові струми.

Перетворення напруги в трансформаторах здійснюється змінним магнітним потоком індуктивно пов'язаних між собою обмоток. Обмотка, що підключається до джерела електричної енергії, називається первинною, а обмотка, до якої підключене навантаження, – вторинною. Параметри трансформатора, що належать до первинної обмотки (кількість витків, напруга, струм та ін.), називають первинними і в їхніх літерних позначеннях використовують індекс 1. Відповідно параметри вторинної обмотки називають вторинними й записують з індексом 2.

Якщо через трансформатор необхідно здійснити живлення двох і більше навантажень із різною напругою живлення, то виконують кілька вторинних обмоток.

За призначенням трансформатори поділяють на силові і спеціального призначення (зварювальні, вимірювальні, погоджувальні та ін.).

Силові трансформатори бувають однофазні (для кіл однофазного струму) і трифазні (для трифазних кіл), такі що підвищують і такі, що знижують напругу. На рисунку 3.1 показані умовні графічні позначення одно фазного (а, б) і трифазного (в, г, д, е) трансформаторів.

За способом охолодження трансформатори поділяють на сухі й масляні. У масляних трансформаторів обмотки занурені у сталевий бак, заповнений маслом.

На щитку трансформатора вказують його номінальні параметри: первинну й вторинну напругу; номінальну повну потужність; струм при номінальній повній потужності; частоту; кількість фаз; схему з'єднання обмоток; режим роботи (тривалий або короткочасний); спосіб охолодження.

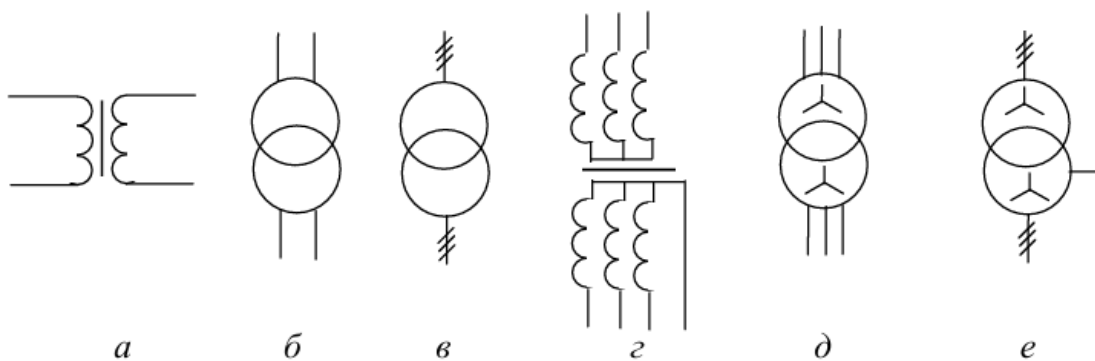


Рис. 3.1 – Умовні графічні позначення трансформаторів

3.2. Однофазний трансформатор

Принцип дії однофазного трансформатора. На осерді однофазного трансформатора (рис. 3.2) у найпростішому випадку розташовані дві обмотки, виконані з ізолюваного проводу. До первинної обмотки підводять живлячу напругу U_1 . Із вторинної обмотки знімають напругу U_2 , яку підводять до споживача електричної енергії Z_H .

Змінний струм $\dot{I}_1$, проходячи витками первинної обмотки трансформатора w_1 , створює в осерді магнітопроводу змінний магнітний потік Φ . Змінюючись у часі за синусоїдальним законом $\Phi = \Phi_m \sin \omega t$, цей потік пронизує витки вторинної обмотки трансформатора. При цьому відповідно до закону електромагнітної індукції в ній наводиться ЕРС e_2 :

$$e_2 = w_2 \frac{d\Phi}{dt} = E_{m2} \sin(\omega t + \frac{\pi}{2}), \quad (3.1)$$

де w_2 – кількість витків вторинної обмотки трансформатора;

E_{m2} – амплітудне значення ЕРС у вторинній обмотці.

Під дією ЕРС e_2 у вторинному колі трансформатора, замкненому на навантаження, протікає струм $\dot{I}_2$.

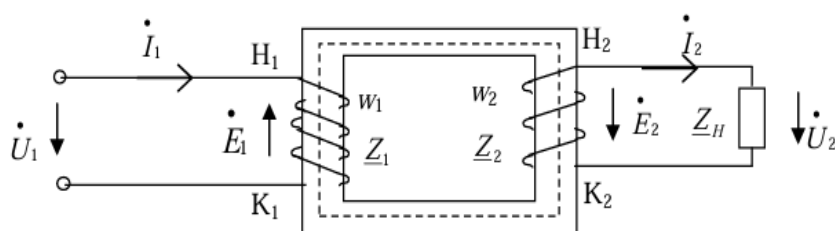


Рис. 3.2 – Принцип дії однофазного трансформатора

Відношення ЕРС первинної обмотки трансформатора до ЕРС його вторинної обмотки, що дорівнює відношенню кількості витків відповідних обмоток, називають коефіцієнтом трансформації трансформатора

$$n = \frac{E_1}{E_2} = \frac{w_1}{w_2}. \quad (3.2)$$

Якщо $E_1 < E_2$, то трансформатор є підвищувальним, при $E_1 > E_2$, він є знижувальним.

Режими роботи трансформатора. Залежно від величини опору навантаження розрізняють три режими роботи трансформатора: $Z_H = \infty$ – режим холостого ходу; $0 < Z_H < \infty$ – режим навантаження; $Z_H = 0$ – режим короткого замикання.

У режимі холостого ходу вторинна обмотка трансформатора розімкнена. Струм первинної обмотки трансформатора при вимкненому споживачі електроенергії є струмом холостого ходу I_0 :

$$I_0 = I_{m0} \sin(\omega t + \alpha)$$

Кут магнітних втрат α , що входить до рівняння (кут зсуву за фазою між струмом і магнітним потоком трансформатора), обумовлений втратами потужності у магнітопроводі. Значення кута α для сучасних електротехнічних сталей зазвичай невелике і становить $4\text{--}6^\circ$.

Напруга, яку підводять в режимі холостого ходу до трансформатора, відповідно до другого закону Кірхгофа, може бути представлена як сума падінь напруги в первинному колі:

$$\dot{U}_1 = \dot{E}_1 + R_1 \cdot \dot{I}_0 + jX_1 \cdot \dot{I}_0, \quad (3.3)$$

де R_1 – активний опір первинної обмотки;

X_1 – індуктивний опір первинної обмотки;

E_1 – ЕРС, що наводиться в первинній обмотці магнітним потоком

$$e_1 = w_1 \frac{d\Phi}{dt} = E_{m1} \sin(\omega t + \frac{\pi}{2}).$$

Виходячи з рівняння електричної рівноваги (3.3), можна побудувати векторну діаграму трансформатора для режиму холостого ходу (рис. 3.3).

Внаслідок перемагнічування магнітопроводу в ньому виникають втрати потужності, які називають втратами холостого ходу. Потужність P_0 , споживана з мережі в режимі холостого ходу, витрачається головним чином на покриття втрат у магнітопроводі, тому що втрати в обмотці $2 I_0^2 R_1$ малі. Струм холостого ходу I_{10} містить активну й реактивну складові:

$$I_{10} = \sqrt{I_{10a}^2 + I_{10p}^2}.$$

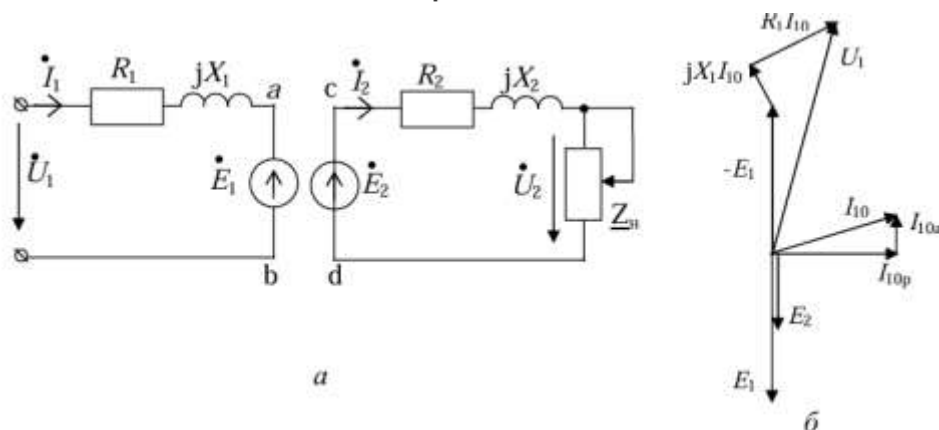


Рис. 3.3 – Схема заміщення й векторна діаграма режиму холостого ходу

Режим короткого замикання для силового трансформатора є аварійним. Однак деякі спеціальні трансформатори розраховані на роботу в режимі близькому до короткого замикання. Це зварювальні трансформатори, вимірювальні трансформатори струму.

3.3. Паспортні дані й зовнішня характеристика трансформатора

У процесі перетворення напруги в трансформаторі виникають втрати електричної енергії в обмотках і магнітопроводі, викликані нагріванням. Тривалий перегрів обмоток може викликати старіння й руйнування ізоляції, тому для забезпечення тривалої роботи силового трансформатора заводом-виробником задаються показники, що називаються паспортними даними: повна потужність S_n , коефіцієнт трансформації n , напруги U_1 і U_2 , напруга короткого замикання $U_{кз}$, струми $I_{1н}$, $I_{2н}$ і струм холостого ходу $I_{10н}$, частота f_n , втрати в сталі магнітопроводу $P_{0н}$ і в обмотках $\Delta P_{мн}$ та ін. У процесі тривалої експлуатації властивості ізоляції погіршуються, зростають втрати енергії. Тому періодично перевіряють основні дані трансформатора, до яких належать $U_{кн}$ й $I_{10н}$, що характеризують втрати енергії в обмотках, ізоляції і сталі магнітопроводу. Для цього проводять два досліді: дослід холостого ходу і дослід короткого замикання. На підставі цих дослідів визначають також параметри схем заміщення.

Розрізняють режими роботи трансформатора:

- номінальний;
- неробочий (або режим холостого ходу);
- короткого замикання

Режимом холостого ходу трансформатора називають такий режим його роботи, при якому до первинної обмотки підводиться номінальна напруга, а вторинна обмотка розімкнута.

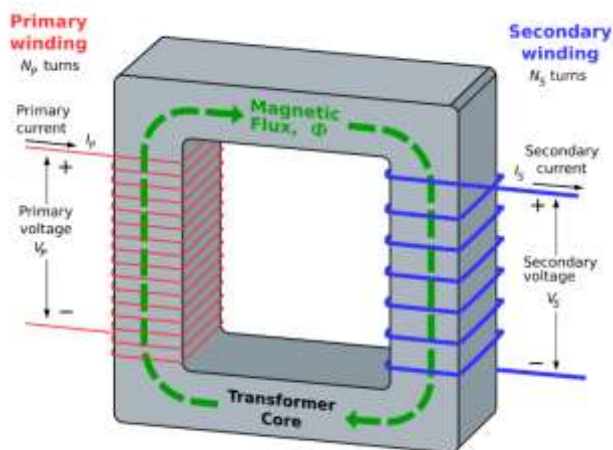


Рис. 3.4. Режимом холостого ходу трансформатора

Під дією прикладеної напруги U_1 по первинній обмотці протікає струм холостого ходу I_{1x} , який створює магніторушійну силу $I_{1x}w_1$, а остання – магнітний потік. Основний магнітний потік наводить в первинній і вторинній обмотках трансформатора ЕРС, діючі значення яких:

$$E_1 = 4,44w_1f\Phi_m;$$

$$E_2 = 4,44w_2f\Phi_m,$$

де Φ_m – амплітудне значення магнітного потоку; f – частота змінної напруги.

Потік розсіювання $\Phi_{1\sigma}$ наводить в первинній обмотці трансформатора ЕРС $e_{1\sigma}$, діюче значення якої

$$E_{1\sigma} = I_{1x}X_1,$$

де X_1 – індуктивний опір первинної обмотки, обумовлений потоком розсіювання $\Phi_{1\sigma}$.

Враховуючи, що струм холостого ходу I_{1x} малий (для трансформаторів потужністю понад 100 ВА складає всього 3...5% від номінального струму) і спад напруги в первинній обмотці трансформатора $I_{1x}X_1$ складає приблизно 0,5% U_1 , можна вважати, що прикладена до первинної обмотки напруга u_1 зрівноважується ЕРС e_1 , тобто $u_1 = -e_1$.

Тоді при підведеній синусоїдній напрузі

$$u_1 = U_{1m}\sin\omega t$$

ЕРС e_1 також являє собою синусоїдну функцію

$$e_1 = -U_{1m}\sin\omega t = U_{1m}\sin(\omega t + 180^\circ).$$

Отже, напруга u_1 та ЕРС e_1 чисельно рівні і перебувають в протифазі одини одного.

Основним параметром будь-якого трансформатора є коефіцієнт трансформації – відношення ЕРС первинної обмотки до ЕРС вторинної обмотки:

$$K = \frac{E_1}{E_2}.$$

Враховуючи, що ЕРС E_2 практично дорівнює напрузі на первинній обмотці, можна записати

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

Потужність, яка споживається трансформатором в режимі холостого ходу внаслідок малих втрат на нагрівання обмоток ($P_{\text{нагр}} = I_{1x}^2 R_1 \approx 0$) дорівнює втратам енергії в сталі магнітопроводу:

$$P_x = P_{\text{ст}} + I_{1x}^2 R_1 \approx P_{\text{ст}}.$$

Режим короткого замикання трансформатора. Режим, при якому первинна обмотка трансформатора підключена до джерела напруги, а вторинна обмотка

замкнута, називається режимом короткого замикання. Виділяють експлуатаційне і випробувальне коротке замикання. Якщо при підключеному до мережі трансформаторі з якоїсь причини стається замикання у колі вторинної обмотки, в останній струм може в 20...30 разів перевищити номінальне значення.

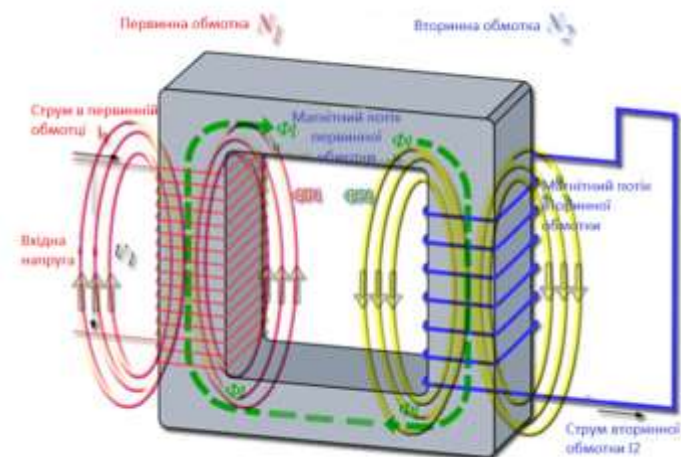


Рис. 3.5. Режим короткого замикання трансформатора

При дослідному короткому замиканні з допомогою регулятора напруга на первинній обмотці збільшується від нуля до значення, при якому струми в обмотках дорівнюють номінальним. Схема дослідження трансформатора в режимі короткого замикання показана на рис. 2.

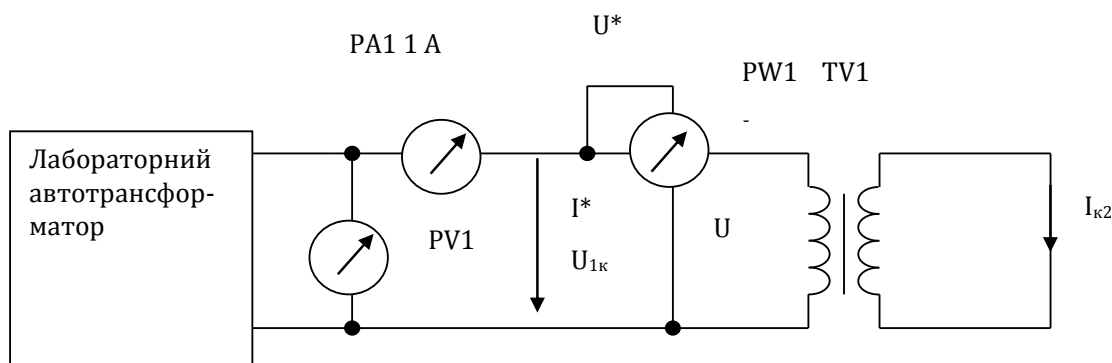


Рис. 3,6. Схема дослідження короткого замикання

При допомозі ватметра PW1, вольтметра PV1, амперметра PA1 вимірюють відповідно потужність P_k , напругу $U_{1к}$, та струм $I_{1к}$ короткого замикання.

Напругу $U_{1к}$, при якій струми в обмотках дорівнюють номінальним виражають у процентах до номінальної напруги трансформатора:

$$U_{1к\%} = \frac{U_{1л}}{U_{1н}} 100\%.$$

Цю напругу називають напругою короткого замикання. Її значення не перевищує 5...10% від номінальної напруги первинної обмотки.

За даними досліду короткого замикання можна визначити наступні параметри трансформатора:

- повний опір короткого замикання $Z_k = \frac{U_{1k}}{I_{1H}}$;
- активний опір короткого замикання $R_k = \frac{P_k}{I_{1H}^2}$;
- реактивний опір короткого замикання $X_k = \sqrt{Z_k^2 - R_k^2}$.

Оскільки в досліді короткого замикання напруга на первинній обмотці U_{1k} і основний магнітний потік Φ незначні, то втратами в магнітопроводі можна знехтувати. Тому вважається, що потужність P_k витрачається на покриття втрат в міді обмоток (втрати на нагрів).

$$P_k = P_{1e} + P_{2e} = I_1^2 R_1 + I_2^2 R_2 = I_{1H}^2 R_k.$$

Робота трансформатора з навантаженням(номінальний режим).

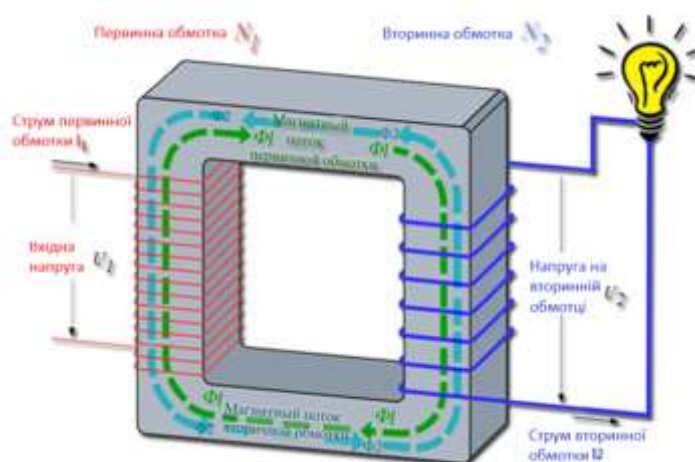


Рис. 3.7. Робота трансформатора з навантаженням(номінальний режим)

Такий режим роботи для трансформатора є основним. При підключенні до трансформатора навантаження з первинною обмоткою зчеплені ті ж магнітні потоки, що й в режимах холостого ходу і короткого замикання, тому рівняння для миттєвих значень ЕРС і напруг має вигляд:

$$u_1 = -e_1 + i_1 R_1 - e_{1\sigma}.$$

У вторинній обмотці основний магнітний потік наводить ЕРС e_2 , вторинний потік розсіювання $\Phi_{2\sigma}$ – ЕРС $e_{2\sigma}$. З врахуванням спаду напруги на активному опорі обмотки $i_2 R_2$ і напруги на навантаженні u_2 :

$$u_2 = e_2 - i_2 R_2 + e_{2\sigma}.$$

Оскільки ЕРС розсіювання і спад напруги в обмотках трансформатора незначні, ними можна знехтувати, тобто

$$u_1 = -e_1.$$

Таким чином, ЕРС e_1 і створюючий її магнітний потік Φ та створююча його намагнітуюча сила $i_1 W_1$ повинні лишатися незмінними.

При будь-якому навантаженні основний магнітний потік повинен лишатися таким, як і в режимі холостого ходу.

З виникненням струму у вторинній обмотці трансформатора з'являється намагнічуюча сила $i_2 W_2$, що діє назустріч силі $i_1 W_1$. Тому для збереження постійності потоку Φ зі збільшенням струму i_2 і намагнічуючої сили вторинної обмотки $i_2 W_2$ повинні збільшуватись струм i_1 і намагнічуюча сила $i_1 W_1$ і навпаки.

Якщо знехтувати струмом холостого ходу і намагнічуючою силою $F_x = i_1 W_1$, то маємо

$$i_1 W_1 + i_2 W_2 = 0,$$

звідки:

$$\left| \frac{i_1}{i_2} \right| = \frac{W_2}{W_1} = \frac{1}{K} = \frac{E_2}{E_1}.$$

3.4. Трифазні трансформатори

В залежності від числа фаз трансформатори бувають однофазні та багатофазні (в основному, трифазні). Кількість фаз первинної обмотки визначається числом фаз джерела живлення, а число фаз вторинної обмотки - призначенням трансформатора.



Однофазний трансформатор



Трифазний трансформатор

В трьохфазному трансформаторі первинною або вторинною обмоткою називають відповідно сукупності трифазних обмоток однієї напруги.

Трифазний трансформатор складається з магнітопроводу і трьох стержнів, які конструктивних міркувань розміщують в одній площині. На кожному стержні трифазного трансформатора розміщують обмотки вищої й

нижчої напруг однієї фази. Стержні з'єднуються між собою ярмом зверху і знизу. Довжина магнітних ліній потоку середнього стержня менша, ніж крайніх стержнів, отже, магнітний потік зустрічає на своєму шляху менший магнітний опір, ніж магнітні потоки крайніх стержнів. Тому у фазі, обмотка якої розміщена на середньому стержні, протікає намагнічувальний струм меншої сили, ніж у фазах, обмотки яких розміщені на крайніх стержнях.



Будова трифазного трансформатора

Конструктивно обмотки трифазних трансформаторів виконують так само, як і однофазних. Початки фаз вищої напруги позначають – А, В, С, а кінці фаз – Х, Y, Z. Якщо обмотка вищої напруги має виведену нульову точку, то цей затискач позначається цифрою 0. Початки фаз нижчої напруги позначають – а, в, с, а кінці фаз – х, у, z; вивід нульової точки – 0.

Графічне зображення однофазного та трифазного трансформатора.



