

*Міністерство освіти і науки України
Тернопільський національний технічний університет
імені Івана Пулюя*


література

навчально-методична

*кафедра
електричної інженерії*

Електротехніка КОНСПЕКТ ЛЕКЦІЙ

Ternopil 2023

«Електротехніка. Конспект лекцій.»

Укладач: Н.А. Куземко. Тернопіль: ТНТУ, 2023. – 52 с.

Укладач: к.т.н., доц. Куземко Н.А.

Рецензент: к.т.н., доц. Осухівська Г.М.

Комп'ютерний набір: Куземко Н.А.

Затверджено на засіданні кафедри електричної інженерії Тернопільського національного технічного університету імені Івана Пулюя.

Протокол № 10 від 25 травня 2023 року

Схвалено й рекомендовано до друку методичною радою факультету прикладних інформаційних технологій та електроінженерії Тернопільського національного технічного університету імені Івана Пулюя.

Протокол № 11 від 7 червня 2023 року

Посібник складено відповідно до робочих програм курсу “Електротехніка, електроніка та мікропроцесорна техніка” .

1. Кола постійного струму.

Джерела та споживачі.

Електричне коло – це сукупність пристроїв з'єднаних провідниками, через які протікає електричний струм. Пристрої призначені для виробництва, передачі, розподілу, перетворення та споживання електричної енергії.

Електричні кола поділяються на кола постійного змінного, несинусоїдного струмів, лінійні та нелінійні, однофазні та багатофазні, зокрема трифазні.

Найпростіше електричне коло складається з трьох основних елементів: електричного джерела (активний елемент), споживача (приймача, пасивний елемент) та провідників. Крім цього коло може містити додаткові елементи: вимірювальні пристрої, перемикачі, запобіжники та інші.

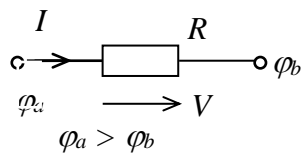


Рис.1.1

В споживачі електрична енергія перетворюється в інші види енергії (теплову, механічну). Мірою цього перетворення є опір R (резистивний елемент). Напрями електричних величин зображено на рис.1.1.

Закон Ома для цього елемента

$$V = RI \text{ або } I = GV,$$

де R - опір, $G = 1/R$ - провідність.

Потужність елемента $P = RI^2 = GV^2$.

В електричному джерелі різні теплова, механічна та інші види енергії перетворюються в електричну енергію. Мірою цього перетворення є електрорушійна сила (е.р.с.) E . Напрями електричних величин зображено на рис.1.2.

Ідеальне електричне джерело (без втрат) характеризують лише е.р.с. E .

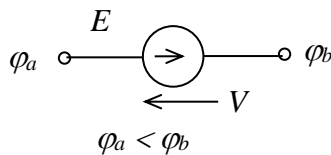


Рис.1.2

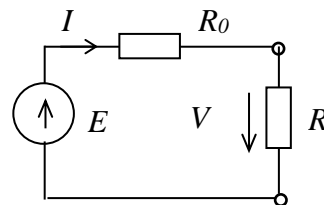


Рис.1.3

Потужність джерела $P = EI$.

Реальне електричне джерело з втратами (на нагрівання) характеризують е.р.с. E та внутрішнім опором R_0 , що враховує ці втрати.

Схема найпростішого електричного кола зображена на рис.1.3. Для цього кола:

$$I = E/(R_0 + R), \quad V = E - R_0I, \quad V = RI, \quad R_0I + RI = E.$$

Електричне джерело можна представити двома схемами заміщення (розрахунковими схемами): послідовною (рис.1.4) та паралельною (рис.1.6). Основною характеристикою джерела є його зовнішня вольт-амперна характеристика $V(I)$ (рис.1.5),

На рис.1.5 суцільною лінією зображена характеристика реального джерела, її описують рівнянням $V = E - R_0I$. Пунктирною лінією на рис.1.5 зображена характеристика ідеального джерела, її описують рівнянням $V = E$. Граничні точки характеристики реального джерела відповідають граничним

режимам холостого ходу (хх) (без навантаження), коли $I = 0$, то напруга на затискачах джерела $U = E = U_{хх}$, та короткого замикання (кз), коли клема джерела закорочені (з'єднані провідником без навантаження) $V = 0, I = I_{кз}$.

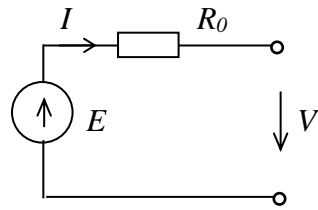


Fig.1.4

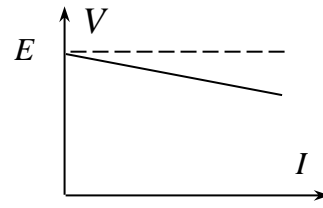


Fig.1.5

Паралельна схема заміщення (рис.1.6) містить ідеальне джерело струму J та внутрішню провідність G_0 , що характеризує втрати в джерелі. Зовнішня характеристика реального джерела струму $I(V)$ зображена на рис.1.7 суцільною лінією, її описують рівнянням $I = J - G_0 U$. Пунктирною лінією на рис.1.7 зображена характеристика ідеального джерела, її описують рівнянням $I = J$.