Графічне зображення однофазного трансформатора



Графічне зображення трифазного трансформатора

На щитку трансформатора вказані номінальні значення повної потужності, напруг - вищого і нижчого, струмів, частоти, а також число фаз та схема їх з'єднання. Для трансформаторів великої потужності можуть бути вказані додаткові характеристики режиму роботи (тривалий або короткочасний), спосіб охолодження та ін. Номінальними називаються величини, при яких пристрій може працювати невизначений час без неприпустимих наслідків: перегрів, пробій ізоляції і т. п. з економічно ефективним ККД,

Типи трифазних трансформатрів. Трансформатори потужністю до 1000 В*А використовуються в пристроях промислової електроніки для живлення електрично ізольованих частин кола. Трансформатори потужністю більше 10 кВ*А називаються силовими. Вони застосовуються в електроенергетиці для економічної передачі електричної енергії від трифазних генераторів з лінійним напругою 6,3 - 38,5 кВ по лінії електропередач із лінійним напругою до 750 кВ і розподілу між приймачами з лінійним напругою від 11 кВ і нижче. Чим вище напруга ліній передачі, тим менше струм і його дрютах при тій ж самій потужності, отже втрати енергії.

Існує кілька критеріїв, за якими проводиться класифікація силових трансформаторів. Найбільш поширений варіант - поділ на умовні категорії в залежності від потужності і напруги.

Розрізняють такі типи силових трансформаторів:

- 1-а група (вироби з потужністю до 100 кВА);
- 2-а група (діапазон потужності від 160 до 630 кВА);
- 3-тя група (від 1000 до 6300 кВА);
- 4-а група (показник потужності вище 10000 кВА);
- 5-а група (всі трансформатори з потужністю вище 40000 кВА);
- 6-а група (потужність від 100000 кВА).

Розглянемо масляний трансформатор напруги та сухий трансформатор. *Масляний трансформатор напруги* - це стаціонарний прилад, який включає в себе дві і більше обмоток. Основним завданням цих пристроїв є перетворення струму. В даному випадку параметр граничної частоти в ланцюзі залишається незмінним. Відбувається зазначений процес за допомогою електромагнітної індукції.



Також важливо відзначити, що трансформатори є вторинними джерелами електроживлення. Все це говорить про те, що вони забезпечують подачу електроенергії від мережі. Відмінність між трансформаторами полягає в їх потужності. Однак моделі також

мають свої конструктивні особливості. Для того щоб більш детально розібратися в цьому питанні, слід розглянути пристрій звичайного трансформатора.

Якщо розглядати серії ТМ масляний трансформатор, пристрій його досить простий. Він містить три висновки, а вони розташовуються у верхній панелі. В даному випадку вступні контакти передбачені низьковольтного типу. В нижній частині конструкції є система заземлення для безпечного використання трансформатора. Під висновками розташовується складний механізм перепускних клапанів.

Зливний патрубок знаходиться в нижній частині трансформатора. Для зручності транспортування пристрою є спеціальна панель, на якій можна знайти отвори. Біля перемикача в приладі встановлено ролик. Поряд з вхідними контактами розташовується велика реле. Для того, щоб стежити за роботою трансформатора, на його корпусі вбудований термометр. Також там користувач здатний знайти показчик рівня масла. У деяких конфігураціях трансформаторів серії ТМ передбачений осушувач.



Сухий трансформатор – це вид перетворювачів, в яких магнітна система та дві чи більше обмоток не занурюються в масляний розчин, а остиджуються за рахунок руху повітряних потоків. У сухих трансформаторах основним ізолюючим середовищем є твердий діелектрик, а охолоджуючим - атмосферне повітря. Використання сухих трансформаторів економічно вигідно. З огляду на їхню високу пожежну безпеку трансформаторні пункти можна розміщувати максимально близько до споживачів електроенергії. При цьому значно знижуються втрати при передачі електроенергії в мережах низької напруги.

Також з'являється унікальна можливість встановлення трансформаторів в районах з джерелами водопостачання і підвищеними екологічними вимогами. Крім того, немає необхідності в підніманні для прийому масла і протипожежних засобах. Це дозволяє розміщувати трансформатори на різних поверхнях будівлі.

Сухі трансформатори не вимагають трудомісткого технічного обслуговування: відпадає необхідність в таких роботах з технічного обслуговування, як герметизація, відновлення захисту баків від корозії, очищення масла.

Трансформатори з ізоляцією епоксидною смолою вимагають тільки повітря для охолодження. Немає необхідності контролювати рівень масла і

очищати його. Сухі трансформатори справляються з короточасними піками навантаження, наприклад, при пуску двигунів.

3.5. Автотрансформатори

Автотрансформатор щодо конструктивного виконання подібний до звичайного трансформатора: має замкнений сталевий магнітопровід, на якому розміщені дві обмотки, виконані з мідного проводу різних перерізів. На відміну від трансформатора обмотки автотрансформатора електрично з'єднані.

У знижувального автотрансформатора обмотка вторинної напруги є частиною обмотки первинної напруги. У підвищувального, навпаки, обмотка первинної напруги є частиною обмотки вторинної напруги. Таким чином, в автотрансформаторі крім магнітного зв'язку між первинною й вторинною обмотками є ще електричний зв'язок.

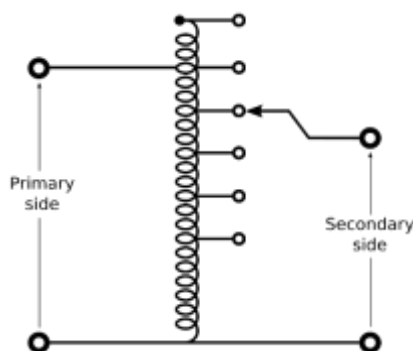


Рис. 3.8. Схема автотрансформатора

Автотрансформатори можуть бути понижувальними і підвищувальними, однофазними і трифазними. У трифазного трансформатора обмотки фаз з'єднують зіркою.

Значного поширення набули автотрансформатори зі змінним коефіцієнтом трансформації. Такі автотрансформатори оснащуються пристроєм, що дозволяє регулювати величину напруги на вторинній обмотці шляхом зміни числа витків. Це здійснюється завдяки ковзному контакту (щітки чи ролика), що переміщується безпосередньо по зачищеній від ізоляції поверхні витків обмотки. Такі автотрансформатори називають регуляторами напруги. Вітчизняною промисловістю виготовляються регулятори напруги невеликої потужності серії РНО (однофазні) і РНТ (трифазні). Автотрансформатори, що призначені для лабораторного використання називають ЛАТР (лабораторний автотрансформатор).

Перевагою автотрансформатора є вищий ККД, оскільки лише частина потужності піддається перетворенню – це особливо суттєво, коли вхідна і вихідна напруги відрізняються незначно.

Недоліком є відсутність електричної ізоляції (гальванічної розв'язки) між первинним і вторинним колом. У промислових мережах, де наявність заземлення нульового проводу обов'язкова, цей чинник ролі не грає, зате

суттєвою є менша витрата сталі для осердя, міді для обмоток, менша вага і габарити, і в результаті – менша вартість.

Застосування автотрансформаторів економічно виправдане замість звичайних трансформаторів для сполучення ефективно заземлених мереж з напругою 110 кВ і вище при коефіцієнтах трансформації не більших за 3...4.

3.6. Вимірювальні трансформатори

Вимірювальні трансформатори струму призначені для розширення меж вимірювання струму, а також для ізоляції вимірювальних приладів від проводів високої напруги, чим забезпечується безпека обслуговування високовольтних установок.



Трансформатор струму складається з замкнутого сталюого осердя з накладеними на нього двома обмотками. Первинна виконана малим числом витків великого перетину, вмикається в проміжок проводу, по якому іде вимірюємий струм. Вторинна – виконана мідним провідником малого перетину з великим числом витків до якого під'єднуються послідовні (струмові) обмотки вимірювальних приладів (ватметрів, лічильників та інших).



Магнітопроводи трансформаторів струму виготовляються з тонкої листової високоякісної трансформаторної сталі, а для особливо точних трансформаторів – з залізонікелевих сплавів типу пермалою. Для зменшення втрат на вихрові струми листи ізолюють один від одного. Найчастіше застосовуються магнітопроводи стержньового або круглого (кільцевого) типів.

В залежності від області застосування вимірювальні трансформатори виготовляються стаціонарними, призначеними для встановлення на відкритих площадках розподільчих пристроїв, станцій і підстанцій і в закритих приміщеннях, і переносними – для використання в лабораторіях. Стаціонарні трансформатори, як правило, мають одну межу вимірювання, а переносні – декілька.

За точністю трансформатори струму поділяються на 10 класів: 0,01; 0,02; 0,05; 0,1; 0,2; 0,5; 1; 3; 5; та 10.

Трансформатори струму працюють в умовах близьких до короткого замикання, оскільки опір вторинних обмоток і послідовних обмоток вимірювальних приладів дуже малий $0,2 \div 1,6$ Ом.

Принцип дії вимірювального трансформатора струму

Вимірювальний струм I_1 , проходячи по первинній обмотці, створює намагнічуючу силу $F = I_1 \cdot \omega_1$, більша частина якої компенсується намагнічуючою силою $F_2 = I_2 \cdot \omega_2$, а менша частина – результуюча намагнічуюча сила $I_0 \cdot \omega_1$ – збуджує магнітний потік Φ , в сталі магнітопроводу, який індукуює у вторинній обмотці е.р.с. $\mathcal{E}$.



Намагнічуюча сила $I_0 \cdot \omega_1$ створюється намагнічуючим струмом I_0 , практично рівним струму холостого ходу.

Якщо при незмінному струмі I_1 збільшувати опір вторинної обмотки, то струм I_2 і вторинна намагнічуюча сила будуть зменшуватись, а намагнічуюча сила $I_0 \cdot \omega_1$ і магнітний потік Φ будуть збільшуватись.

Якщо вторинну обмотку розімкнути ($Z_2=0$; $I_2=0$) тоді вторинна намагнічуюча сила дорівнює нулю, а результуюча намагнічуюча сила буде дорівнювати первинній намагнічуючій силі.

Але оскільки при нормальному режимі роботи трансформатора первинна намагнічуюча сила значна в порівнянні з результуючою намагнічуючою силою, то магнітний потік, який встановиться в осерді трансформатора при розімкненій вторинній, буде в багато разів більший нормального потоку, на який розрахований магнітопровід трансформатору.

Внаслідок значного збільшення магнітного потоку, а отже і магнітної індукції втрати в сталі можуть зрости до значень, які можуть викликати сильне нагрівання осердя трансформатора. Великий магнітний потік буде індукувати у вторинній обмотці е.р.с., яка досягає небезпечних значень (до 2000В).

Тому з правил безпеки вторинна обмотка працюючого трансформатора струму завжди повинна бути замкнена на послідовні обмотки приладів, а при їх відсутності накоротко.

$k = \frac{I_1}{I_2}$ — діючий коефіцієнт трансформації

$k_H = \frac{I_{H1}}{I_{H2}}$ — номінальний коефіцієнт трансформації.

Номінальний струм вторинної обмотки трансформатора струму завжди $I_{H2}=5A$.

Вимірювальні трансформатори напруги призначені для розширення меж вимірювання напруги. Вони застосовуються для сумісної роботи з вольтметрами, ватметрами, лічильниками і т.п.



Трансформатор складається із замкнутого осердя, набраного з листів трансформаторної сталі, і двох обмоток. Обмотки ізолювані відносно осердя і відносно одна одної. Одна з них – первинна має число витків ω_1 , друга – вторинна ω_2 .



Первинна обмотка трансформатора напруги підключається до мережі з вимірюємою напругою; затискачі вторинної обмотки з'єднуються з вольтметром і колами напруги вимірювальних приладів, останні з'єднуються між собою паралельно.



Стаціонарні трансформатори напруги поділяються на наступні класи точності 0,2; 0,5; 1 та 3, а лабораторні – на класи 0,05; 0,1; 0,2.

Стаціонарні трансформатори напруги виготовляються на номінальні первинні напруги до сотень кіловольт при вторинній напрузі 150,100.

Номінальні потужності складають від 5 до 1200В·А.

По зовнішньому вигляду і будові трансформатори напруги мало відрізняються від силових трансформаторів на невеликі потужності. Лабораторні трансформатори найчастіше є переносними на декілька меж вимірювання.



Для трифазних мереж виготовляють трифазні трансформатори напруги. На трьох стержнях магнітопроводу розташовуються три первинні і три вторинні обмотки. Первинні обмотки приєднуються до трифазного кола, до виводів вторинних обмоток приєднуються вимірювальні прилади.

По способу охолодження трансформатори напруги поділяються на сухі (для напруги до 3 кВ) і трансформатори з заповненням маслом або ізолюючою масою (для напруги 3 кВ і більше).

Режим роботи трансформатора напруги характеризується тим, що первинна напруга змінюється мало, а вторинна обмотка трансформатора замкнена на великий опір, внаслідок чого струми в його обмотках відносно малі, а отже *він працює в умовах близьких до холостого ходу*.

Якщо первинна обмотка трансформатора під'єднана до кола з вимірюємою напругою, то вольтметр, приєднаний до вторинної обмотки, вимірює вторинну напругу.

$k = \frac{U_1}{U_2}$ – діючий коефіцієнт трансформації

$k_H = \frac{U_{H1}}{U_{H2}}$ – номінальний коефіцієнт трансформації

$U'_1 = k_H \cdot U_2$ – знайдене найближче значення вимірюємої напруги.

Похибка при вимірюванні напруги, зумовлена застосуванням вимірювального трансформатора напруги:

$$\gamma_U = \frac{k_H - k}{k} \cdot 100\% = \gamma_K;$$

Наявність похибок в трансформаторі напруги пояснюється наявністю падінь напруг в його обмотках.

Для зменшення активних опорів обмотки виготовляються із провідників порівняно великого перетину тобто густини струму беруться малими.

До трансформатора напруги можна підключати таку кількість приладів, при якій їх потужність при номінальній напрузі не перевищує номінальної потужності трансформатора.

Для безпеки обслуговування персоналу вторинні обмотки вимірювальних трансформаторів напруги завжди мають бути заземлені. При відсутності заземлення при пошкодженні ізоляції первинної обмотки вторинна обмотка, а відповідно, і приєднані до неї прилади можуть потрапити під високий потенціал відносно землі, що є небезпечним. Також зазвичай заземлюється і металевий кожух трансформатора.

Контрольні питання

1. Поясніть призначення і принцип дії трансформатора.
2. За якими ознаками класифікують трансформатори?
3. Поясніть значення символів на умовних графічних позначеннях трансформаторів.
4. Чому магнітопровід трансформатора виконується з електротехнічної, а не із звичайної сталі, і збирається з окремих тонких, ізольованих один від одного листів?
5. Як розташовують обмотки трансформатора на сердечнику магнітопроводу?
6. Що називається коефіцієнтом трансформації трансформатора і як його визначити?
7. Поясніть принцип дії і призначення підвищувальних і знижувальних трансформаторів.
8. З якою метою використовується електрична схема заміщення трансформатора?
9. Поясніть принцип побудови схем заміщення трансформатора.
10. З якою метою проводять дослід холостого ходу трансформатора? Які вимірювання при цьому проводять і які параметри розраховують?
11. З якою метою проводять дослід короткого замикання трансформатора? Які вимірювання при цьому проводять і які параметри розраховують?
12. Поясніть фізику втрат потужності холостого ходу трансформатора.
13. Які параметри трансформатора називають паспортними?

ТЕМА 4. АСИНХРОННІ ЕЛЕКТРИЧНІ МАШИНИ

Перелік питань

- 4.1. Будова і принцип дії трифазної асинхронної машини
- 4.2. ЕРС статора і ротора
- 4.3. Рівняння електричної рівноваги статора і ротора
- 4.4. Схема заміщення асинхронного двигуна
- 4.5. Втрати і ККД асинхронного двигуна
- 4.6. Обертний момент асинхронного двигуна
- 4.7. Робочі характеристики асинхронних двигунів
- 4.8. Пуск асинхронних двигунів

4.1. Будова і принцип дії трифазної асинхронної машини

Широке застосування асинхронних машин зумовило і значне конструктивне розмаїття цих машин (особливо тих, які використовуються як двигуни) в плані потужності, номінальної напруги, числа фаз, конструкції тощо.

Однак, найбільш поширеними є трифазні двигуни, що виготовляються для масового використання з номінальною напругою 220/380 В і номінальними потужностями від 0,06 до 400 кВт.

Принцип дії асинхронного двигуна, оснований на взаємодії електричного струму з магнітним полем, може бути поясненим за допомогою макета, який складається з електропровідного диска та підковоподібного магніту (рис. 1, а).

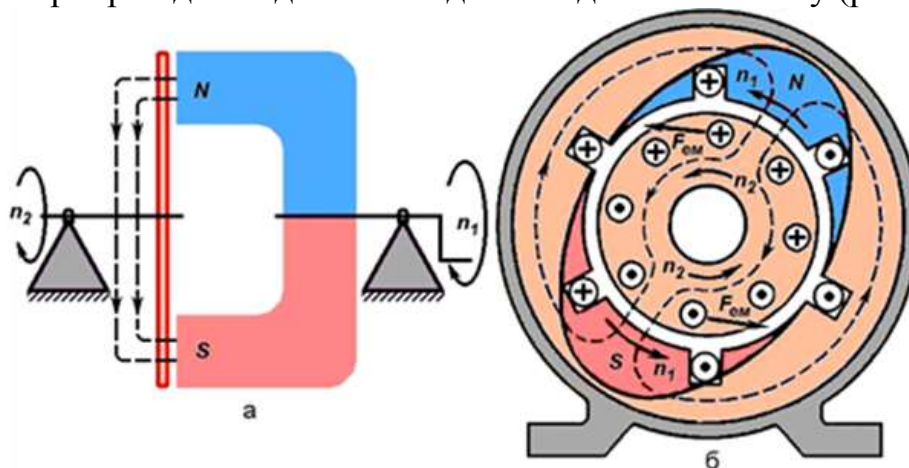


Рисунок 1 – Макет (а) та електромагнітна схема (б) до пояснення принципу дії асинхронного двигуна

Диск і магніт закріплені в підшипниках так, що можуть вільно обертатись. Якщо обертати підковоподібний магніт з частотою обертання n_1 , то його поле, перетинаючи електропровідний диск, індукує в ньому ЕРС та струм. Взаємодія цього струму з полем приведе до появи електромагнітних сил, які будуть обертати диск в тому ж напрямі, в якому обертається магніт, але з меншою частотою обертання n_2 . Дійсно, як тільки частота обертання n_2 стає, з якоїсь причини, рівною n_1 – диск обертається синхронно з магнітом, магнітне поле перестає індукувати в диску ЕРС і струми (отже, зникають

електромагнітні сили, що обертають диск), тому останній почне гальмуватись і n_2 стане меншою від n_1 .

Визначаючи напрям обертання ротора асинхронного двигуна, користуються правилами правої (визначається напрям ЕРС i , відповідно, струму) та лівої (визначається напрям електромагнітних сил F_{em}) руки. При цьому, застосовуючи правило правої руки, слід пам'ятати, що в ньому йдеться про напрям руху провідника в магнітному полі, а в даному випадку рухається поле, тому великий палець слід направляти саме проти напрямку руху поля. Так на (рис. 1, б) магнітне поле NS обертається проти годинника, отже провідник, по відношенню до поля, рухається за напрямом годинника (на рисунку не показано).

В реальному асинхронному двигуні, електромагнітна схема якого наведена на (рис. 1, б), кругове обертове поле створює трифазна обмотка статора при живленні від мережі змінного струму. Це поле наводить ЕРС та струми в замкненій обмотці ротора, що й приводить до його обертання в напрямі дії електромагнітних сил F_{em} , які створюють електромагнітний момент.

Важливою величиною, що характеризує роботу асинхронного двигуна, є ковзання – різниця між частотами обертання магнітного поля n_1 і ротора n_2 , виражена у відносних одиницях:

$$s = (n_1 - n_2)/n_1. \quad (1)$$

Досить часто ковзання асинхронної машини виражається у відсотках:

$$s = (n_1 - n_2) \cdot 100/n_1. \quad (2)$$

Від ковзання суттєво залежить робота асинхронної машини та її режими.

Згідно з принципом оборотності, асинхронна машина може працювати в режимі двигуна та в режимі генератора. Крім цього, як і у машин постійного струму, можливий також і гальмівний режим роботи. Уявимо, що вал асинхронної машини з'єднаний з валом пристрою, момент якого M_2 (M_1) може змінюватись як за величиною, так і за напрямом.

Режим двигуна. В цьому режимі асинхронна машина призначена для перетворення електричної потужності, що поступає з мережі, в механічну. З мережі змінного струму двигун споживає як активну P_1 , так і реактивну Q_1 потужність, остання необхідна для створення обмоткою статора обертового магнітного поля. Активна електрична потужність частково перетворюється у механічну P_2 і віддається пристрою (момент якого, направлений проти моменту M_{em} , що розвиває двигун), а частково – у втрати, розсіюючись і нагріваючи активні частини машини (рис. 2).

В момент пуску, під впливом інерційності, ротор якийсь час лишається нерухомим ($n_2 = 0$), тому ковзання s дорівнює одиниці. Під час розгону ковзання знижується до нуля при ідеальному НХ ($n_2 = n_1$). Це можливо, якщо пристрій на валу не гальмує, а навпаки, моментом M_1 обертає ротор.

При номінальному навантаженні ковзання називається *номінальним ковзанням* $s_{ном}$ і змінюється від 0,01 до 0,08 тобто (1 – 8) %. Тут менші значення відносять до більш потужних двигунів, а більші – до двигунів меншої потужності.

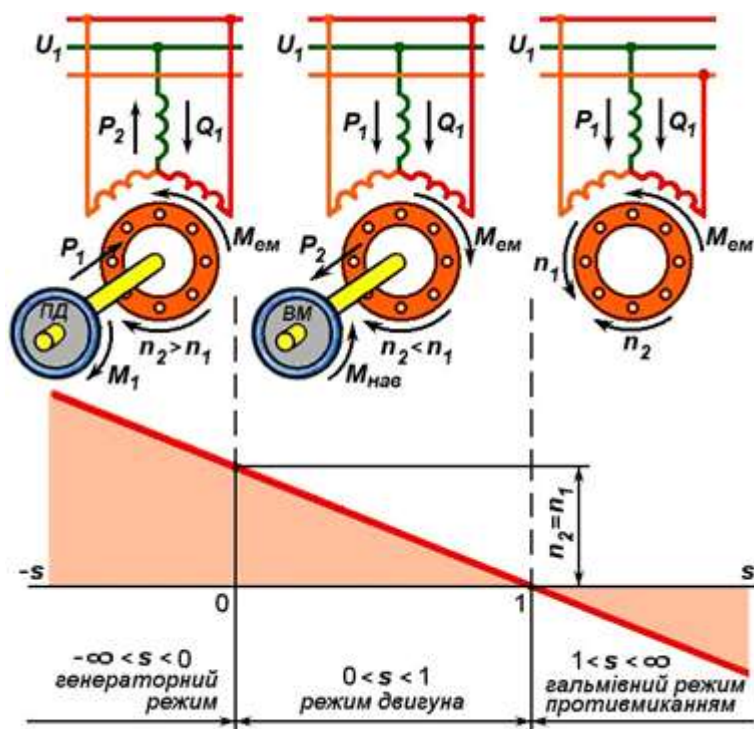


Рисунок 2 – Режими роботи асинхронної машини

Перетворивши вираз (1), можна отримати формулу для визначення асинхронної частоти обертання з якою обертається ротор, об/хв.:

$$n_2 = n_1(1 - s). \quad (3)$$

Генераторний режим. Якщо вал машини обертати моментом M_1 у напрямі обертання магнітного поля з частотою обертання n_2 , більшою від частоти n_1 , то машина перейде в генераторний режим роботи ($n_2 > n_1$). При цьому механічна потужність P_1 , що поступає на вал машини перетворюється частково в активну електричну потужність P_2 , що віддається в мережу, а частково, у втрати. З мережі, як і у режимі двигуна, буде споживатись реактивна електрична потужність Q_1 , необхідна для створення магнітного поля, тому що сам асинхронний генератор такої потужності не виробляє.

Так як ротор обертається швидше від магнітного поля, то ковзання машини в цьому режимі буде від'ємним і змінюватиметься від 0 до $-\infty$. Зміна знаку ковзання приводить до зміни напрямку ЕРС в обмотці ротора. Дійсно тепер ротор обертаючись випереджає поле, тобто, перетинається ним в іншому напрямі. Змінюється і напрям струму та електромагнітного моменту, який стає гальмівним і протидіє моменту приводного двигуна M_1 .

Гальмівний режим. Такий режим може мати місце у двох випадках. По-перше, якщо у двигуна, що працює, провести реверсування (помінявши місцями, наприклад, фази A і C), то магнітне поле почне обертатися в іншому

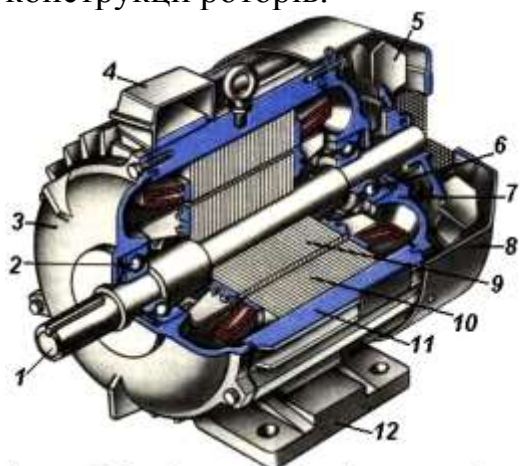
напрямі, а ротор, по інерції, в тому ж, що й обертався. Електромагнітний момент M_{em} із рушійного стане гальмівним, а ковзання більшим від одиниці, тому що ротор і поле обертаються в різні боки. По-друге, якщо на валу двигуна діє активний гальмівний момент (який, наприклад, розвиває вантаж через барабан підйомника) більший, ніж момент пусковий, що його розвиває двигун, то в цьому випадку ротор під дією цього моменту також буде обертатись проти обертання поля.

В обох випадках із мережі споживається, як і у режимі двигуна, активна і реактивна потужність (для створення магнітного поля), при цьому активна потужність, частково, затрачується на компенсацію механічної потужності ротора, що обертається, а частково на втрати, як і у попередніх режимах.

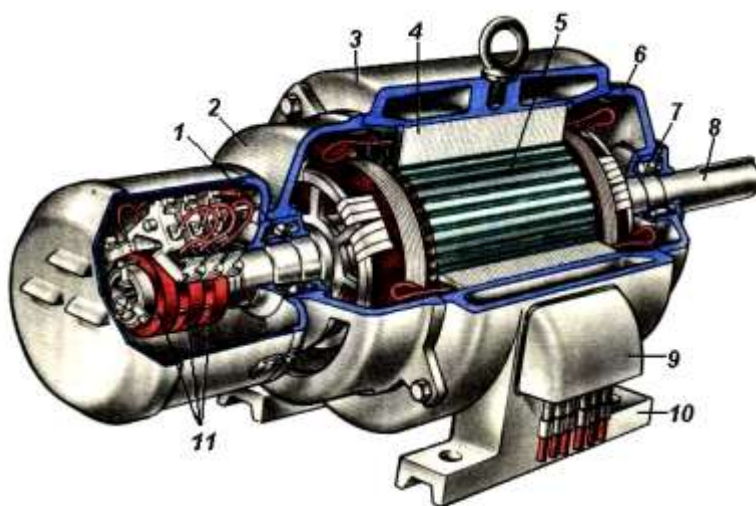
Підсумовуючи викладене про режими роботи асинхронної машини, можна стверджувати, що у будь-якому режимі є нерівність частот обертання ротора і поля, тобто, наявність ковзання, адже тільки в цьому випадку кругове обертове магнітне поле створює в роторі ЕРС і на ротор діє електромагнітний момент. При цьому кожному режимові роботи асинхронної машини відповідає визначений діапазон зміни ковзання, а відповідно і частоти обертання ротора (3).

Конструкція асинхронних двигунів

За конструкцією асинхронні двигуни поділяють на два види: двигуни з короткозамкнутою обмоткою ротора (з короткозамкненим ротором) (рис. 3) та з фазною обмоткою ротора (з фазним ротором) (рис. 5). Слід зазначити, що статори цих двигунів, практично, не відрізняються і їх конструкція розглядалась у попередньому розділі, тому тут зупинимось лише на конструкції роторів.



1 – вал; 2, 6 – підшипник; 3, 7 – підшипниковий щит;
4 – коробка відводів; 5 – вентилятор; 8 – кожух
вентилятора; 9 – осердя ротора із замкнутою
обмоткою; 10 – осердя статора з обмоткою;
11 – зовнішня оболонка; 12 – лапи кріплення
Рисунок 3 – Конструкція трифазного
асинхронного двигуна з короткозамкненим
ротором



1, 7 – підшипники; 2, 6 – підшипникові щити; 3 – корпус; 4 – осердя
статора з обмоткою; 5 – осердя ротора з фазною обмоткою; 8 – вал;
9 – коробка відводів; 10 – лапи; 11 – контактні кільця
Рисунок 5 – Побудова асинхронного двигуна з фазним
ротором

Ротор двигуна з короткозамкнутою обмоткою складається з вала, на який насаджено пакет заліза з пазами, в яких розміщується замкнена коротко обмотка. Така обмотка, вона ще називається “біляче колесо”, уявляє собою низку металевих (алюмінієвих, бронзових чи мідних) стрижнів, розташованих

в пазах осердя ротора, і замкнених з обох боків замикаючими кільцями (рис. 4, а). Осердя ротора набирається із пластин, які штампуються одночасно з пластинами осердя статора, але не покриваються ізоляційним лаком, як пластини статора, а мають лише оксидну плівку, яка є достатньою ізоляцією, що обмежує вихрові струми. Величина цих струмів у робочому режимі незначна, тому що частота перемагнічування осердя ротора мала.

Замкнена коротко обмотка ротора у більшості двигунів виконується шляхом заливки пазів осердя ротора розплавленим алюмінієвим сплавом (рис. 4, б).

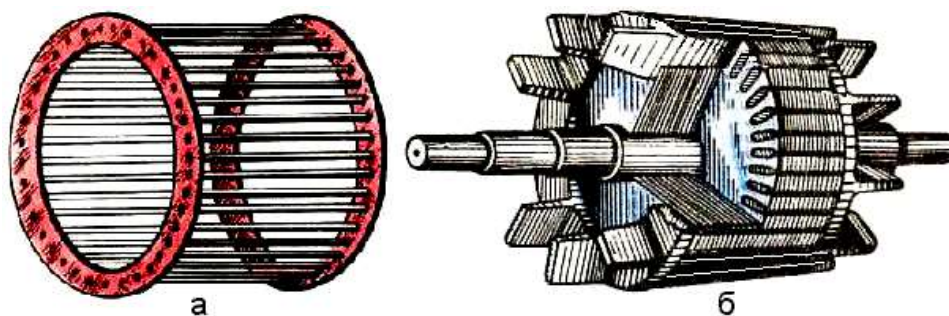


Рисунок 4 – Обмотка типу "біляче колесо" (а) та ротор асинхронного двигуна з обмоткою, виконаною методом лиття під тиском (б)

При цьому, у деяких двигунів, одночасно на замикаючих кільцях відливаються і вентиляційні лопатки. Принципова електрична схема ввімкнення такого двигуна до мережі зображена на (рис. 6, а).

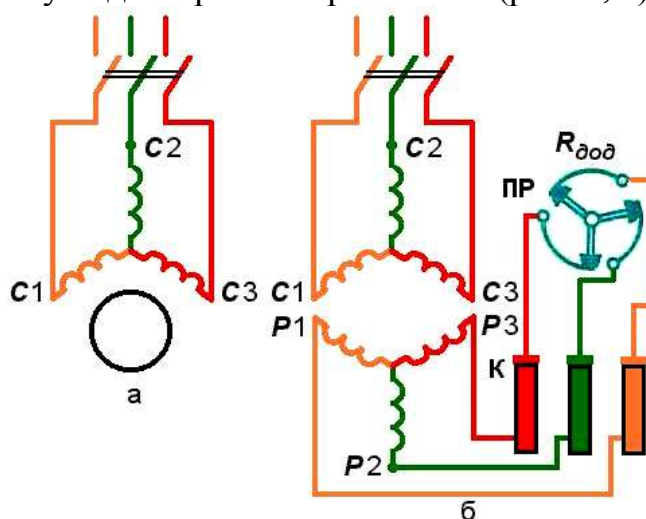
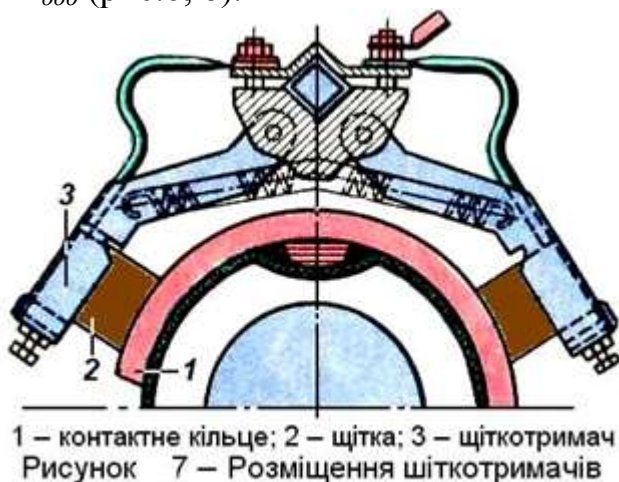


Рисунок 6 – Електричні схеми ввімкнення в мережу трифазних асинхронних двигунів з короткозамкненим (а) та фазним ротором (б)

Як і ротор двигуна з замкнутою коротко обмоткою, фазний ротор має вал з осердям, в пази якого вкладається обмотка. Обмотка такого ротора виконується, по аналогії з обмоткою статора, трифазною сполученою в зірку, а її кінці виведені на три контактних кільця. Тому такий двигун ще називають *асинхронним двигуном з контактними кільцями*. Контактні кільця (рис. 7) ізолюються одне від одного і від стрижня, на якому жорстко закріплюються. Для здійснення електричного контакту з обмоткою ротора, який обертається, на кожне контактне кільце 1 накладаються, як правило, дві щітки 2, що

розташовані у щіткотримачах 3. Кожен щіткотримач має пружину, яка забезпечує необхідний тиск щітки на контактне кільце. Самі щіткотримачі закріплюються на передньому підшипниковому щиті двигуна і закриваються кожухом.

Асинхронні двигуни з фазним ротором (рис. 5) конструктивно більш складні, ніж двигуни з замкненим коротко ротором, а тому і менш надійні в роботі, але вони мають кращі регульовальні та пускові властивості завдяки можливості ввімкнення в коло ротора через контактні кільця К та перемикач ПР додаткових опорів $R_{доd}$ (рис.6, б).



На корпусі асинхронного двигуна закріплюється металева табличка, на якій вказуються тип двигуна, завод, на якому він виготовлений, рік виготовлення та номінальні дані (корисна механічна потужність на валу, напруга і струм через дріб при сполученні трикутником та зіркою, коефіцієнт потужності, частота обертання, ККД, маса тощо).

4.2. ЕРС статора і ротора

Електрорушійна сила (ЕРС) в асинхронній електричній машині виникає в обмотках статора і ротора внаслідок електромагнітної індукції при змінному магнітному полі повітряного зазору.

ЕРС статора.

При підключенні обмотки статора до мережі змінного струму в ній протікає струм, який створює обертове магнітне поле. Це поле зчіплюється з витками обмотки статора та індукує в них ЕРС самоіндукції. Діюче значення фазної ЕРС статора визначається виразом

$$E_1 = 4,44 f_1 w_1 k_{w_1} \Phi,$$

де f_1 – частота живильної мережі,

w_1 – число витків фази обмотки статора,

k_{w_1} – обмотковий коефіцієнт статора,

Φ – магнітний потік, що зчіплюється з фазою.

ЕРС статора практично врівноважується прикладеною напругою мережі за винятком падінь напруги на активному опорі та індуктивному опорі розсіювання обмотки.

ЕРС ротора.

Обертове магнітне поле статора перетинає провідники ротора і індукуює в них ЕРС. Значення ЕРС ротора залежить від ковзання s , оскільки частота струму ротора визначається як:

$$f_2 = sf_1.$$

ЕРС фази ротора при ковзанні s можна записати у вигляді

$$E_1 = 4,44 f_2 w_2 k_{w_2} \Phi = 4,44 f_1 w_1 k_{w_1} \Phi,$$

де w_2 – число витків фази обмотки статора,

k_{w_2} – обмотковий коефіцієнт статора.

При пуску асинхронного двигуна ($s=1$) ЕРС ротора має максимальне значення, а в усталеному режимі при малих значеннях ковзання вона істотно зменшується.

Такий зв'язок ЕРС статора і ротора з магнітним потоком та ковзанням визначає електромагнітні процеси, режим роботи та енергетичні показники асинхронної електричної машини.

4.3. Рівняння електричної рівноваги статора і ротора

Перетворимо рівняння напруг ротора (11.18), розділивши обидві його частини на ковзання:

$$\frac{\dot{E}_2}{s} = \dot{I}_2 \frac{R_2}{s} + \dot{I}_2 \cdot j \frac{X_2}{s}. \quad (11.25)$$

З огляду на те, що $\frac{\dot{E}_2}{s} = \dot{E}_{2H}$, а $\frac{X_2}{s} = X_{2H}$, можна записати

$$\dot{E}_{2H} = \dot{I}_2 \frac{R_2}{s} + \dot{I}_2 \cdot j X_{2H}. \quad (11.26)$$

Беручи до уваги, що $I_2 = I_2' k_i$, де I_2' – наведений струм ротора, тобто частина струму статора, що врівноважує розмагнічуючу дію струму ротора, $k_i = \frac{m_1 \cdot w_1 \cdot k_1}{m_2 \cdot w_2 \cdot k_2}$ – коефіцієнт трансформації струмів АД, помноживши (11.26) на коефіцієнт трансформації ЕРС k_e (11.8), одержимо

$$\dot{E}_{2H} \cdot k_e = \dot{I}_2' \frac{R_2 \cdot k_e \cdot k_i}{s} + \dot{I}_2' \cdot j X_{2H} \cdot k_e \cdot k_i,$$

або
$$\dot{E}_2' = \dot{I}_2' \frac{R_2'}{s} + \dot{I}_2' \cdot j X_{2H}', \quad (11.27)$$

де $E_2' = E_{2H} \cdot k_e$ – приведена до статора ЕРС нерухомого ротора, вона дорівнює ЕРС статора E_1 ;

$R_2' = R_2 \cdot k = R_2 \cdot k_e \cdot k_i$ – приведений до статора активний опір обмотки ротора;

$X_{2H}' = X_{2H} \cdot k = X_{2H} \cdot k_e \cdot k_i$ – приведений індуктивний опір нерухомого ротора;

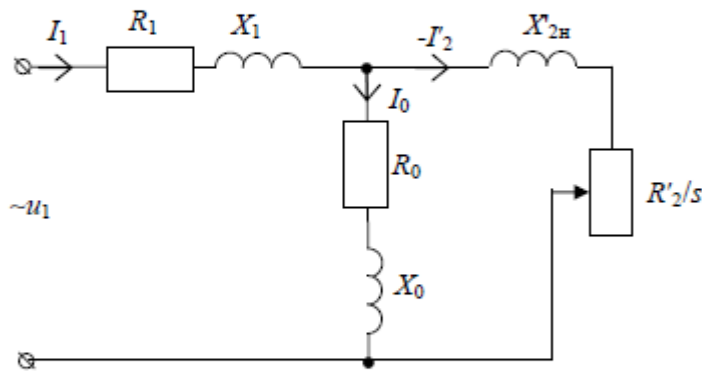
$k = k_e \cdot k_i = \frac{m_1 \cdot w_1^2 \cdot k_1^2 \cdot k^2}{m_2 \cdot w_2^2 \cdot k^2}$ – коефіцієнт приведення опорів ротора до статора.

Така заміна дійсних величин ротора приведеними не змінює енергетичних співвідношень в ньому, але дозволяє перейти від електромагнітного зв'язку між колами ротора і статора до електричного зв'язку між ними.

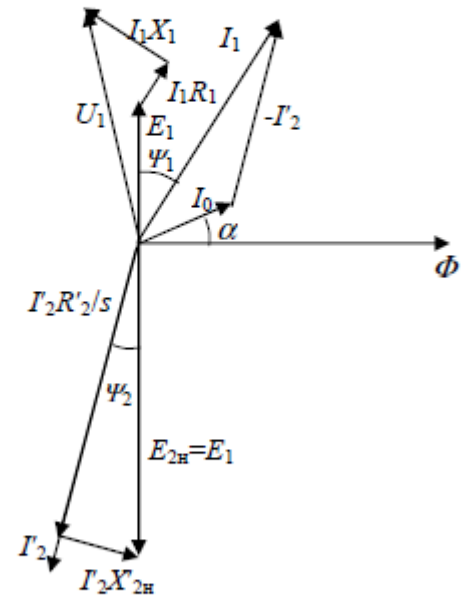
4.4. Схема заміщення асинхронного двигуна

АД може бути представлений електричною схемою заміщення, наведеною на рисунку 11.8. Цій схемі заміщення відповідає повна векторна діаграма асинхронного двигуна, що зображена на рисунку 11.9. Гілка схеми із струмом I_0 називається гілкою намагнічування. Опори R_0 і X_0 визначаються магнітними властивостями магнітопроводу. Падіння напруги, викликане струмом I_0 , дорівнює й протилежне за фазою ЕРС статора E_1 і наведений ЕРС ротора E_2 .

$$\dot{I}_0 \cdot R_0 + \dot{I}_0 \cdot jX_0 = -\dot{E}_1 = -\dot{E}_2.$$



Рисунку 11.8 – Схема заміщення АД



Рисунку 11.9 – Повна векторна діаграма АД

Параметри схеми заміщення можуть бути встановлені розрахунком або за дослідними даними. Для АД, як і для трансформаторів, проводять дослід холостого ходу і короткого замикання.

4.5. Втрати і ККД асинхронного двигуна

Коефіцієнт корисної дії (*efficiency*) (ККД) електричної машини визначається відношенням корисної потужності до підведеної та виражається у відсотках:

$$\eta = \frac{P_2}{P_1} \cdot 100,$$

або

$$\eta = \frac{P_1 - \Sigma P}{P_1} \cdot 100 = \frac{P_2}{P_2 + \Sigma P} \cdot 100,$$

де: P_1 – потужність, яка підводиться до електричної мережі;

P_2 – корисна потужність (*operating power; useful power*) електричної машини;

ΣP – сумарні втрати в електричній машині, які дорівнюють **$P_1 - P_2$** .

Оскільки під час випробувань завжди контролюється електрична потужність, то перший вираз у формулі використовується для визначення ККД двигунів, а другий – ККД генераторів.

Машина під час визначення ККД не повинна мати вібрацій, недопустимих шумів; її підшипники, підп'ятники, колектор (або контактні кільця) і щітки повинні бути припрацьовані, а температура всіх частин машини дорівнювати робочій. Температура охолоджувального середовища не повинна перевищувати граничних значень, які встановлено стандартами. Для визначення ККД електричної машини використовують два методи: безпосередній та непрямий. Безпосередній метод визначення ККД із використанням формули застосовується, як правило, для машин з ККД не більшим 85%. У цьому випадку ККД визначають такими способами:

- спосіб вимірювання потужності (спосіб “двигун-генератор”), за використання якого потужність, яка підводиться та віддається, визначається за допомогою електровимірювальних приладів;

- спосіб гальмування, під час якого обертовий момент, що розвивається двигуном, та відповідну йому потужність, яка віддається, визначають за допомогою пристрою гальмування, а електричну потужність, яка підводиться, – за допомогою електровимірювальних приладів;

- спосіб навантаження (спосіб тарованої машини), під час якого електрична потужність, що споживається двигуном (видається генератором), визначається за допомогою електровимірювальних приладів, а механічна потужність двигуна, яка віддається (потужність генератора, що споживається), вимірюється за допомогою тарованої машини, потужність якої повинна бути сумірна з потужністю випробуваної машини. Тарованою машиною вважається електрична машина з відомими витратами в будь-якому режимі роботи.

Непрямий метод визначення ККД із використанням формули застосовується для машин з ККД більшим 85%. Він базується на вимірюванні таких втрат потужності в електричній машині:

$P_{ст}$ – втрати потужності в сталі;

$P_{мех}$ – механічні втрати;

$P_1 - P_2$ – основні втрати потужності в колах робочих обмоток машини;

$P_{доп}$ – втрати потужності в перехідних контактах щіток, на збудження та додаткові (втрати, які не враховано в інших випадках).

Сумарні складові основних втрат у колах робочих машин, втрати в

перехідних контактах щіток та втрати на збудження визначаються шляхом розрахунків, а втрати в сталі (*core loss; iron loss*) та механічні втрати – дослідним шляхом.

Щодо додаткових втрат, то для синхронних машин потужністю більше 100 кВА їх рекомендують визначати дослідним шляхом, а для інших машин – розрахунковим. В останньому випадку вони приймаються рівними 1% від потужності, яка віддається некомпенсованими генераторами постійного струму або 1% від потужності, яка підводиться до некомпенсованих двигунів постійного струму та колекторних двигунів змінного струму. Для інших машин додаткові втрати приймаються рівними 0,5% від потужності, виробленої генераторами або спожитої двигунами.

Основні втрати в обмотці якоря машини постійного струму, у послідовно з'єднаних з нею інших обмотках (послідовній обмотці збудження, обмотці додаткових полюсів та компенсаційній обмотці), а також основні втрати в обмотці якоря синхронної машини потужністю до 100 кВА та в обмотці статора асинхронної машини розраховуються за формулою:

$$P_{e1} = m_1 \cdot I_1^2 \cdot r_1,$$

де P_{e1} – електричні втрати у вказаних обмотках, Вт;

m_1 – кількість фаз обмотки;

I_1 – робочий струм фази, А;

r_1 – опір обмотки фази на постійному струмі відносно розрахункової робочої температури, Ом.

Розрахункова робоча температура обмотки приймається рівною:

– 75°C – для обмоток, гранично допустимі перевищення температури яких відповідають класам нагрівостійкості А, Е, В;

– 115°C – для обмоток, гранично допустимі перевищення температури яких відповідають класам нагрівостійкості F, H.

Основні втрати в обмотці ротора P_{e2} асинхронної машини визначають через електромагнітну потужність P_{em} та ковзання s (*slip, slipping*):

$$P_{em} = P_1 \pm (P_{\sigma} + P_{e1}),$$

$$P_{e2} = s \cdot P_{em}.$$

В формулі знак “–” відповідає режиму двигуна асинхронної машини, а знак “+” – генераторному, причому асинхронна машина (*asynchronous*

machine) в режимі двигуна споживає потужність P_1 , а в генераторному цю потужність віддає.

Втрати в паралельних обмотках збудження розраховують за струмом та напругою збудження. В машині зі збудженням від незалежного джерела втрати на збудження визначаються за струмом збудження та опором обмотки збудження на постійному струмі, який зведено до розрахункової робочої температури. У випадку збудження від електромашинного збуджувача враховуються втрати в збуджувачі та усіх пристроях, які входять в його комплект, за виключенням механічних втрат.

Втрати в перехідних контактах щіток кожної полярності розраховують за струмом та за перехідним спадом напруги, яка приймається рівною:

– 1 В – для вугільних (*carbon(-baked) brush*) та графітових щіток (*graphite brush*);

– 0,3 В – для металовугільних та металографітових щіток.

Для експериментального визначення втрат потужності в сталі та механічних втрат (а також додаткових втрат синхронних машин потужністю більше 100 кВ×А) можна використовувати способи обертання в режимі ненавантаженого двигуна, тарованої машини, самогальмування та калориметричний (*calorimetric method*).

Вказані способи використовуються за усталеного теплового стану частин машини, яка випробовується.

Спосіб обертання в режимі ненавантаженого двигуна використовується для машин усіх типів, які допускають обертання в режимі холостого ходу під час живлення від джерела напруги.

Машина, що випробовується, обертається в режимі холостого ходу з номінальною частотою та напругою, яка змінюється від значення, з якого проводиться випробування міжвиткової ізоляції на електричну міцність, до найменшого значення, яке забезпечує стійке обертання з цією частотою.

Постійність частоти обертання досягається підтриманням незмінної частоти прикладеної напруги в машинах змінного струму та регулюванням струму збудження в машинах постійного струму. Збудження синхронних машин та машин постійного струму за будь-якої системи збудження здійснюється від незалежного джерела. Для машин постійного струму вимірюють прикладену напругу, струм і частоту обертання, а для машин змінного струму, крім того, частоту мережі та активну потужність, яка підводиться.

Суму втрат потужності в сталі та механічних втрат визначають відніманням від вимірної підведеної потужності основних втрат, які

створюються в обмотках робочого кола машин, і втрат в перехідних контактах щіток. Основні втрати розраховують за опором обмоток одразу після закінчення досліду.

Спосіб тарованого двигуна використовується для синхронних машин та машин постійного струму. Машину, яка випробовується, приводять в обертання з номінальною частотою тарованим двигуном та збуджують від незалежного джерела. Для визначення втрат в сталі та механічних втрат напругу на виводах обмотки розімкненого якоря машини змінюють регулюванням струму збудження від найбільшої напруги, яка відповідає випробуванню міжвиткової ізоляції, до напруги, яка відповідає залишковому намагнічуванню за розімкненої обмотки збудження. Одночасно вимірюють потужність, яка підводиться до тарованого двигуна, і усі величини, які необхідні для визначення втрат в ньому.

Суму механічних втрат і втрат потужності в сталі машини, яка випробовується, розраховують як різницю підведеної потужності та втрат в тарованому двигуні.

Даний спосіб використовується для визначення суми основних втрат в обмотці якоря та додаткових втрат синхронних машин потужністю більше $100 \text{ кВ} \times \text{А}$.

Спосіб самогальмування використовується для машин постійного струму та асинхронних машин, які мають значний момент інерції (*moment of inertia*) ротора. Для визначення втрат частоту обертання машини доводять до значення, яке дещо перевищує номінальне, після цього джерело енергії вимикають. В ході випробувань машин постійного струму проводять два досліди: самогальмування без збудження та самогальмування на холостому ході й струмі збудження, якому відповідає номінальна напруга на виводах розімкненої обмотки якоря за номінальної частоти обертання.

Для синхронних машин потужністю більше $100 \text{ кВ} \times \text{А}$ додатково проводять третій дослід – самогальмування для симетричного КЗ на виводах обмотки якоря та номінального струму в цій обмотці (збудження машини здійснюється від окремого джерела постійного струму).

Діапазон зміни частоти обертання в досліді складає $(110,90)\%$ від номінальної, а в деяких випадках може бути зменшений до $(105,95)\%$. Під час досліду записується зміна частоти обертання n в функції часу, а також контролюються покази електровимірювальних приладів (в колі якоря машини) в момент проходження номінальної частоти обертання. Розрахунок втрат виконується за осцилограмою $n(t)$ з використанням формули:

$$P = J \cdot n_n \cdot \frac{dn}{dt},$$

де P – втрати в машині, які викликають її гальмування, Вт;

J – момент інерції ротора (або роторів, у випадку використання для розгону допоміжного двигуна), значення якого відоме, $\text{кг} \times \text{м}^2$;

n_n – номінальна частота обертання машини, $1/\text{с}$;

$\frac{dn}{dt}$ – сповільнення ротора в точці $n = n_n$, $1/\text{с}^2$.

У випадку використання допоміжного двигуна повинні бути відомі його механічні втрати та момент інерції ротора.

З першого досліду за формулою визначають механічні втрати $P_{\text{мех}}$, з другого – схему механічних втрат та втрат потужності у сталі $P_{\text{мех}} + P_{\text{ст}}$, з третього – суму механічних та додаткових втрат, а також втрат в обмотці якоря $P_{\text{мех}} + P_{\text{дод}} + P_{\text{ел}}$ (втрати потужності в сталі внаслідок малої величини робочого потоку в режимі КЗ можна не враховувати).

Калориметричний спосіб більш трудомісткий, ніж спосіб самогальмування, оскільки він дає правильні результати для усталеного теплового процесу, час досягнення якого може бути дуже значним. Суть методу полягає у вимірюванні втрат (газ, масло, вода). Для визначення втрат, вимірюють втрати в охолоджувальних середовищах та підвищення їх температури після проходження через машину, яка знаходиться в практично усталеному тепловому стані або порівнянням нагріву охолоджувальних середовищ під час проходження через машину та через пристрій, в якому виділяється аналогічна потужність (якщо конструкція машини не допускає вимірювання втрат охолоджувальних середовищ).

Сумарні втрати розраховуються за формулою:

$$\Sigma P = \Sigma V_i \cdot C_i \cdot \Delta t_i,$$

де V_i – витрати i -го охолоджуючого середовища, $\text{м}^3/\text{с}$;

C_i – об'ємна теплоємність середовища, $\text{Дж}/(\text{м}^3 \times \text{К})$;

Δt – різниця температур середовища на виході та вході машини, К.

Під час застосування калориметричного способу проводять три досліди з номінальною частотою обертання:

- з недозбудженою машиною – для визначення механічних втрат;
- з розімкненою обмоткою якоря та номінальною напругою на ній – для

визначення суми втрат в сталі, механічних втрат та втрат на збудження для струму збудження холостого ходу;

- з замкненою накоротко обмоткою якоря з номінальним струмом якоря – для визначення суми механічних втрат, основних втрат в обмотці якоря, додаткових втрат та втрат на збудження для струму збудження короткого замикання.

Останній дослід проводять для визначення основних втрат в обмотці якоря та додаткових втрат в синхронних машинах потужністю більше 100 кВ×А. Втрати в кожному досліді розраховуються за формулою.

Під час розрахунку ККД синхронних машин і машин постійного струму, отримані дослідним шляхом втрати в сталі та механічні втрати не потрібно розділяти, а для асинхронних машин – потрібно.

Для визначення втрат потужності в сталі та механічних втрат в асинхронних двигунах можуть бути використанні два способи: калориметричний та спосіб обертання в режимі ненавантаженого двигуна.

Під час використання калориметричного способу визначають механічні втрати $P_{\text{мех}}$ й суму втрат в сталі $P_{\text{ст}}$, механічні та електричні втрати в обмотці статора. Електричні втрати $P_{\text{ел}}$ за відомих значень струму, активного опору й температури обмотки статора (з дослідів) визначають розрахунковим шляхом за формулою. Визначивши $P_{\text{мех}}$ та суму $P_{\text{мех}} + P_{\text{ст}} + P_{\text{ел}}$, розраховують втрати в сталі $P_{\text{ст}}$.

Під час використання способу обертання в режимі ненавантаженого двигуна дослід проводять для декількох значень прикладеної напруги. В результаті отримують залежність $P_{10}(U_1)$, де P_{10} – сума механічних втрат, втрат в сталі та електричних втрат в обмотці статора. Віднімаючи від P_{10} електричні втрати (за відомого значення струму I_{10} та опору обмотки статора), отримують залежність $P_{10} = P_{\text{мех}} + P_{\text{ст}} = f(U_1)$, як показано на рисунку 9.

Оскільки дослід повинен проводитись з постійною частотою обертання, механічні втрати під час дослідів повинні залишитись постійними. Втрати в сталі залежать від квадрата прикладеної напруги. Отже, якщо будувати залежність $P_{10} = f(U_1^2)$, то вона повинна бути прямолінійною (дивись рисунок 2.4) і відсікати на осі ординат відрізок, який кількісно дорівнюватиме механічним втратам. Віднімаючи механічні втрати з $P_{10} = f(U_1^2)$, отримуємо втрати потужності в сталі.

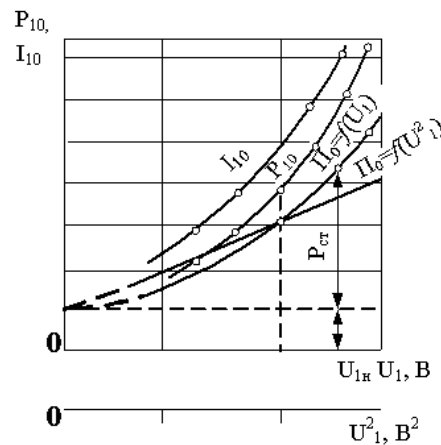


Рис. 9 – Визначення механічних втрат та втрат потужності в сталі у досліді обертання асинхронної машини в режимі ненавантаженого двигуна

4.6. Обертовий момент асинхронного двигуна

Загальний вираз моменту. Електричні втрати в роторі з урахуванням його приведення

$$p_{m2} = m_2 E_{2s} I_2 \cos \varphi_2 = m_2 E_2 s I_2 s \cos \varphi_2 = m_1 E'_2 s I'_2 \cos \varphi_2 \quad (1)$$

де m_1 і m_2 - кількість фаз статора і ротора відповідно, а φ_2 - кут зсуву між ЕРС і струмом ротора. Співставивши вирази (11.20) і (11.21), побачимо, що електромагнітна потужність

$$p_{em} = m_2 E_2 I_2 \cos \varphi_2 \quad (2)$$

Тоді, згідно (11.16), обертальний момент з урахуванням (11.6)

$$M = \frac{P_{em}}{\Omega_1} = \frac{m_2 E_2 I_2 \cos \varphi_2}{2\pi f_1 / p} = \frac{m_2 4,44 k_{об2} w_2 f_1 \Phi I_2 \cos \varphi_2}{2\pi f_1 / p} = c_m \Phi I_2 \cos \varphi_2 \quad (3)$$

де $c_i = 2,22 m_2 p k_{i\dot{a}2} w_2 / p$ - стала.

Обертальний момент асинхронного двигуна залежить не від повного струму в роторі, а лише від його активної складової $I_2 \cos \varphi_2$. Цей висновок, як і формула (3) справджується для електричних машин всіх типів.

Момент і втрати в колі ротора. Формулу (3) можна записати так:

$$M = \frac{P_{em}}{\Omega_1} = \frac{p_{m2} / s}{\Omega_1} \quad (4)$$

тобто обертальний момент асинхронного двигуна залежить від електричних втрат в колі ротора. Значить, двигун, обмотка ротора якого має значний опір, розвиває при інших рівних умовах значніший момент. В той же час збільшення електричних втрат робить роботу двигуна менш економною.

Залежність моменту від напруги. Електричні втрати в роторі
 $p_{m2} = m_2 I_2^2 r_2 = m_1 I_2'^2 r_2'.$

$$p_{m2} = m_1 r_2' \left(\frac{U_1}{\sqrt{(r_1 + r_2' / s)^2 + (x_1 + x_2')^2}} \right) \quad (5)$$

Остаточне рівняння обертового моменту:

$$M = \frac{p m_1 U_1 \frac{r_2'}{s}}{\omega [(r_1 + r_2' / s)^2 + (x_1 + x_2')^2]} \quad (6)$$

Формула (6) дозволяє зробити важливий практичний висновок: *обертовий момент, асинхронного двигуна пропорційний квадрату напруги, прикладеної до статора.* Ця властивість асинхронного двигуна є його істотним недоліком. Наприклад, якщо допоміжний двигун електровоза розвиває момент M при напрузі в контактній мережі 10 кВ, то при допустимому зменшенні напруги до 7 кВ обертовий момент становитиме $(7/10)M = 0,49M$, що може негативно відобразитися на роботі механізму приводу і самого двигуна. Тому асинхронні двигуни електровозів вибирають зі значним запасом по потужності у порівнянні з двигунами постійного струму, що приводять в дію аналогічні механізми.

Залежність моменту від ковзання. З виразу (6) випливає, що при $s > 0$ також $M > 0$, тобто має місце режим двигуна або режим електромагнітного гальма; при $s < 0$ також $M < 0$ (режим генератора). Крім цього, $M = 0$ при $s = 0$ або $s = \pm\infty$; отже, між цими значеннями ковзання знаходяться (максимум і мінімум) моменту.

4.7. Робочі характеристики асинхронних двигунів.

Механічна характеристика, що являє собою графічну залежність $M = f(s)$ при $U_1 = \text{const}$ і $f_1 = \text{const}$, може бути побудована за рівнянням (6), якщо задатися різними (додатними і від'ємними) значеннями ковзання (рис. 1, а). З рисунка видно, що момент досягає максимуму при деякому ковзанні $s_{kp} \approx 0,15 \div 0,3$, що називається *критичним*. Форма кривої $M = f(s)$ вказує на те, що асинхронний двигун може стійко працювати тільки в діапазоні ковзань від $s = 0$ до $s = s_{kp}$, коли момент збільшується з ковзанням від $M = 0$ до $M = M_{\text{max}}$. Після перевищення критичного ковзання момент зменшиться і двигун неминуче повинен зупинитися. Таким чином, асинхронний двигун має границю по навантаженню, що визначає максимум обертового моменту.

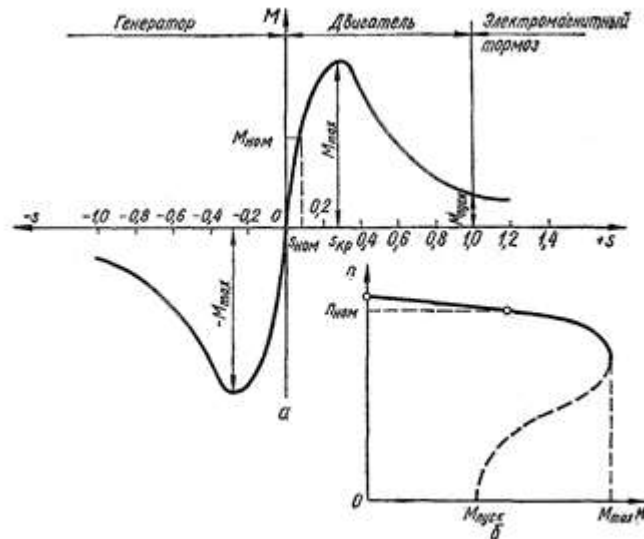


Рис. 1. Механічні характеристики асинхронної машини

Варто пам'ятати, що в діапазоні великих ковзань ($s > s_{кр}$), різко збільшуються втрати у сталі і обмотці ротора в порівнянні з номінальним режимом. Теплота, що при цьому виділяється, може призвести до несправності двигуна, навіть до виправлення "білчиної клітки" ротора.

Максимальне значення моменту (критичне ковзання) можна визначити, взявши похідну від моменту (6) по ковзанню і прирівнявши до нуля, тобто $dM/ds = 0$. В результаті цієї звичайної математичної операції отримаємо

$$s_{кр} = \pm \frac{r'_2}{\sqrt{r_1^2 + (x_1 + x'_2)^2}} \quad (7a)$$

У звичайних електричних машинах $r_1 \ll (x_1 + x'_2)$; тому, нехтуючи величиною r_1 отримуємо

$$s_{кр} \approx \pm \frac{r'_2}{x_1 + x'_2} = \pm \frac{r'_2}{x_k} \quad (7б)$$

Де $x_k = x_1 + x'$ - один з параметрів короткого замикання за (8.28в)

Значення максимального моменту визначимо за (6), підставляючи значення $s_{кр}$ з (7б) і приймаючи $r_1 = 0$:

$$M_{max} = \pm \frac{pm_1 U_1^2}{2\omega_1 x_k} = \pm \frac{pm_1 U_1^2}{4\pi f_1 x_k} \quad (8)$$

де знак "+" відноситься до режиму двигуна, "-" до режиму генератора.

З рівняння (8) видно, що максимальний момент залежить лише від конструктивних параметрів двигуна, (величини x_k) і в процесі експлуатації не може бути змінений. Активний опір кола ротора за (7) визначає тільки значення $s_{кр}$ при M_{max} .

Відношення максимального моменту до номінального називається *коефіцієнтом перевантажувальної здатності*; звичайно

$$k_m = M_{\max} / M_{\text{ном}} = 1,8 \div 2,5$$

В момент запуску $s=1$; тому значення $M_{\text{зап}}$ можна отримати, підставивши це значення ковзання асинхронного двигуна в загальноприйнятій функції $n=f(M)$ побудована на рис. 1б із залежності $M = f(s)$, так як n і s пов'язані між собою. Суцільною лінією зображена робоча частина характеристики.

Як бачимо, при збільшенні навантаження навалі, частота обертання двигуна зменшується. За своїм виглядом робоча частина характеристики аналогічна механічній характеристиці двигуна постійного струму паралельного збудження. Якщо навантаження на валу збільшиться до $M_{\max}$, то двигун може перейти на постійну (штрихову) частину характеристики, де одночасно почне зменшуватися і обертальний момент, що розвиває двигун, і частота обертання аж до зупинки двигуна.

4.8. Пуск асинхронних двигунів

При пуску АД, за можливістю, мають задовольнятися основні вимоги, а саме: процес пуску має бути простим і здійснюватися без складних пускових пристроїв; пусковий момент має бути досить великим, а пусковий струм, за можливістю, — малим. Іноді до цих вимог додають інші, зумовлені конкретними умовами експлуатації двигунів, зокрема: необхідність максимального пускового моменту, плавного пуску та ін.

Здебільшого використовують такі способи пуску: прямий пуск -- шляхом безпосереднього підключення обмотки статора до мережі; пуск при зниженні напруги, підведеної до обмотки статора; увімкнення реостата в обмотку ротора.

Прямий пуск застосовують для АД із короткозамкненим ротором малої та середньої потужностей. Двигуни цього типу зазвичай проектують так, щоб при прямому підключенні до мережі обмотки статора пускові струми не створювали недопустимих перевищень температури й електродинамічних зусиль, небезпечних для термічної й механічної міцності основних вузлів, насамперед обмоток ЛМ.

В АД відношення L/R порівняно мале (особливо в малих двигунах), тому перехідний процес вмикання характеризується дуже швидким згасанням вільної складової струму. Це дж змозгу розглядати тільки усталене значення пускового струму.

Двигуни зазвичай пускають за допомогою магнітного пускача К (рис. 3.36, а). Вони розганяються автоматично за природною механічною

характеристикою M (рис. 3.36, б) від точки //, що відповідає початковому моменту пуску, до точки P , що відповідає умові $M = M_{CT}$.

Прискорення при пуску визначається відношенням різниці значень M і M_{CT} відповідних кривих до приведенного моменту інерції (I обертових частин механізму й ротора АД):

$$d \Omega_2 / dt = (M - M_{CT}) / J.$$

Якщо на початковий момент пуску $M < M_{CT}$, то двигун розігнатися не зможе.

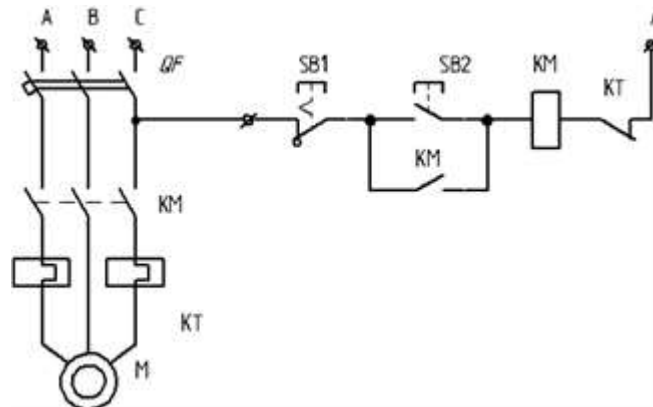


Рис. 3.36. Схема прямого пуску АД

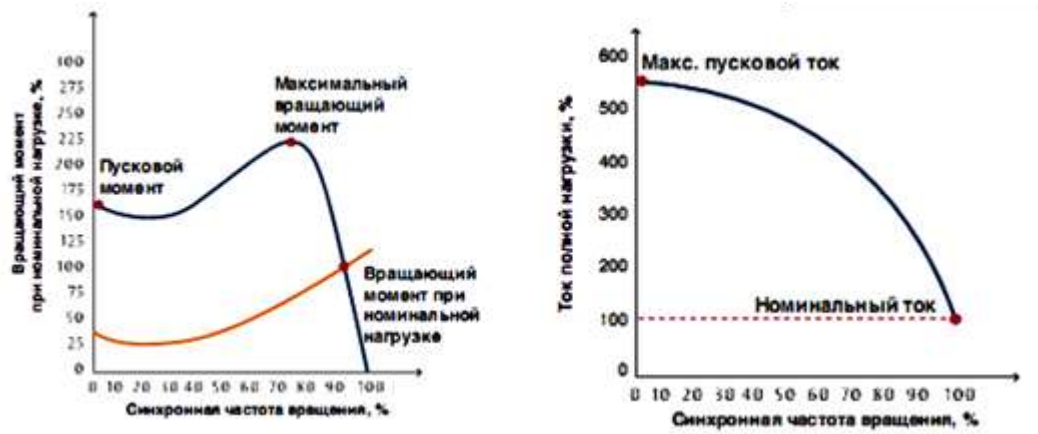


Рис. 3.36а. графіки зміни моментів та струму

Значення початкового пускового моменту можна знайти за допомогою формули (3.68) при $s=1$:

$$M_n = m_1 U_1^2 R_2 / \{ w_1 [(R_1 + R_2)^2 + (X_1 + X_2')^2] \}. \quad (3.87)$$

Відношення $M_n / M_n = K_n$ називають кратністю пускового моменту. Для двигунів із короткозамкненим ротором потужністю 0,6...100 кВт зазвичай $K_n = 1,0...2,0$; потужністю 100... 1000 кВт $K_n = 0,7...1,0$.

Відношення $I_n / I_n = K_I$ називають кратністю пускового струму; $K_n = 4,0...7,0$; великі значення зазвичай належать до більшої потужності.

Підвищення кратності пускового моменту одержують збільшенням активного опору обмотки ротора при пуску, *що* найчастіше пов'язано з погіршенням енергетичних параметрів двигуна.

Недоліки прямого пуску.

1. Невеликий пусковий момент.
2. Великий кидок пускового струму, *що* призводить іноді до відчутного зниження напруги в мережі.
3. Можливість "застигання" АД на мінімумі механічної характеристики, особливо при зниженні напруги живлення.

Незважаючи на зазначені недоліки, прямий пуск широко застосовують завдяки простоті й належним техніко-економічним показникам двигуна з короткозамкненим ротором — низькій вартості, малим габаритам, високому ступеню надійності й високим енергетичним параметрам (η , $\cos\phi_1$ та ін.).

Пуск при зниженні напруги використовують для АД із короткозамкненим ротором великої потужності, а також для двигунів середньої потужності при недостатньо потужних електричних мережах. Напругу можна знижувати такими способами.

1. Перемиканням обмотки статора з пускової схеми "зірка" на робочу схему "трикутник" (рис. 3.37, *а*). При пуску двигун вмикають за схемою "Y", тоді фазні напруги і струми в $\sqrt{3}$ разів, а лінійні струми — у три рази менші, ніж при "Δ". У міру розгону двигуна і наближення до номінальної частоти обертання обмотку статора перемикають на "Δ", і двигун виходить на номінальну частоту обертання.
2. Вмиканням на період пуску в коло обмотки статора додаткових активних (резисторів) чи реактивних (реакторів) опорів (рис. 3.37, *б*). На цих опорах виникають певні спади напруги $\Delta U_{\text{дод}}$, пропорційні до пускового струму, внаслідок чого на обмотку статора надходить знижена напруга. У міру розгону двигуна пусковий струм знижується і, відповідно, зменшується $\Delta U_{\text{дод}}$ на додаткових опорах. При цьому прикладена до двигуна напруга зростає. Після закінчення розгону додаткові резистори (реактори) замикають на коротко контакторо.

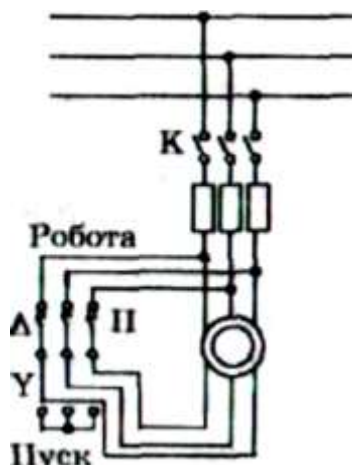


Рис. 3.37. Схема ввімкнення АД при пуску зі зниженням напруги

3. Підключенням обмотки статора АД до мережі через знижувальний автотрансформатор АТ (рис. 3.37, в), що може мати кілька ступенів, які перемикають у процесі пуску відповідною апаратурою. Двигун вмикають на напругу АТ, при якій його пусковий струм є припустимим, а момент — достатнім. У міру розгону ротора і зниження пускового струму підвищують напругу, що подається на двигун до номінальної при наближенні до номінальної частоти обертання.

4. Застосуванням джерела напруги з регульованими амплітудою і частотою. Обмотку статора підключають безпосередньо до джерела, амплітуду і частоту напруги якого підвищують за певним законом у міру розгону двигуна. Цей спосіб пуску не відрізняється від способу частотного регулювання АД.

Основним недоліком перелічених способів пуску шляхом зниження напруги є значне (у 3 рази і більше) зменшення пускового і максимального моментів двигуна, що пропорційні до квадрата прикладеної напруги. Тому їх використовують тільки при пуску АД без навантаження.

Виняток становить пуск від джерела з регульованою частотою, що дає змогу одержати пусковий момент, який практично дорівнює максимальному, у зв'язку з чим цей спосіб пуску — найбільш сучасний і перспективний.

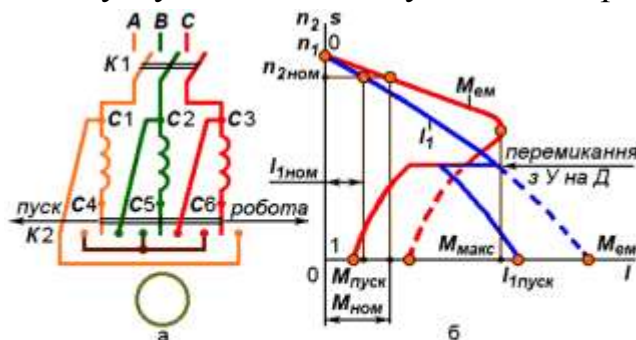


Рисунок 4.27 — Схема пуску перемиканням обмотки статора асинхронного двигуна з зірки на трикутник (а) та графіки зміни струму і моменту при такому пуску (б)

Рис. 3.38.

На рис. 3.38 показано механічні характеристики двигуна при номінальній і зниженій напрузі, тобто при з'єднанні обмотки статора за схемами "Y" і "Δ", а також графіки зміни струму I_1 і моменту M при пуску двигуна перемиканням із "Y" на "Δ". При з'єднанні за схемою "Y" максимальний і пусковий моменти зменшуються у три рази, внаслідок чого АД не в змозі здійснити пуск механізму з навантажувальним моментом, наближеним до номінального.

Пуск за допомогою реостата у колі ротора використовують для АД із фазним ротором. Якщо в коло ротора ввімкнути пусковий реостат, то активний опір кола ротора збільшиться, а індуктивний — залишиться незмінним. Оскільки максимальний момент не залежить від активного опору ротора, то можна вибрати таке значення R_n , щоб $R'_n + R'_2 = X_1 + X'_2$, і тоді $s_{кр} = 1$, тобто пусковий момент буде дорівнювати максимальному.

Асинхронні двигуни є основою сучасного електроприводу змінного струму. Ефективність роботи цього електропривода багато в чому визначається можливостями регулювання частоти обертання. Можливості асинхронних двигунів відносно регулювання частоти обертання ротора визначаються формулою

$$n = \frac{60f_1}{p}(1-s)$$

Із цього рівняння випливає, що частоту обертання можна регулювати трьома способами: шляхом зміни частоти f_1 , числа пар полюсів p і ковзання s .

Контрольні питання

1. Поясніть, як влаштовані обмотки ротора короткозамкненого асинхронного електродвигуна і асинхронного електродвигуна з контактними кільцями.
2. Як обирають схему з'єднань обмоток статора і як встановити однойменні виведення фазних обмоток статора?
3. Як створюється обертаючий момент асинхронного електродвигуна, і чому ротор не може самостійно досягти синхронної швидкості обертання?
4. Як впливає на асинхронний електродвигун зміна навантаження на валу?
5. Який вигляд має механічна характеристика АД і що вона характеризує?
6. Як залежать ЕРС ротора і частота струму ротора від ковзання?
7. Яка роль ЕРС статора? Як записується рівняння напруг статора і ротора?
8. Як залежить від ковзання струм ротора і його фаза?
9. На підставі яких рівнянь будується повна векторна діаграма і схема заміщення асинхронного електродвигуна?
10. Які види втрат потужності мають місце в асинхронному електродвигуні?

11. Як залежать електричні втрати в роторі від ковзання?
12. Від чого залежить обертаючий момент асинхронного електродвигуна?
Проаналізуйте його залежність від ковзання.
13. Що розуміють під коефіцієнтом перевантажувальної здатності, і яка його величина для звичайних асинхронних електродвигунів?
14. Поясніть умови стійкої роботи асинхронного електродвигуна.
15. Від чого і як залежать критичний момент і критичне ковзання?
16. Які можливості є для впливу на механічну характеристику асинхронного електродвигуна?
17. За якими показниками оцінюються пускові властивості двигуна?
18. Охарактеризуйте переваги і недоліки прямого пуску асинхронних короткозамкнених двигунів.
19. Охарактеризуйте переваги і недоліки пуску в хід двигунів на зниженій напрузі.

ТЕМА 5. ЗАГАЛЬНІ ВІДОМОСТІ ПРО ЕЛЕКТРОПРИВОД ВИРОБНИЧИХ МАШИН І МЕХАНІЗМІВ

Перелік питань

- 5.1 Основні поняття
- 5.2 Механіка електропривода
- 5.3 Рівняння руху електропривода
- 5.4 Механічні характеристики виробничих механізмів і електродвигунів
- 5.5 Вибір електродвигуна

5.1 Основні поняття

Електричним приводом (ЕП) називається електромеханічний пристрій, призначений для автоматизації робочих процесів.

ЕП складається (рис. 5.1) з електродвигуна ЕД, передавального пристрою ПП, перетворювача П і керуючого пристрою КП. В ЕП, залежно від поставлених до нього вимог, використовують двигуни постійного струму незалежного, паралельного, послідовного або змішаного збудження, АД, крокові електродвигуни та ін. Основним завданням електродвигуна в приводі є перетворення електроенергії джерела живлення ДЖ (зокрема, електромережі) на механічну енергію обертового вала (обертовий двигун) або на енергію мас, що переміщуються лінійно (лінійний двигун). Іншими словами, двигун має розвивати рухові зусилля: рушійний момент або рушійну механічну силу, які передаються робочому органу РО.

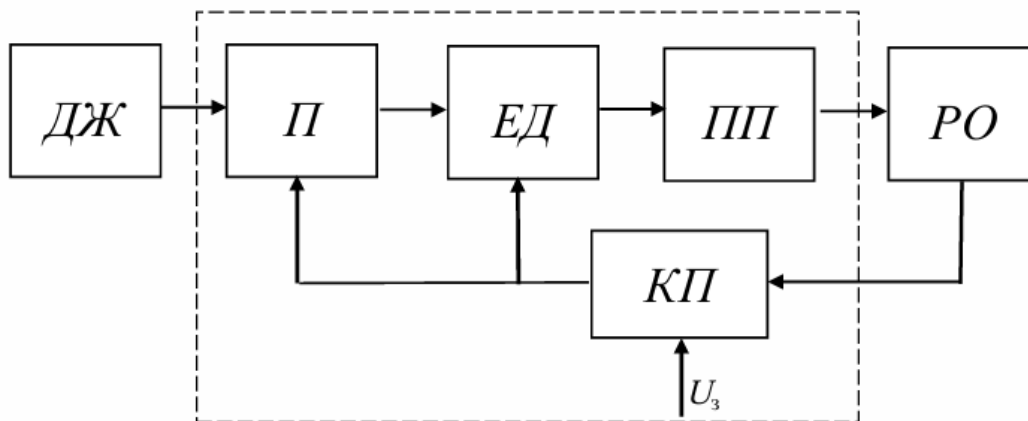


Рис. 5.1 – Структурна схема електропривода

Електродвигун також здійснює зворотне перетворення механічної енергії обертання або лінійного переміщення, що надходить від робочого механізму, на електричну. В цьому режимі він створює гальмовий момент.

У сучасному ЕП двигун надає руху РО через передавальний пристрій, що знижує або підвищує частоту обертання (редуктори, клиноремінні передачі та ін.), або змінює вид руху (зубчасто-рейкові, кривошипно-шатунні та ін.). Іноді електродвигун безпосередньо з'єднують з робочим механізмом.

Важливим елементом ЕП є перетворювач, наявність якого викликана необхідністю зміни частоти обертання. Переважно цього домагаються

регулюванням напруги і частоти струму, споживаного двигуном. Для роботи двигуна постійного струму треба забезпечити його живленням від джерела постійної напруги.

Керуючий пристрій ЕП служить для керування перетворенням електричної енергії на механічну і забезпечення необхідної якості технологічного процесу. Він являє собою сукупність функціонально зв'язаних один з одним електромагнітних, електромеханічних, напівпровідникових та інших елементів. До таких елементів належать кнопки керування та командоапарати, реле і контактори, блоки безконтактної автоматики та ін. Сучасні високоточні ЕП містять у своїй системі керування обчислювальні комплекси й ЕОМ спеціального призначення.

5.2 Механіка електропривода

Механічна частина ЕП передає механічну енергію від електричного двигуна до виробничої машини, де ця енергія реалізується на корисну роботу. Конструктивне виконання механічної частини ЕП може бути досить різним, проте, вона містить певні ланки із загальними для різних приводів функціями. Електродвигун як ланка механічної частини привода становить собою джерело або споживач механічної енергії. До механічної частини привода входить лише його обертовий елемент (ротор або якір), який має певний момент інерції, може обертатися з певною швидкістю і розвивати рушійний або гальмуючий момент.

Передатний пристрій здійснює перетворення руху в механічній частині електропривода. За допомогою передатного пристрою може збільшуватися або зменшуватися швидкість, змінюватися вид руху, наприклад, здійснюватися перетворення обертового руху на поступальний та ін. До передавальних механізмів належать редуктори, гвинтові, зубчасто-рейкові або пасові передачі, барабан із тросом, кривошипно-шатунний механізм та ін.

Передавальний механізм характеризується коефіцієнтом передачі, що представляє собою відношення швидкості на виході до швидкості на вході, механічною інерційністю і пружністю його елементів, зазорами і тертям у зачепленнях пристрою.

Робочий орган виробничої машини реалізує підведену до нього механічну енергію на корисну роботу. Найчастіше він є споживачем енергії. Ця функція робочого органа характерна для механізмів, які здійснюють обробку матеріалів, підйом або переміщення вантажів та ін. При цьому потік механічної потужності спрямований від двигуна до робочого органа. Іноді робочий орган може бути джерелом механічної енергії. У цьому випадку він віддає механічну енергію, яка була накопичена, наприклад при підйомі вантажу, або надійшла до механізму ззовні, наприклад при вітровому навантаженні на поверхню крана. Потік механічної потужності при цьому спрямований від робочого органа до двигуна.

Робочий орган характеризується певною інерційністю, робочим моментом при його обертотому русі або робочим зусиллям при поступальному русі. У кожному конкретному механізмі він має своє конструктивне

виконання. Зокрема, на підйомному крані робочим органом є гак, грейфер механізмів підйому, візок, міст механізмів пересування, поворотна платформа механізмів повороту. На підйомнику – це кабіна, кліть, скіп. На екскаваторі – ківш механізмів напору, тяги і підйому одноковшевих екскаваторів, робоче колесо роторних екскаваторів, поворотна платформа механізмів повороту.

Передача механічної енергії від вала двигуна до робочого органа або назад пов'язана з втратами в механічних ланках. Причина втрат – тертя в підшипниках, напрямних, зачепленнях та ін. У механічних ланках, які мають пружність, виникають додаткові втрати, зумовлені в'язким тертям у елементах, що деформуються. У результаті цього потік потужності, проходячи від джерела до споживача, поступово зменшується. Очевидно, що втрати механічної енергії покриваються джерелом енергії – двигуном при прямому потоці енергії і робочим органом при зворотному.

5.3 Рівняння руху електропривода

При вивченні руху ЕП виникає необхідність визначення різних механічних величин – шляху і кута повороту, швидкості і прискорення, а також моментів і сил, що викликають рух і визначають його характер.

Рух ЕП визначається дією двох моментів: моменту, що розвивається двигуном, і моменту опору. Залежно від причини, що зумовлює виникнення моменту опору, розрізняють реактивний і активний моменти опору.

Реактивний момент опору з'являється тільки внаслідок руху – це протидіюча реакція механічної ланки на рух, наприклад, моменти тертя, що виникають в обертових елементах та ін. Реактивний момент спрямований завжди проти руху, тобто має знак, протилежний знаку швидкості.

Елемент, що створює реактивний момент, може бути тільки споживачем енергії.

Активний момент опору з'являється незалежно від руху електропривода і створюється сторонніми джерелами механічної енергії. Це, наприклад, момент, зумовлений вагою вантажу, який переміщується за вертикаллю, момент, створений силою вітру. Напрямок активного моменту не залежить від напрямку обертання, тобто знак активного моменту не пов'язаний із знаком кутової швидкості. При зміні напрямку обертання знак цього моменту зберігається. Джерело, що створює активний момент, може як споживати, так і віддавати енергію.

У системах ЕП основним режимом роботи електричної машини є режим двигуна. При цьому момент опору має гальмуючий характер щодо руху ротора і діє назустріч моменту двигуна. Тому додатний напрямок моменту опору приймають протилежним додатному напрямку моменту двигуна, і основне рівняння руху ЕП має вигляд

$$M - M_{\text{о}} = J \frac{d\omega}{dt}.$$

У рівнянні моменти є алгебраїчними, а не векторними величинами, оскільки обидва моменти M і $M_{оп}$ діють відносно тієї ж самої осі обертання.

Праву частину рівняння (13.10) називають динамічним моментом $M_{дин}$, тобто

$$M_{дин} = J \frac{d\omega}{dt}, \quad (14.11)$$

де момент інерції J визначається як

$$J = \int_m r^2 m, \quad (14.12)$$

де r – відстань від осі симетрії;
 m – маса тіла.

З рівняння (14.11) випливає, що при $M = M_{оп}$ швидкість обертання електропривода буде незмінною ($\omega = \text{const}$), а динамічний момент відсутній, тому що $\frac{d\omega}{dt} = 0$. Такий *режим називається сталим*.

При $M > M_{оп}$ маємо $\frac{d\omega}{dt} > 0$, що відповідає прискоренню двигуна. Динамічний момент у цьому випадку спрямований протилежно моменту двигуна, обмежуючи прискорення. Якщо $M < M_{оп}$, то $\frac{d\omega}{dt} < 0$, і двигун уповільнюється. Динамічний момент при цьому діє згідно з моментом двигуна.

5.4 Механічні характеристики виробничих механізмів і електродвигунів

При розгляданні роботи електродвигуна, що надає рух виробничому механізму, необхідно насамперед виявити відповідність механічних характеристик двигуна характеристиці виробничого механізму.

Механічною характеристикою виробничого механізму називають залежність між швидкістю і приведеним до вала двигуна моментом опору механізму $\omega = f(M_{\text{оп}})$.

Механічні характеристики виробничих механізмів поділяють на наступні групи.

Механічна характеристика, момент опору якої $M_{\text{оп}}$ не залежить від швидкості (пряма 1 на рис. 14.2). Таку характеристику мають, наприклад, підйомні крани, лебідки та ін. Сюди ж можуть бути віднесені з певним наближенням усі механізми, де основним моментом опору є момент тертя.

Лінійно зростаюча механічна характеристика (пряма 2 на рис. 14.2). У цьому випадку момент опору лінійно залежить від швидкості ω , збільшуючись із її зростанням.

Нелінійно зростаюча (параболічна) механічна характеристика (крива 3 на рис. 14.2). Момент опору $M_{\text{оп}}$ тут залежить від квадрата швидкості. Механізми, які мають таку характеристику, називають іноді механізмами з вентиляторним моментом, оскільки у вентиляторів момент опору залежить від квадрата швидкості. До механізмів, які мають таку механічну характеристику, належать також відцентрові насоси, гребні гвинти, екскаватори та ін.

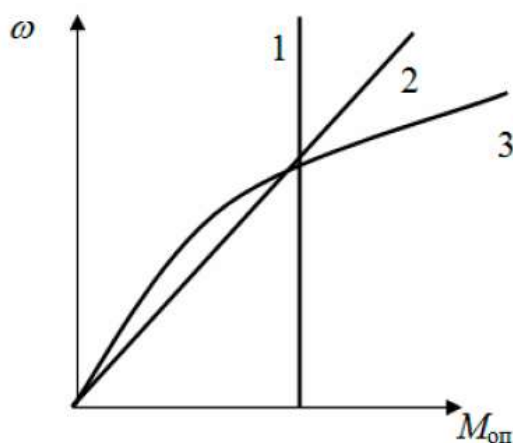


Рисунок 14.2 – Механічні характеристики виробничих механізмів

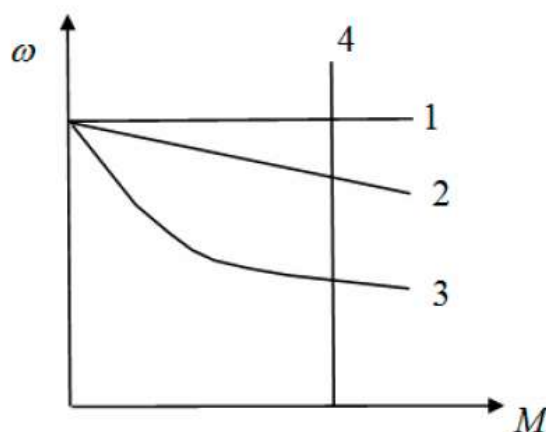


Рисунок 14.3 – Механічні характеристики двигунів

5.5 Вибір електродвигуна

Вибір електродвигуна є відповідальним етапом проектування електропривода і здійснюється з урахуванням технологічних вимог механізму, режимів роботи та умов експлуатації. Правильно обраний електродвигун забезпечує надійну, економічну та довговічну роботу привода.

Насамперед визначається необхідна потужність електродвигуна, яка має бути не меншою за розрахункову потужність навантаження з урахуванням коефіцієнтів корисної дії та запасу:

$$P_{\text{дв}} \geq \eta P_n \cdot k_z,$$

де P_n – потужність навантаження на валу механізму,

η – загальний ККД привода,

k_z – коефіцієнт запасу потужності.

Далі враховується характер навантаження (постійне, змінне, ударне), що впливає на вибір типу двигуна та допустиму перевантажувальну здатність. Для більшості промислових механізмів застосовуються асинхронні електродвигуни з короткозамкненим ротором завдяки простоті конструкції, високій надійності та невеликим експлуатаційним витратам.

Важливим критерієм є частота обертання двигуна, яка визначається синхронною швидкістю обертового магнітного поля та числом пар полюсів. Частоту обертання вибирають відповідно до вимог робочого механізму або можливостей використання редуктора.

Також враховуються пускові характеристики електродвигуна: пусковий момент, пусковий струм та тривалість пуску. Для механізмів із великим пусковим моментом або частими пусками можуть застосовуватися двигуни з підвищеним пусковим моментом або спеціальні схеми пуску.

На завершальному етапі враховуються умови експлуатації: напруга і частота мережі, кліматичне виконання, ступінь захисту оболонки (ІР), спосіб охолодження, клас ізоляції та режим роботи за стандартом. На основі всіх наведених вимог із каталогу стандартних електродвигунів обирають конкретну марку і тип двигуна, що найбільш повно відповідає умовам роботи електропривода.

Контрольні питання

1. Дайте визначення електричного привода. Назвіть його основні елементи. Як класифікують системи електроприводів?
2. Як визначають передатне відношення передатного механізму?
3. Що таке статичний момент? Від чого він залежить?
4. Охарактеризуйте поняття «приведений момент інерції» і «динамічний момент».
5. Для чого виконують зведення моментів до однієї осі двигуна?
6. Як записується рівняння руху ЕП?
7. Від чого залежать режими роботи ЕП?
8. Від чого залежить час перехідного режиму ЕП?
9. Охарактеризуйте поняття жорсткості механічної характеристики. Як класифікують механічні характеристики за жорсткістю?
10. Дайте визначення статичної стійкості електропривода.
11. Від чого залежить нагрівання електричного двигуна?

12. Які можливі режими роботи електродвигунів і за яких умов вибирають їхню потужність?

13. Як обирають потужність двигуна для режиму тривалого постійного навантаження?

14. Як обирають двигун за методом середніх втрат?

15. У чому полягає сутність методу еквівалентного струму та методу еквівалентного моменту, які галузі їхнього застосування?

16. У якому випадку режим роботи двигуна вважають тривалим?

17. Який режим називають повторно-короткочасним, як при цьому визначають відносну тривалість включення?

18. Як обирають потужність двигуна для повторно-короткочасного режиму? Який режим називають короткочасним?

ТЕМА 6. ЗАГАЛЬНІ ПОНЯТТЯ ПРО СИСТЕМИ АВТОМАТИЧНОГО КЕРУВАННЯ

Перелік питань

- 6.1. Загальні відомості та визначення теорії систем автоматичного керування.
- 6.2. Класифікація елементів, що входять до складу САК
- 6.3. Принципи розімкненого керування
- 6.4. Принцип керування за відхиленням
- 6.5. Класифікація систем автоматичного керування за алгоритмом функціонування
- 6.6. Класифікація систем автоматичного керування за властивостями в усталеному режимі

6.1. Загальні відомості та визначення теорії систем автоматичного керування

Автоматика – технічна наука, яка розробляє принципи побудови автоматичних систем та необхідних для них засобів, методи аналізу і синтезу цих систем.

Керування технічним процесом – цілеспрямована діяльність, направлена на досягнення бажаних результатів (отримання прибутку, мінімальної собівартості продукції, забезпечення її якості) на основі отримання та обробки інформації про стан об'єкта та умови його роботи. Роль людини зводиться проектування, налагодження, запуску САК, епізодичному контролю за правильністю роботи, зупинці системи та інших побічних функцій, безпосередньо не пов'язаних з операціями керування.

В процесі керування виконується ряд операцій, які відповідають таким етапам :

- збирання інформації про стан об'єкта та зовнішнє середовище;
- аналіз та обробка інформації;
- прийняття рішень на основі необхідної інформації;
- реалізація керуючих діянь за допомогою технічних засобів.

Виконання цих операцій забезпечує автоматичний контроль процесу, пуск та зупинку технологічних агрегатів, підтримання необхідних режимів при виконанні вимог надійності та стійкості.

Автоматичне керування – сукупність дій, які вибрані із множини можливих і направлені на підтримання або покращення функціонування керованого об'єкта згідно мети його керування.

Автоматичне регулювання – це підтримання постійним або змінним за певним законом якоїсь вихідної величини, що характеризує процес.

Автоматичний контроль – це контроль різних параметрів, величин в об'єкті з метою встановити: чи не вийшли вони за межі допустимих значень.

Найбільш загальними визначеннями, що лежать в основі всієї термінології теоретичних основ автоматики, є наступні: алгоритм, алгоритм

функціонування, об'єкт керування, алгоритм керування, керування, автоматичний керуючий пристрій, система автоматичного керування.

Алгоритмом називають сукупність приписів, що встановлюють скінченну послідовність точно заданих дій, виконання яких приводить до кінцевого результату. Термін “алгоритм” використовують найчастіше у сполученні зі словами “функціонування” і “керування”.

Алгоритм функціонування – це сукупність правил, що ведуть до правильного виконання технічного процесу в якому-небудь пристрої або в сукупності пристроїв (системі).

Об'єкт керування (ОК) – це пристрій (або сукупність пристроїв), що здійснює технічний процес і потребує спеціально організованих впливів ззовні для забезпечення свого алгоритму функціонування.

Алгоритм керування – це сукупність приписань, що визначають характер впливів на ОК з метою забезпечення його алгоритму функціонування.

Керування - процес виконання впливів на ОК відповідно до алгоритму керування.

Автоматичний керуючий пристрій (АКП) – це пристрій, що здійснює без участі людини процес керування.

Система автоматичного керування (САК) – сукупність ОК і АКП, які взаємодіють між собою з метою забезпечення заданого алгоритму функціонування ОК.

САК можна подати у вигляді схеми, наведеної на рис. 6.1.

Величини $y(t)$ на виході ОК характеризують його стан і, отже, у процесі керування повинні цілеспрямовано змінюватися або підтримуватися постійними. Вони називаються **керованими величинами** або **керованими змінними**.

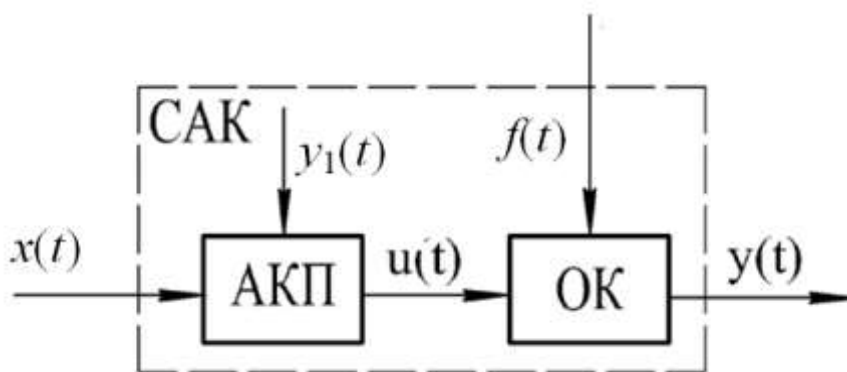


Рисунок 6.1 – Структура САК

Керовані величини залежать від вхідних впливів. Останні поділяються на дві принципово різні групи: **керуючі** $u(t)$ і **збурюючі** $f(t)$ впливи.

Керуючі впливи виробляються в АКП відповідно до алгоритму керування на основі інформації про необхідні значення керованих величин $x(t)$ і інформації про стан ОК - $y_1(t)$, забезпечуючи бажане функціонування ОК.

Збурюючі впливи $f(t)$, заважають нормальному функціонуванню ОК і змінити їх, як правило, неможливо.

Алгоритм управління в загальному випадку виражає залежність керуючого впливу $u(t)$ від задаючого впливу $x(t)$, керованої величини $y(t)$ і збурюючих факторів $f(t)$. Впливи $f(t)$ і $x(t)$ є зовнішніми для даної системи, а дія $u(t)$ – внутрішнім.

6.2. Класифікація елементів, що входять до складу САК

Загальний випадок побудови системи автоматичного керування (САК) показано на рис. 6.2.

Елемент-задатчик – перетворює дію, яка задається $q(t)$, в величину $q_1(t)$, що дозволяє її порівняти з величиною, яка керується $y_1(t)$ (або перетворює сигнал величини, що керується).

Чутливий елемент – вимірює дійсне значення керованої величини $y(t)$ і перетворює її в величину $y_1(t)$ для порівняння з заданою $q_1(t)$.

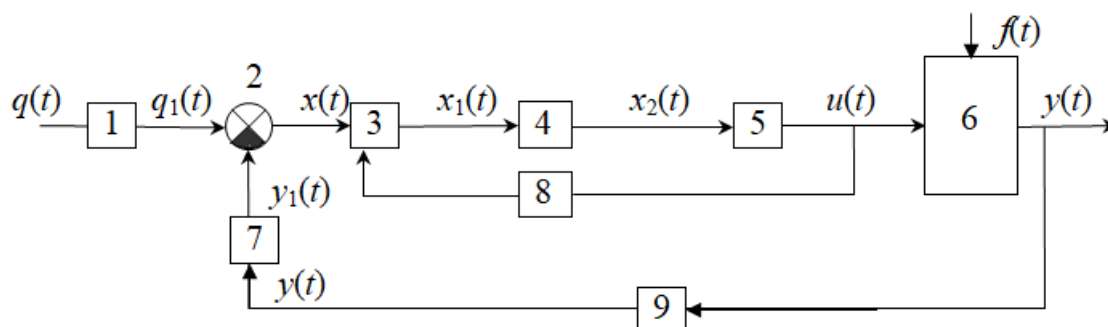


Рисунок 6.2 – Загальна структура САК

1 – елемент-задатчик; 2 – елемент порівняння; 3 – перетворювач сигналу; 4 – підсилювач; 5 – виконавчий пристрій; 6 – об’єкт керування; 7 – чутливий елемент; 8 – місцевий зворотний зв’язок; 9 – головний зворотний зв’язок.

Елемент порівняння – проводить вимірювання різниці сигналів $x(t) = q_1(t) - y_1(t)$.

Перетворювач сигналу – перетворює сигнал в придатний вигляд для подальшої обробки або використання.

Підсилювач – підсилює сигнал до величини $x_2(t)$, що дозволяє привести в дію виконавчий пристрій.

Виконавчий пристрій – виробляє та подає на регулюючий орган об’єкта керування дію $u(t)$.

Місцевий зворотний зв’язок (або *корекція*)- вводить для поліпшення якісних параметрів керування.

Головний зворотний зв’язок – це зв’язок між виходом і входом системи.

Деякі елементи САК можуть бути об’єднані. Наприклад, підсилювач та перетворювач сигналу можуть утворювати підсилювально-перетворювальний пристрій.

6.3. Принципи розімкненого керування. Принцип керування за збуренням

Принципи розімкненого керування залежно від того, збурювальна чи задавальна дія викликала відхилення $\varepsilon(t)=x(t)-y(t)$, поділяються на принцип керування за збуренням і принцип керування за задавальною дією.

Вважаємо, що структура ОК налічує два канали впливу зовнішніх дій на керовану величину $y(t)$: канал збурення $f(t)$ і канал керування $u(t)$.

Функціональна схема САК з принципом керування за збуренням зображена на рис. 6.3.

Збурювальна дія $f(t)$ через канал збурення об'єкта впливає на керовану величину $y(t)$, спричиняючи відхилення $\varepsilon_f(t)=x(t)-y(t)$, викликане збуренням, вимірюється ця дія, і в процесі її перетворення та обробки формується керувальна дія $u(t)$, що, будучи прикладеною до входу ОК, викликає компенсуюче відхилення керованої величини протилежного знака порівняно з відхиленням $f(t)$.

Інакше кажучи, керувальна дія $u(t)$ з виходу ППЕ надходить на вхід ОК і через його канал керування компенсує вплив збурювальної дії, викликаючи протилежну реакцію об'єкта порівняно з реакцією, викликану збурювальною дією через канал збурення об'єкта

Для прикладу розглянемо спрощену принципову схему системи, що реалізує принцип керування за збуренням (рис. 6.4).

Наведена схема є схемою САК частотою обертання електродвигуна. Вона працює таким чином. При збільшенні моменту навантаження M_n (збільшується корисне навантаження на валу двигуна або ж збільшується тертя в підшипниках, редукторі тощо, що є збільшенням збурювальної дії $f(t)$)—зменшується частота обертання двигуна n . Але це приводить до збільшення якісного струму. Унаслідок цього зростають сумарні ампервитки $(I \cdot W)$ компенсаційної обмотки W_k , яка є зв'язком за збуренням, зростає потік компенсаційної обмотки, який, збігаючись за напрямком із керувальним потоком ЕМП — потоком обмотки керування $W_{кер}$, додається до нього, збільшуючи тим самим напругу на виході ЕМП, а отже, частоту обертання двигуна, в результаті чого швидкість обертання ротора двигуна M залишається незалежною від зміни моменту навантаження.

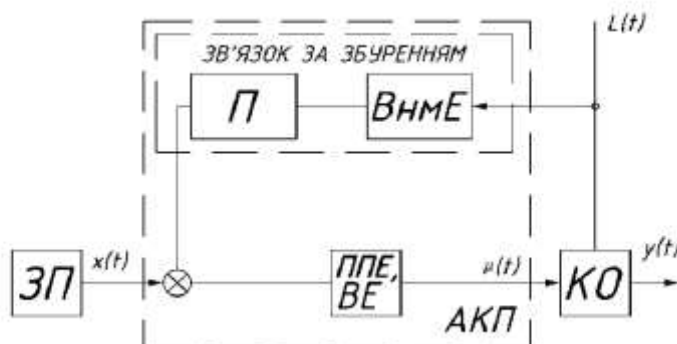


Рисунок 6.3 – Функціональна схема САК із принципом керування за збуренням

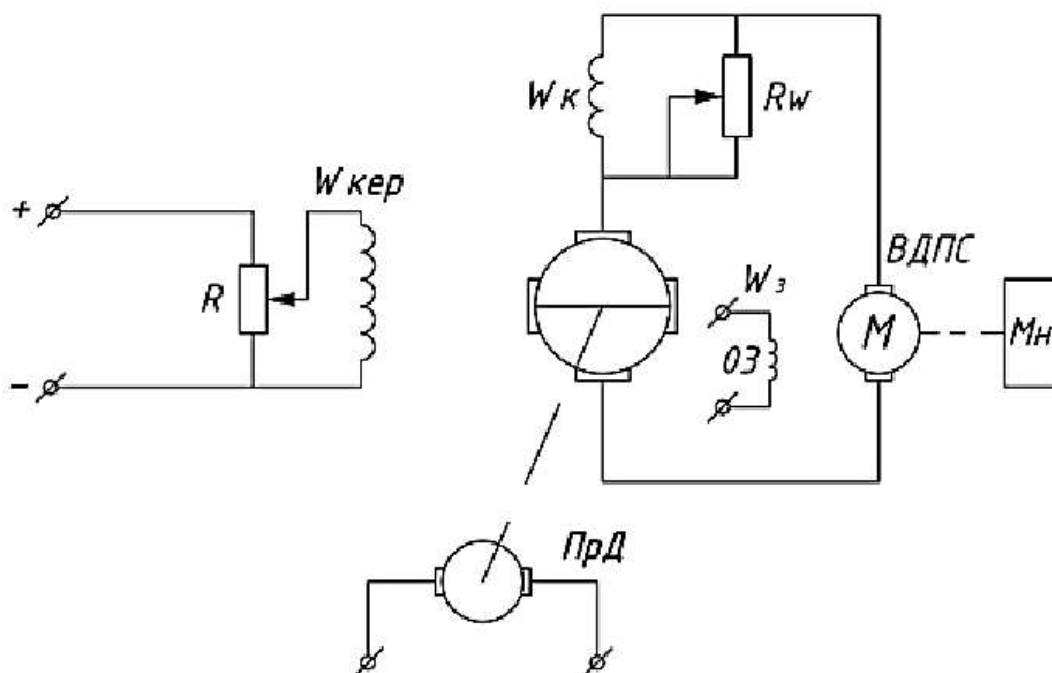


Рисунок 6.4 – Принципова схема САК із принципом керування за збуренням

Переміщенням повзуна R_w можна досягти: повної компенсації впливу M_n на оберти двигуна (1), недокомпенсації (2), перекомпенсації (3) порівняно із залежністю $n=f(M_n)$ без компенсації, тобто без зв'язку із збуренням (4) (рис. 6.5).

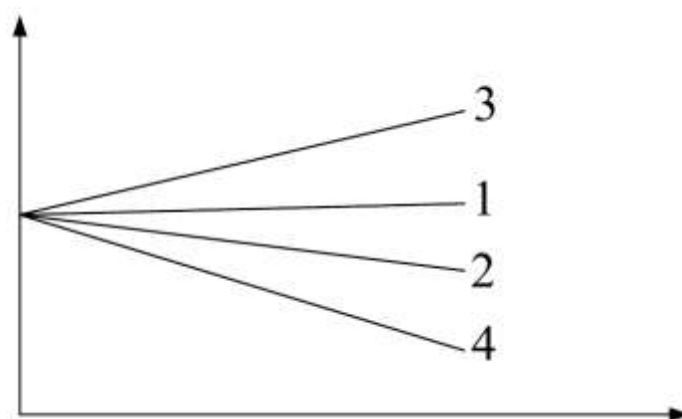


Рисунок 6.5 – Статичні характеристики системи при різних ступенях компенсації

САК із принципом керування за збуренням має такі переваги:

- можливість повної компенсації збурювальних дій, за якими організований компенсаційний зв'язок;
- збільшення швидкодії системи керування за збуренням, оскільки система реагує на зміну збурення до того, як ці зміни перетворяться елементами системи в зміни регульованої величини;
- у таких системах не виникає проблеми стійкості, оскільки вони розімкнені.

Недоліки САК із принципом керування за збуренням:

- неможливість компенсації збурювальних дій, за якими компенсаційні зв'язки відсутні;
- у цих системах, як у розімкнених, виникають відхилення керованої величини при зміні параметрів КО і самої системи (так званих параметричних збуреннях);
- складність вимірювання збурень, для подолання якої часто використовують фізичні величини, пов'язані зі збуренням певним відомим законом;
- застосування принципу керування за збуренням обмежене об'єктами, характеристики яких відомі.

6.4. Принцип керування за відхиленням

У процесі керування відхилення керованої величини $y(t)$ від потрібного значення $x(t)$ може бути викликане як впливом різноманітних збурень $f(t)$, так і зміною задавального значення $x(t)$.

Принципи керування за відхиленням полягають у тому, що вимірюється керована величина $y(t)$, порівнюється із заданою $x(t)$ (потрібним значенням), і знайдене при цьому відхилення $Q(t)=x(t)-y(t)$ перетворюється в АКП в керувальну дію $\mu(t)=f[Q(t)]$, яка, впливаючи на КО, намагається зменшити або скомпенсувати це відхилення.

У цій системі функцію вимірювання $y(t)$ та її подачі на вхід елемента порівняння ЕП виконує головний негативний зворотний зв'язок із вимірювальним елементом ВЕ у своєму складі.

Переваги САК із принципом керування за відхиленням:

- вони зменшують відхилення керованої величини $y(t)$ від потрібного значення $x(t)$ незалежно від того, якими факторами (зовнішніми збуреннями, зміною параметрів елементів системи, зміною задавальної дії) воно викликане;
- вони менш чутливі до зміни параметрів елементів, ніж системи розімкнені.

Недоліки САК із принципом керування за відхиленням:

- у них неможлива повна компенсація похибки, оскільки вони реагують на відхилення, яке вже наявне;
- керування об'єктом можливе лише при наявному відхиленні, і тому воно не може здійснюватись без затримання (запізнення) стосовно збурювальної дії, що викликала відхилення;
- у них виникає проблема стійкості, властива будь-яким замкненим системам.

Незважаючи на ці недоліки, саме системи з принципом керування за відхиленням найширше використовуються в техніці.

6.5. Класифікація систем автоматичного керування за алгоритмом функціонування

Різноманітність систем автоматичного керування приводить до того, що виникає необхідність їх об'єднати певною системою класів, класифікувати за

Програмну систему можна розглядати як стабілізуючу систему, у котрій задача стабілізації ускладнюється задачею зміни керованої величини за заданою програмою. Програмним задаючим пристроєм таких систем переважно є комп'ютер.

Слідкуючі системи

Алгоритм функціонування таких систем: зміна керованої величини $y(t)$ з необхідною точністю відповідно до заздалегідь невідомої функції часу, яка визначається задаючою дією: $x(t)=F(t)$, де $F(t)$ – заздалегідь невідома функція часу. Таким чином, слідкуюча система, як і програмна, відтворює задаючу дію. Однак ця дія в слідкуючій системі змінюється не за заздалегідь заданою програмою а довільно. Наприклад, пакет напрямних ПТКР повертається, стежачи за ціллю, траєкторія руху якої заздалегідь невідома, тобто «слідкує» за ним. Звідси походить назва таких систем.

Задаючі дії $x(t)$ і керовані величини $y(t)$ слідкуючих систем можуть бути різноманітними за своєю фізичною природою, причому керована величина за фізичною природою може взагалі відрізнятися від задаючої дії. Наприклад, задаючою дією може бути змінювана напруга, керованою ж величиною – напруга, кутове або лінійне переміщення, частота обертання, частота напруги тощо.

Перетворювальні системи

Алгоритм їх функціонування – перетворення з необхідною точністю задаючої дії $x(t)$ в керовану величину $y(t)$ відповідно до деякої функції перетворення H : $y(t)=H(x(t))$. Перетворювальна система має якомога точніше відтворювати на своєму виході не саму задаючу дію, як слідуючі системи, а деяку величину, зв'язану з функцією перетворення H . До перетворювальних систем належать інтегруючі, диференціюючі, екстраполюючі та інші САК.

6.6. Класифікація систем автоматичного керування за властивостями в усталеному режимі

За властивостями в усталеному режимі САК поділяються на **статичні** і **астатичні**.

Статична система – це система, в котрій при збурюючій (задаючій) дії, що прямує до постійної величини, відхилення керованої величини (похибка) також прямує до постійної величини, що залежить від цієї дії (рис. 6.6). Наведені вище приклади стабілізуючих систем з принципом керування за збуренням (у разі недокомпенсації або перекомпенсації), або системи є системами статичними, бо при $x(t)=const$ в усталеному режимі похибка у них буде також сталою і ненульовою.

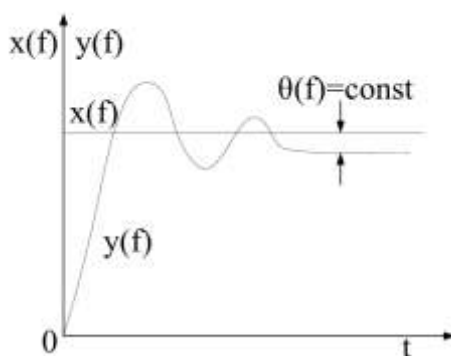


Рисунок 6.6 – Перехідний процес статичної системи

Астатична система – це система, у якої відхилення керованої величини в усталеному режимі при будь-якому постійному значенні збурюючої або задаючої дії дорівнює нулю (рис. 6.7).

Прикладами таких систем можуть бути слідкуючі системи. Вони відпрацьовують постійний стрибок задаючої дії з нульовою усталеною похибкою.

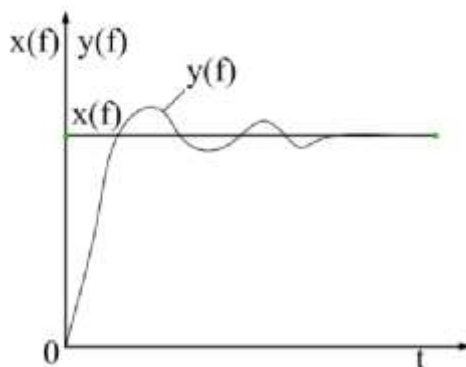


Рисунок 6.7 – Перехідний процес астатичної системи

Контрольні питання

1. Що вивчає автоматика як технічна наука?
2. Що розуміють під керуванням технічним процесом?
3. Які основні операції виконуються у процесі керування?
4. Дайте визначення понять «автоматичне керування», «автоматичне регулювання» та «автоматичний контроль».
5. Що таке об'єкт керування та автоматичний керуючий пристрій?
6. З яких основних елементів складається система автоматичного керування?
7. У чому полягає принцип розімкненого керування за збуренням?
8. Які переваги та недоліки має система автоматичного керування за збуренням?
9. У чому полягає принцип керування за відхиленням?
10. Як класифікують системи автоматичного керування за алгоритмом функціонування та за властивостями в усталеному режимі?

ТЕМА 7. ЕЛЕМЕНТИ СИСТЕМ АВТОМАТИЧНОГО КЕРУВАННЯ

Перелік питань

- 7.1. Загальна характеристика первинних перетворювачів і датчиків
- 7.2. Первинні перетворювачі механічних величин. Датчики переміщення
- 7.3. Датчики температури, тиску, рівня, витрат, лінійних та кутових переміщень, швидкості, зусиль, моментів, деформації, вологості, густини, освітленості, хімічного складу речовин тощо та їх характеристики

7.1. Загальна характеристика первинних перетворювачів і датчиків

Найважливішу роль у будь-якій САУ відіграють сприймаючі елементи, які слугують для виміру дійсного значення контрольованого або регульованого параметру і перетворення його на більш зручний сигнал для подальшого руху інформації. Тому сприймаючі елементи називають первинними перетворювачами або датчиками.

Датчик – пристрій, який призначений для перетворення інформації, що поступає на його вхід у вигляді деякої фізичної величини, в іншу функціональну величину, для подальшого використання в елементах автоматичних систем.

Датчик включає в себе чутливий елемент і перетворювач неелектричних величин в електричні сигнали (ПНВЕС) (рис. 7.1). Часто між чутливим елементом і перетворювачем включається підсилювач, необхідний для підвищення чутливості датчика.



Рисунок 7.1 – Будова найпростішого датчика

Датчики можуть перетворювати неелектричну величину x в електричну або електричну в електричну, або неелектричну в неелектричну. Найчастіше перетворення відбувається в електричну. Переважне використання електричних величин обумовлене:

- зручністю перетворення електричних сигналів;
- високою точністю і чутливістю перетворювачів фізичних величин в електричні сигнали;
- малою інерційністю елементів електричного перетворювача;
- надійністю роботи схем;
- безперервністю вимірювання в часі;
- зручністю запису і накопичення інформації;
- широкими межами вимірювань і ін.

Чутливий елемент сприймає властивість вимірювальної величини і перетворює її на іншу фізичну величину. Потім перетворюючий елемент перетворює фізичну величину на електричний сигнал, значення якого відповідає рівню вимірюваної властивості об'єкта. Іншими можливими

складовими вимірювального перетворювача є схеми формування сигналу і джерела живлення.

Чутливий елемент перетворює вимірювальну фізичну величину на таку фізичну величину, яка може бути сприйнята і виміряна перетворюючим елементом. З цього погляду і сам чутливий елемент можна вважати перетворювачем.

У найпростішому випадку датчик здійснює тільки одне перетворення $Y=f(x)$. Такий вид датчиків називають датчиками з безпосереднім перетворенням. Однак у ряді випадків не вдається безпосередньо перетворити вхідну величину X у вихідну Y . В цьому випадку здійснюють послідовне перетворення: вхідною величиною X впливають на проміжну Z , а потім проміжною впливають на вихідну Y , тобто $Z=f_1(x)$, а потім $Y=f_2(z)=f_2[f_1(x)]=F(x)$.

Датчики, що мають такі залежності, називаються датчиками з послідовним перетворенням. Число таких перетворень може бути і більше двох.

Розрізняють три класи датчиків:

- **аналогові** датчики, тобто датчики, які виробляють аналоговий сигнал;
- **цифрові** датчики, що генерують на виході двійковий код вимірюваної величини;
- **сигнальні** (бінарні, двійкові) датчики, які виробляють сигнал тільки двох рівнів: (0/1).

Статичні характеристики та параметри

В автоматичі властивості окремих елементів САУ оцінюються різними показниками, які пов'язані з вхідними та вихідними величинами. Найважливішу роль тут відіграє функціональна залежність вихідної величини від вхідної, яка відображена математично або графічно. Така залежність називається статичною характеристикою елемента $Y=f(x)$.

Статичну характеристику датчика прийнято називати градуовальною характеристикою. Вона може бути лінійною і нелінійною. Для зручності обробки інформації бажано мати лінійну характеристику. Лінеаризація проводиться зазвичай шляхом введення спеціальної корекції в різні ланки датчика.

За допомогою статичної характеристики можна з'ясувати, лінійний це елемент чи нелінійний, можна визначити вид сприймаючого елемента (датчик чи реле). Наприклад, якщо статична характеристика неперервна, то такий елемент виявляється датчиком, а якщо статична характеристика змінюється стрибком – це реле.

Якщо перетворювач є нелінійним (рис. 7.2, б), то можна застосувати лінеаризовану схему формування сигналу, проте такі схеми є дуже дорогими. З іншого боку, використання лише частини загальної характеристики нелінійного перетворювача забезпечує лінійність відношення виміряної та вихідної величин.

Важливими статичними параметрами є: чутливість, роздільна здатність, лінійність, дрейф, робочий діапазон, повторюваність і відтворюваність результату.

За статичною характеристикою можна визначити величину коефіцієнта передачі елемента, який визначається як відношення вихідної величини до вхідної $K=Y/X$.

Якщо статична характеристика лінійна, то коефіцієнт передачі є величиною постійною, а для елементів з нелінійною статичною характеристикою – це величина змінна, яка залежить від x , тобто $K=f(x)$.

Якщо вхідна і вихідна величини мають однакову розмірність, то коефіцієнт передачі розмірності не має і його називають коефіцієнтом підсилення.

Чутливість датчика визначається як відношення величини зміни вихідного сигналу до зміни вхідної величини.

Чим більший K датчика, тим більша вихідна величина при однаковому значенні вхідної величини.

Чутливість датчика в точці A статичної характеристики визначається так:

$$K_A = \lim_{\Delta X \rightarrow 0} \frac{\Delta Y_A}{\Delta X_A}.$$

Для практичного визначення чутливості датчика у певній точці статичної характеристики, поданої графічно, слід провести дотичну в цій точці, задатись приростом аргументу (ΔX_A), визначити величину приросту ординати дотичної (ΔY_A) і знайти відношення $K_A = \Delta Y_A / \Delta X_A$.

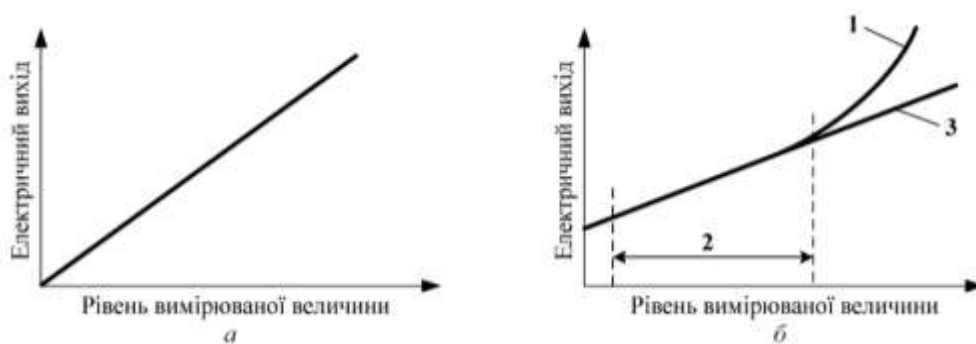


Рисунок 7.2 – Лінійні і нелінійні характеристики перетворювачів:

а – лінійний перетворювач; б – нелінійний перетворювач

(1– реальна характеристика нелінійного перетворювача;

2 – лінійна область вихідного сигналу; 3 – лінійна характеристика, яка апроксимує дійсну реакцію перетворювача за рахунок використання обмеженої частини діапазону)

Коефіцієнт передачі датчиків називають також чутливістю.

Статичне підсилення чи **підсилення за постійним струмом** – це коефіцієнт підсилення датчика на дуже низьких частотах.

Роздільна здатність – це найменша зміна вимірюваної величини, котра може бути зафіксована і точно показана датчиком.

Лінійність не описується аналітично, а визначається виходячи з градуовальної кривої датчика. Наближення цієї кривої до прямої лінії і визначає ступінь лінійності.

Для визначення ступеня нелінійності статичної характеристики у заданому діапазоні з'єднують точки на кінцях діапазону прямою лінією. Визначають абсцису максимального відхилення реальної характеристики від ідеальної (лінійної). Знаходять різницю між ординатами реальної та ідеальної (лінійної) характеристик в обраній точці ($Y_P - Y_i$) і визначають ступінь нелінійності статичної характеристики у відсотках:

$$\xi = \frac{Y_P - Y_i}{Y_P} \cdot 100\%$$

Дрейф визначається як відхилення показників датчика, коли вимірювана величина залишається постійною протягом довготривалого моменту часу. Величина дрейфу може визначатися при нульовому, максимальному чи деякому проміжному значенні вхідного сигналу.

Діапазон виміру означає, що вимірювана величина повинна знаходитися в межах цього діапазону.

Поріг чутливості – це найменше значення вхідного сигналу, яке може викликати помітну зміну вихідного сигналу. Інтервал, у якому вхідна величина менша порога чутливості, називається **зоною нечутливості** (виникає через вплив сил тертя, люфтів і інших причин).

Точність визначає різницю між вимірюваною і дійсною величиною; вона може стосуватися датчика в цілому або конкретного його показника.

Точність датчиків оцінюють за величиною похибок. Похибки вимірювань з'являються через неточне тарування або градування, зміни внутрішніх властивостей (старіння, знос), вплив зовнішніх факторів (температура, напруга). Похибки поділяють на абсолютні, відносні та зведені.

Абсолютна похибка – це різниця між одержаним Y_0 та дійсним Y значеннями вимірюваної величини, тобто

$$\Delta = Y_0 - Y.$$

Абсолютна похибка має розмірність вимірюваної величини.

Відносна похибка – це відношення абсолютної похибки до дійсного значення вимірюваної величини, тобто:

$$\delta_0 = \Delta / Y \text{ або } \delta_0 = (\Delta / Y) \cdot 100 \%$$

Відносна похибка має розмірність відносних одиниць або відсотків. Відносна похибка дає більш повне уявлення про нестабільність статичної характеристики.

Зведена похибка – це відношення абсолютної похибки до величини діапазону вимірювань, тобто:

$$\delta = \Delta / (Y_{\max} - Y_{\min}) \text{ або } \delta = [\Delta / (Y_{\max} - Y_{\min})] \cdot 100\%$$

Зведена похибка має розмірність відносної.

Динамічні характеристики датчиків

У динамічному режимі $y(t)$ і $x(t)$ безупинно змінюються, і зв'язок між ними визначається диференціальним рівнянням, отриманим на основі фізичного принципу і схеми датчика:

$$f_1(y^{(n)}, y^{(n-1)}, \dots, y', y) = f_2(x^{(m)}, x^{(m-1)}, \dots, x', x)$$

Ця залежність графічно представляє собою динамічну характеристику датчика.

У статичному режимі вимірювання всі похідні обертаються на нуль і диференціальне рівняння переходить в алгебраїчне рівняння, що визначає статичну характеристику датчика

$$f_1(y) = f_2(x) \text{ або } y = f(x).$$

Динамічні властивості датчика характеризуються рядом параметрів, які, однак, доволі рідко наводяться в технічних описах. З метою уніфікації методів динамічних випробувань і зіставлення характеристик різних датчиків прийнято реальний зовнішній вплив замінювати типовими входними діями, основними з яких є сходящова, імпульсна і гармонійна. Реакцію на типові впливи зазвичай визначають методом перетворення Лапласа при відомій передавальній функції датчика.

Динамічну характеристику датчика можна експериментально отримати з реакції на стрибок вимірюваної входної величини. Параметри, що описують реакцію датчика, дають уяву про його швидкодію (наприклад час наростання, запізнювання, час досягнення першого максимуму), інерційних властивостей (відносне перерегулювання, час встановлення) і точності (зміщення).

Час проходження зони нечутливості – час між початком вимірювання фізичної величини і моментом реакції датчика, тобто моментом початку зміни вихідного сигналу.

Запізнення – час, через який покази датчика перший раз досягають 50% значення, що встановилося. В літературі зустрічаються і інші визначення запізнення.

Час наростання – час, через який вихідний сигнал збільшується від 10 до 90 % значення, що встановилося.

Час досягнення першого максимуму – час досягнення першого максимуму вихідного сигналу (перерегулювання).

Ці показники потрібно мінімізувати.

7.2. Первинні перетворювачі механічних величин. Датчики переміщення

7.2.1. Індуктивні чутливі елементи

Принцип дії індуктивних чутливих елементів датчиків заснований на зміні струму в обмотці індуктивної котушки або трансформатора залежно від магнітного опору сердечника.

Індукційні (трансформаторні) датчики призначені для перетворення лінійних або кутових переміщень в електричний сигнал змінного струму.

В залежності від способу зміни взаємної індуктивності ІД діляться на дві великі групи:

- датчики з якорем, що повертається (переміщується);
- датчики з обмоткою, що повертається (переміщується).

Індуктивні датчики служать для безконтактного отримання інформації про переміщення робочих органів машин, механізмів роботів і т.д. і перетворення цієї інформації в електричний сигнал. Принцип дії індуктивного датчика заснований на зміні індуктивності обмотки на осерді в залежності від положення окремих елементів магнітопроводу. Найпростіший індуктивний датчик показаний на рис. 7.3. Принцип дії датчика аналогічний трансформатору, але коефіцієнт взаємної індуктивності вторинної та первинної обмоток змінюється в залежності від стану рухомої та нерухомої частини датчика (від величини повітряного зазору).

Такий датчик являє собою котушку індуктивності 1 із залізним сердечником 2 і якорем 3, відокремленим від сердечника повітряним зазором. Котушка індуктивності з сердечником, звана статором датчика, нерухома. Якір ж механічно з'єднаний з рухомою частиною об'єкта, переміщення якого потрібно перетворювати в електричний сигнал. Переміщення якоря змінює опір магнітного кола через зміни повітряного зазору δ між статором і якорем при вертикальному русі якоря або площі повітряного зазору при горизонтальному русі.

На обмотку подається змінна напруга. Значення струму, що протікає через обмотку, визначається як

$$I = \frac{U}{\sqrt{(R + r)^2 + (\omega L)^2}},$$

де R - зовнішній опір навантаження (на малюнку не показано);

r - активний опір обмотки;

L - індуктивність датчика.

Оскільки активний опір - величина постійна, то зміна струму може відбуватися за рахунок зміни індуктивної складової, яка залежить від величини зазору δ або перерізу магнітопроводу $S_{\text{ст}}$. Кожному значенню зазору δ відповідає своє значення струму, що створює падіння напруги на R_n

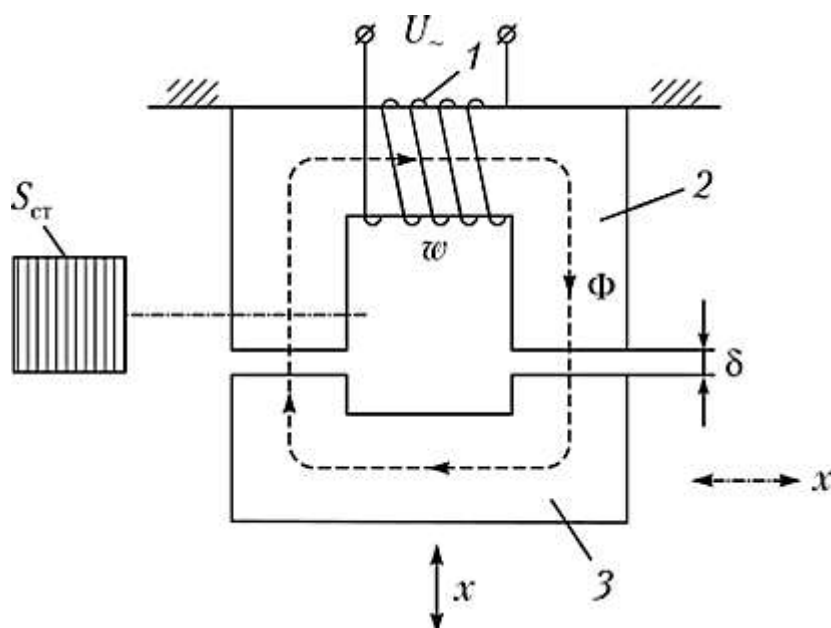


Рисунок 7.3 – Принцип дії індуктивного датчика переміщення

На обмотку котушки подається змінна синусоїдальна напруга U_1 с частотою f . У сердечнику з магнітним опором R_m циркулює магнітний потік Φ .

При постійному зазорі δ у ланцюзі обмотки протікає струм, величина якого залежить від зазору:

$$I = \delta \cdot \Phi \frac{2\pi f}{\mu_0 S} = k \cdot \delta \cdot \Phi$$

де: $k=2\pi f / \mu_0$ - постійна датчика;

μ_0 - магнітна постійна;

S - площа перетину сердечника.

Вихідний сигнал дорівнює

$$U_2 = ZI = k_1 \cdot \delta \cdot \Phi .$$

Оскільки магнітний потік також залежить від зазору δ , то залежність струму від зазору є нелінійною, особливо на початку й наприкінці залежності $I=f(\delta)$.

Залежність, показана на рис. 7.4, має лінійний характер у великому діапазоні зміни δ .

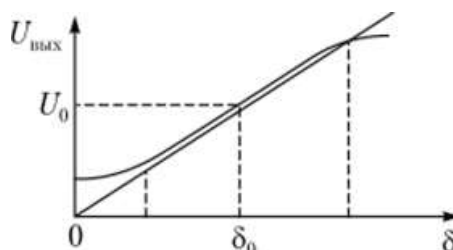


Рисунок 7.4 – Залежність зміни напруги на навантаженні від величини зазору

Відхилення від лінійності на початку характеристики пояснюється прийнятими припущеннями.

Індуктивний датчик відноситься до класу параметричних. В цілому розглянутий індуктивний датчик має такі недоліки:

- фаза струму не змінюється при зміні напрямку переміщення і, щоб обійти цей факт, потрібно встановлювати початковий зазор, а отже, - початковий струм;

- струм через навантаження залежить від амплітуди і частоти напруги живлення.

Для підвищення чутливості застосовують диференціальне включення двох обмоток у міст (диференційний індуктивний датчик, що складається з двох незалежних датчиків).

При використанні індуктивного датчика потрібно звертати увагу на похибку перетворення вимірюваного параметра. Сумарна похибка визначається сумою складових. При цьому слід виділити наступні **похибки** датчика:

- 1) від впливу зовнішніх електромагнітних полів;
- 2) від нелінійності характеристик;
- 3) конструктивну;
- 4) технологічну і температурну;
- 5) від старіння датчика.

Визначальною є похибка від нелінійності характеристик.

Переваги індуктивних датчиків:

- простота і міцність конструкції,
- відсутність ковзних контактів;
- можливість підключення до джерел промислової частоти;
- висока чутливість;
- відносно велика вихідна потужність.

Недоліки:

- точність залежить від стабільності частоти напруги живлення;
- залежність індуктивного опору від частоти напруги живлення;
- значний зворотний вплив датчика на вимірювану величину (за рахунок тяжіння датчика до сердечника).

- зазнають вплив зовнішніх магнітних полів;
- нелінійний характер залежності $U_{\text{вих}} = f(\delta)$, особливо при малих і великих δ (у реальних ІД величина δ обмежена межами лінійної ділянки характеристики і вимірюється десятками і сотнями мікрон).

Тому на практиці більш застосовуються ІД з поворотним якорем.

Широко використовується трансформаторна схема включення, коли одна з обмоток живиться зовнішньою напругою, а в другій наводиться напруга залежно від магнітного опору, тобто зазору між сердечниками. Індуктивні датчики широко застосовуються для виміру малих переміщень і вібрацій 0,1-0,5 мкм.

7.2.2. Ємнісні чутливі елементи

Ємнісні датчики (рис.7.5) являють собою конденсатори із зазором d між обкладками, що змінюється, площею перекриття пластин F або діелектричною проникністю ϵ . Зміна вхідної величини викликає зміну ємності конденсатора:

$$C = \frac{\varepsilon \varepsilon_0 S}{d - \Delta d},$$

де S - площа обкладок вимірювальних ємностей;

d - початковий зазор;

Δd - зміна зазору;

ε - діелектрична проникність середовища між обкладок;

ε_0 - абсолютна діелектрична проникність вакууму.

Ємнісні перетворювачі зі змінним зазором між пластинами (рис. 7.5 а) служать для виміру лінійних переміщень x з точністю до 0,1...0,01 мкм; зі змінною площею (рис. 7.5 б) - для виміру лінійних і кутових переміщень; зі зміною діелектричної проникності середовища (рис. 7.5 в) - для виміру рівнів, вологості, температури, хімічного складу й ін.



Рисунок 7.5 – Ємнісні чутливі елементи

7.3. Датчики температури, тиску, рівня, витрат, лінійних та кутових переміщень, швидкості, зусиль, моментів, деформації, вологості, густини, освітленості, хімічного складу речовин тощо та їх характеристики

7.3.1. Тахогенератори та тахометричні мости

Тахогенератор постійного струму є малогабаритний генератор постійного струму з незалежним збудженням, напруга на виході якого лінійно залежить від швидкостей обертання його якоря.

Вхідною величиною ТГ є вимірювана швидкість обертання ротора $\omega_{\text{вх}}$, вихідна величина – напруга на затискачах $U_{\text{вих}}$.

Принцип дії ТГ заснований на використанні закону електромагнітної індукції. При обертанні якоря, який механічно зв'язаний з валом об'єкта, у обмотці якоря наводиться ЕРС (напруга).

Вихідна напруга ТГ:

$$U_{\text{вих}} \approx C_e \Phi \omega_{\text{вх}} = k \omega_{\text{вх}}$$

де C_e – конструктивний коефіцієнт ТГ;

Φ – постійний магнітний потік;

$\omega_{\text{вх}}$ – швидкість обертання ротора ТГ.

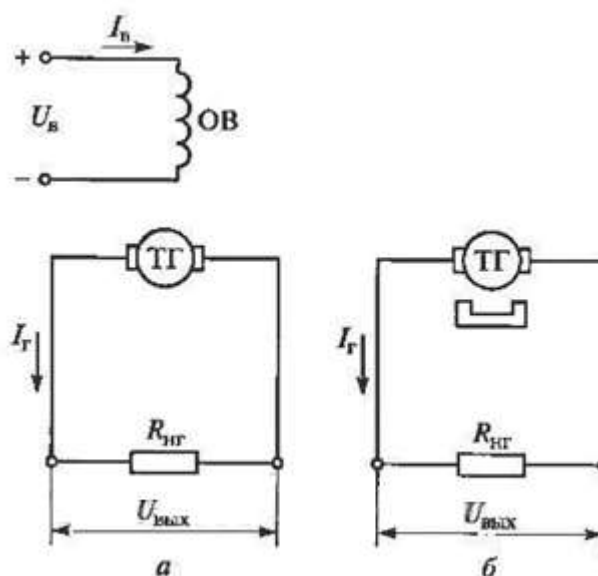


Рисунок 7.6 – Схема тахогенератора: а) – з електромагнітним збудженням;
б) – зі збудженням від постійних магнітів

Конструкція і принцип дії ТГ постійного струму не відрізняється від конструкції і принципу дії генератора постійного струму (ГПС).

Існують варіанти ТГ зі збудженням від постійного магніту.

Якщо входною величиною ТГ вважати не кутову швидкість, а кут повороту валу, то цей пристрій може бути описаний диференціюючою ланкою.

Для вимірювання кутової швидкості обертання ротору двигуна постійного струму (ДПС) використовують тахометричні мости.

Вихідна напруга тахометричного моста пропорційна кутовій швидкості обертання ротора ДПС. При цьому вважається, що напруга U є вихідною напругою ЕМП, оскільки ДПС управляється електромашинним підсилювачем.

Пропорційна залежність між $U_{\text{вих}}$ та ω порушується рядом факторів. Найбільш суттєвими з них є:

- вплив реакції якоря;
- зміна перехідного опору між щітками і колектором;
- нестійкість магнітного потоку збудження;
- зміна температури навколишнього середовища.

Вплив реакції якоря виявляється у тому, що при збільшенні швидкості його обертання збільшується струм у колі навантаження, а відповідно, і в якорі, внаслідок чого відбувається зменшення потоку збудження і, як наслідок, напруги на виході.

Перехідний опір між щітками і колектором залежить від величини струму, що проходить скрізь них. Він більш за все змінюється при малих значеннях струму. Для зменшення шкідливого впливу цього фактора на роботу ТГ його щітки роблять з мідно-графітної композиції, опір якої мало залежить від величини струму, що проходить через неї.

Нестійкість магнітного потоку збудження приводить до відповідної зміни коефіцієнта передачі ТГ, що у ряді випадків буває недопустимо. Цьому його

обмотку збудження підключають до джерел живлення із сталою напругою на виході.

Зміна температури навколишнього середовища приводить до зміни опору обмотки збудження. Внаслідок того, що вона виготовлена з мідного дроту, опір якого міняється на 30-40% при збільшенні температури на 100°C , то навіть при незначній її зміні опір обмотки може суттєво змінюватися, внаслідок чого відбувається зміна коефіцієнта передачі ТГ.

При прийнятті належних заходів для зменшення шкідливого впливу вказаних факторів на роботу ТГ він забезпечує отримання практично лінійної залежності між $U_{\text{вих}}$ та ω в широкому діапазоні її зміни.

7.3.2. Датчики температури

Датчики температури використовуються в системах автоматики для вимірювання, контролю і регулювання температури. Як датчики температури використовують такі елементи, фізичні властивості яких залежні від температури та не дуже залежні від впливу інших факторів, наприклад вологості, хімічного складу середовища та деяких ін. До таких фізичних властивостей відносять явища теплового лінійного або об'ємного розширення, зміни опору, ємності або термоелектрорушійної сили спеціального елемента, що знаходиться у контакті із контролюємим середовищем. Багато датчиків температури використовують принцип зміни фізичних параметрів самого середовища під дією температури: тиску, щільності, в'язкості та інтенсивності радіаційних випромінювань.

До датчиків, працюючих на принципі теплового розширення рідин та газів відносять рідинні об'ємні та контактні термометри та манометричні термодатчики.

Для дистанційного контролю температури використовують термопари, термометри опору (термоопори) та напівпровідникові терморезистори.

Найбільше використання у засобах сучасної автоматизації отримали напівпровідникові терморезистори. Вони знайшли застосування для дистанційного вимірювання температури, сигналізації про зростання температури в установках та різноманітних агрегатах, як сприймаючі органи у різноманітних схемах автоматики та телемеханіки, а також в якості термокомпенсаторів.

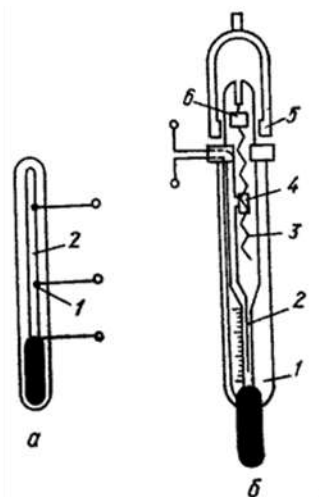


Рисунок 8.7 – Ртутно-контактні термометри (а – нерегульований, б – регульований)

Ртутно-контактні термометри – це ртутні термометри із впаяними у капіляр контактами. При зростанні температури стовпчик ртуті піднімається і при досягненні відмітки температури, на рівень якої впаяний контакт, замикає відповідний ланцюг схеми. Ртутно-контактні термометри бувають регульовані та нерегульовані. Нерегульовані термометри (ТК-1, ТК-3 та ін.) мають тільки нерухомі контакти. Регульовані ртутно-контактні термометри (ТК-5, ТК-6, ТК- 8) мають один з контактів рухомих. Діапазон роботи ртутно-контактних термометрів $0...300^{\circ}\text{C}$. Розривна потужність їх контактів 2 Вт при силі струму 0,2 А. На сьогодні використання ртутно-контактних термометрів значно скоротилося в зв'язку із певними їх недоліками а також можливостями застосування інших більш точних та технологічних датчиків температури.

Термометри опору (термоопори) при зміні температури змінюють свій електричний опір. Тому визначення температури термоопорами зводиться до виміру електричного опору термочуттєвого елемента. Термочутливий елемент термоопорів виконують з тонкого платинового або мідного дроту, який намотують на каркас з ізоляційного матеріалу (слюда, пластмаса).

Платинові термоопори призначені для виміру температур від -200 до $+650^{\circ}\text{C}$. Платиновий дріт має діаметр $0,05...0,07$ мм та довжину близько 2 м. Дріт намотують на слюдяний каркас біфілярно. До платинового дроту під'єднують срібні виводи, ізольовані фарфоровими бусинками. Чутливий елемент захищений від механічних пошкоджень за допомогою захисної арматури з головкою, у якій розміщується клемна колодка із підключеними до неї виводами від чутливого елемента. Платинові термоопори позначають літерами ТСП та виготовляють із різними градуваннями: гр.20, гр.21, гр.22 та ін. При температурі 0°C опір цих термоопорів відповідно 10, 46 та 100 Ом.

Мідні термоопори виготовляють з мідного ізольованого дроту діаметром 0,1 мм, намотаного на пластмасовий каркас. До кінців обмотки припаяні два мідних виводи діаметром $1...1,5$ мм. Чутливий елемент розташований у сталевій гільзі, захищеної від механічних пошкоджень ізоляційним матеріалом. Виводи обмотки прикріплюють до клем колодки, що вмонтована у

головку термоопору. Мідні термоопори позначають літерами ТСМ та виконують із градуваннями гр.23, гр.24 та ін. із опорами при 0 °С 53 та 100 Ом відповідно. Межі вимірюємих температур мідними термооперами становлять – 50...+ 180 ° С.

В якості вторинних приладів для виміру опору використовують логери та врівноважені мости.

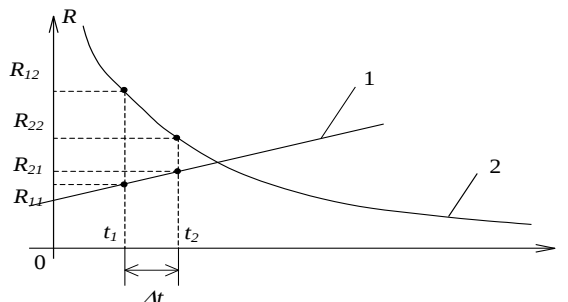


Рисунок 7.8 – Статичні характеристики термометрів опору

В термометрах з металевим чутливим елементом опір R від температури t змінюється лінійно (1, рис. 7.8), а в термометрах з напівпровідниковим чутливим елементом – нелінійно (2, рис. 8.8), з негативним температурним коефіцієнтом опору α . Графіки статичних характеристик дозволяють оцінити коефіцієнт α .

$$\alpha = \frac{\Delta R / R}{\Delta t} = \frac{\frac{R_2 - R_1}{\frac{R_2 + R_1}{2}}}{\Delta t}$$

Принцип дії **біметалевих** датчиків заснований на неоднаковості розширенні двох зварених між собою деталей, виготовлених з різних матеріалів, котрі мають різні значення коефіцієнту лінійного розширення. Біметалеві стрічки використовують у вигляді пластин або спіралей. Один кінець стрічки закріплюють, а другий при зміні температури розкручується або розгинається. У схемах сільськогосподарської автоматики отримали розповсюдження біметалеві датчики ДТКМ. Вітчизняна промисловість випускала більше 28 модифікацій ДТКМ на різні температурні діапазони та різноманітного конструктивного виконання. У половини модифікацій ДТКМ контакти замикаються при зростанні, а у решти – при зниженні температури контролюваного середовища. Датчики із регульованою уставкою виготовляють з такими шкалами : -30...0; -10...+10; 0...+30; +10...+30; +15...+25; +20...+50°С. Маркують їх таким чином: ДТКМ-30, ДТКМ-31, і т.д. по ДТКМ-57. Чутливий елемент датчика виготовлений у вигляді біметалевої спіралі. При зміні температури навколишнього середовища вільний кінець спіралі переміщується та замикає або розмикає контакти. Для вмикання датчика у схему на ньому є клемна колодка. Всі елементи датчика закріплюють на ізоляційній основі та закривають з'ємною кришкою. Розривна потужність контактів на змінному струмі напругою 220 В становить 50 В·А, а

на постійному струмі напруги 110 В – 50 Вт. Гарантований термін служби – 3 роки.

У **дилатометричного** датчика осердя з металу з малим коефіцієнтом температурного розширення розташоване всередині трубки з металу з великим коефіцієнтом теплового розширення та одним кінцем жорстко закріплено на ній. Для зменшення теплової інерції у стінах трубки зроблені отвори. При зміні температури зменшується довжина трубки та як наслідок відбувається переміщення осердя, з вільним кінцем якого з'єднана показуюча стрілка.

Через великі похибки у вимірюванні біметалеві та дилатометричні датчики температури на сьогодні обмежені у використанні (захист електродвигунів, котли для нагріву рідин, протипожежний захист та деякі ін.) та замінені на сучасні технологічні датчики.

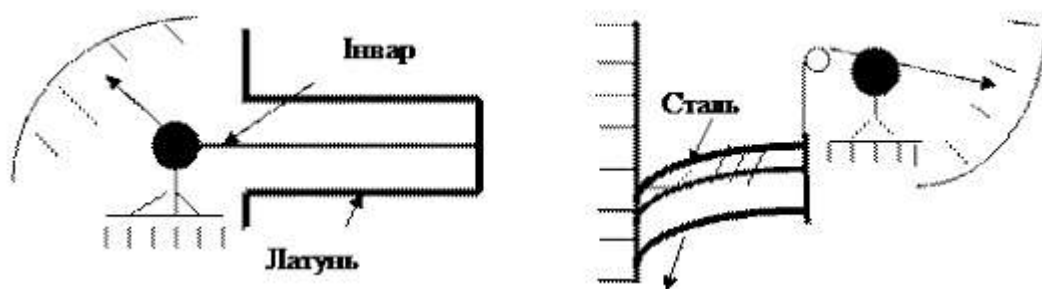


Рисунок 7.9 – Схема дилатометричного і біметалічного датчиків

Принцип дії **термоелектричних** датчиків (термопар) полягає у виникненні електрорушійної сили ЕРС при зміні температури одного зі спайів замкнутого ланцюга, складеного з різнорідних термоелектродів. **Термопара** являє собою спай двох різних сплавів (1, 2), виготовлених з неблагородних або благородних металів (рис. 7.10).

При нагріванні спаю у електричному колі виникає термо-ЕРС, величина якої пропорційна різниці температур нагрітого та вільного кінців електричного кола та залежить від матеріалу дротів. Розрізняють стандартні технічні та нестандартні термопари. У автоматичних системах використовують металеві та напівпровідникові термопари:

- високотемпературні (до 2500 ° С), наприклад, платинородій-платинові ТПП з межами – 20...+1300 ° С;
- середньотемпературні (до 1200 ° С), наприклад, хромель-алюмелеві ТХА з межами – 50...+1000 ° С (хромель-сплав з 90% нікелю та 10% хрому; алюмель - 95% нікелю та 5% алюмінію, кремнію та марганцю);
- низькотемпературні (до 800 ° С), наприклад, хромель-копелеві ТХК (копель-сплав з 55% міді та 45% нікелю).

Термопари дозволяють вимірювати та реєструвати температури з відносно високою точністю та передавати покази на відстань.

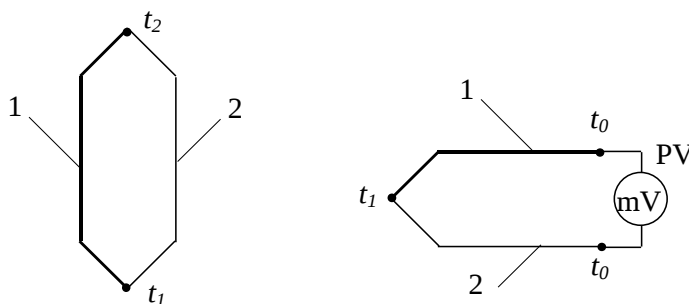


Рисунок 7.10 – Схема термопари та її включення

Абсолютне значення термо-ЕРС промислових термопар дуже мале (декілька мілівольт), тому для вимірів необхідно використовувати достатньо чутливі прилади. В тих випадках, коли треба мати більшу термо-ЕРС, використовують послідовне включення термопар.

Манометричні термодатчики перетворюють температуру у тиск, тиск – механічне переміщення, а далі у електричний сигнал. До датчиків температури манометричного типу відносять температурне реле РТ-1, яке застосовували в інкубаторах “Універсал-45” та “Універсал-50”. Реле РТ-1 має сильфон, всередину якого введено 3-5 куб.см ефіру. В результаті нагріву ефір розширюється, деформує сильфон, який діє на ртутно-магнітний вимикач ВРМ-7. Реле РТ-1 можна регулювати, встановлюючи уставку температури, при якій спрацьовує реле. Контакти реле вмикають на напругу 24 В.

Напівпровідникові (НП) терморезистори (термістори) при зростанні температури зменшують свій опір. Чутливість НП терморезисторів набагато вища ніж чутливість термоопорів чи термопар. Так, наприклад, якщо термоопори при нагріванні від 0 до 100 °С збільшують свій опір приблизно на 40%, то напівпровідниковий терморезистор за такого ж самого нагріву зменшує свій опір у 20 та більше разів.

На відміну від звичайних НП терморезисторів позистори мають позитивний температурний коефіцієнт, тобто при зростанні температури контролюємого середовища опір позистора зростає.

Температурна залежність опору термістора від температури має вигляд:

$$R_T = A \cdot e^{\frac{B}{T}},$$

де A – постійний коефіцієнт, що залежить від фізичних властивостей, геометричної форми і розмірів термістора, Ом;

B – постійний коефіцієнт, залежний тільки від фізичних властивостей напівпровідника, К;

T – температура за Кельвіном.

При визначених опорах K_{T1} та K_{T2} для температур T_1 і T_2 коефіцієнт B можна розрахувати за формулою

$$B = \frac{T_2 \cdot T_1}{T_2 - T_1} \ln \left(\frac{R_{T1}}{R_{T2}} \right)$$

Знаючи коефіцієнт B та опір R_{T1} термістора при температурі T_1 , можна визначити опір при будь-якій температурі:

$$R_{Ti} = R_{Ti} \cdot e^{B\left(\frac{1}{T_i} - \frac{1}{T_1}\right)}$$

Температурний коефіцієнт опору

$$\alpha = -\frac{B}{T_1^2},$$

де T_1 – менша з двох температур, за якими визначено коефіцієнт B ,

Для напівпровідників він від'ємний, у десятки разів більший, ніж у металів, і зменшується із зростанням температури T . Температурний діапазон роботи терморезисторів, аналогічно іншим НП $-40...+100^\circ\text{C}$, тиск до 10^6 Н/м^2 , відносна вологість до 70%. Спеціальні герметизовані терморезистори призначені для використання в умовах агресивного навколишнього середовища. Строк їх служби за нормальних режимів роботи практично не обмежений. Максимально допустима потужність розсіювання становить для різних типів від 5 до 800 мВт. Значний опір терморезисторів дозволяє зменшити вплив опору провідних дротів, контактів та контактних ЕРС, що дозволяє вимірювати температуру на значних відстанях. Теплова інерційність терморезисторів невелика, що дозволяє використовувати їх у якості чутливих датчиків при регулюванні температури малоінерційних об'єктів.

Вольт-амперна характеристика НП терморезистора на початковій ділянці прямолінійна (струми малі та нагрів датчика невеликий). Далі відбувається самонагрів датчика, його опір зменшується, а струм швидко зростає. Робочою ділянкою вибирають лінійну частину вольт-амперної характеристики.

Контрольні питання

1. Яку роль виконують первинні перетворювачі та датчики у системах автоматичного керування?
2. Що таке датчик і для чого він призначений?
3. З яких основних елементів складається найпростіший датчик?
4. Які види перетворення сигналів можуть здійснювати датчики?
5. Чому в автоматичних системах найчастіше використовують перетворення фізичних величин в електричні сигнали?
6. Які існують основні класи датчиків за видом вихідного сигналу?
7. Що таке статична характеристика датчика і як її використовують для оцінювання його властивостей?
8. Які основні статичні параметри характеризують роботу датчика?
9. Що розуміють під чутливістю, роздільною здатністю та порогом чутливості датчика?
10. Які основні динамічні характеристики датчиків використовують для оцінювання їх швидкодії та інерційності?

СПИСОК РЕКОМЕНДОВАНОЇ ЛІТЕРАТУРИ

1. Сакун М. М., Чучуй В. П., Москалюк І. В. Електротехніка та електроніка: навчальний посібник для підготовки здобувачів вищої освіти ступеня «бакалавр». Одеса : ОДАУ, 2021. 291 с.
2. Сакун М. М. та ін. Електротехніка та електроніка : практикум. Одеса : ОДАУ, 2023.
3. Грудська В. П., Чибеліс В. І. Електротехнічні пристрої систем автоматичного управління : навчальний посібник. Київ : КПІ ім. Ігоря Сікорського, 2021. 107 с.
4. Хорольський В. П., Омельченко О. В. Електротехніка : методичні рекомендації з вивчення дисципліни, ступінь бакалавр. Кривий Ріг : ДонНУЕТ, 2022. 99 с.
5. Хорольський В. П. та ін. Автоматизація виробничих процесів : підручник. Кривий Ріг : ДонНУЕТ, 2022.
6. Хорольський В. П., Коренець Ю. М. Мехатроніка : мехатроніка та інтелектуальна автоматика : навчальний посібник. Кривий Ріг : ДонНУЕТ, 2023. 342 с. ISBN 978-966-385-387-1
7. Електротехніка та основи електроніки : курс лекцій. Харків : НФаУ, 2024. 110 с. ISBN 978-966-615-618-4.
8. Kuphaldt T. R. Lessons in Industrial Instrumentation. Control.com, open textbook.
9. AETA 2024 – Recent Advances in Electrical Engineering and Related Sciences: Theory and Application. Lecture Notes in Electrical Engineering. Springer, 2025.
10. Рясна, О. В., Савойський, О. Ю., Кравченко, В. О., Козін, В. М., Юрченко, О. Ю. (2025). Скалярний метод керування асинхронних електроприводів в системі водопостачання. Вісник Херсонського національного технічного університету, Т1., 1(92), 204-211. <https://doi.org/10.35546/kntu2078-4481.2025.1.1.26>.

Кравченко Володимир Олексійович
Вольвач Тетяна Сергіївна
Савойський Олександр Юрійович

МЕХАТРОНІКА ТА АТОМАТИЗАЦІЯ

КОНСПЕКТ ЛЕКЦІЙ

Суми, РВВ, Сумський національний аграрний університет,
вул.Г. Кондратьєва,160

Підписано до друку:	Формат А5:	Гарнітура Times New Roman
Тираж: ____ примірників	Замовлення _____	Ум. друк. арк. ____