Послідовна та паралельна схеми заміщення є еквівалентними, можна перетворювати одну схему в іншу користуючись такими виразами:

$$E = G_0 J, R_0 = 1/G_0, J = E/R_0, G_0 = 1/R_0.$$

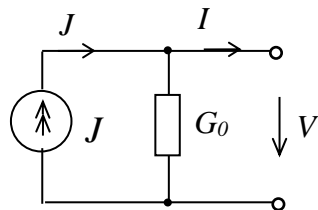


Fig.1.6

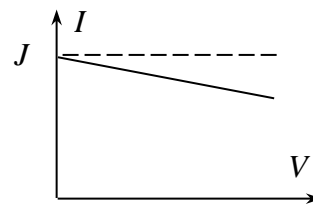


Fig.1.7

Важливою характеристикою джерела є його *коефіцієнт корисної дії*:

$$\eta = \frac{P_R}{P_E} = \frac{VI}{EI} = \frac{V}{E}, \quad V = \eta E,$$

де P_R - потужність споживача, P_E - потужність джерела.

Коефіцієнт корисної дії залежить від співвідношення опору споживача та внутрішнього опору джерела:

$$\eta = \frac{P_R}{P_R + \Delta P} = \frac{RI^2}{RI^2 + R_0 I^2} = \frac{R}{R_0 + R} = \frac{1}{1 + R_0/R},$$

де ΔP - втрати потужності.

Є три основні *режими роботи електричного кола*: номінальний, робочий та граничний.

Номінальний це є оптимальний (найкращий) режим роботи електричного кола, номінальні параметри можна знайти в паспортних даних пристрою ($I_{ном}, V_{ном}, P_{ном}$).

В робочому режимі допускається незначне відхилення від номінальних величин.

Граничний режим це холостий хід (неробочий режим) або коротке замикання (аварійний режим).

Для режиму холостого ходу опір навантаження $R = \infty$ (клеми джерела розімкнуті). Користуючись схемою на рис.1.3 можемо записати:

$$I = \frac{E}{R_0 + R} = \frac{E}{R_0 + \infty} = 0, \quad V = E - R_0 I = E, \quad \eta = 1.$$

Для режиму короткого замикання опір навантаження $R=0$ (клеми закорочені). Користуючись схемою на рис.1.3 можемо записати:

$$V = RI, V=0, I = E/R_0 = I_{SC}, \eta = 0.$$

З дослідів холостого ходу та короткого замикання можемо експериментально визначити параметри джерела (E, R_0):

$$U_{xx} = E, R_0 = E/I_{кз}.$$

Режими роботи електричного кола:

- режим генератора напруги, коли напруга на затискачах джерела практично не залежить від струму, тому $V \approx E$, цей режим близький до холостого ходу. При цьому $R_0 I \ll RI$ (рис.1.3), тому умова режиму генератора напруги $R_0 \ll R$ і коефіцієнт корисної дії високий $\eta \approx 1$. Цей режим є основним режимом роботи електричних джерел;

- режим генератора струму, коли струм джерела практично не залежить від напруги, тому $I \approx J$, цей режим близький до короткого замикання. При цьому $G_0 U \ll GU$ (рис.1.6), тому умова режиму генератора струму $G_0 \ll G$ ($R_0 \gg R$).

- узгоджений режим, коли максимальна потужність $P = RI^2$ передається від джерела до споживача. Умова узгодженого режиму $R_0 = R$, коефіцієнт корисної дії невисокий $\eta = 0.5$, тому застосовують його переважно в електроніці.

З'єднання елементів.

Є два основних типи з'єднань в електричних колах: прості і складні. Основна відмінність простих з'єднань від складних полягає в тому, що у випадку простого з'єднання ми знаємо реальні напрями напруг та струмів у колі ще до початку його розрахунку. У колі зі складним з'єднанням реальні напрями напруг та струмів до розрахунку невідомі, тому ми вибираємо їх довільно.

Прості з'єднання елементів - це послідовне, паралельне та змішане.

При *послідовному* з'єднанні елементів (рис.1.8), через усі елементи кола

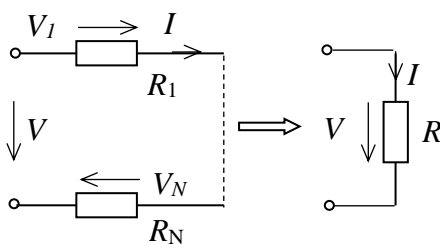


Рис.1.8

протікає однаковий струм I . Загальний (еквівалентний) опір кола з послідовним з'єднанням елементів дорівнює сумі всіх опорів $R = \Sigma R_n$.

Вхідна напруга кола з послідовним з'єднанням елементів (рис.1.8)

$$V = V_1 + \dots + V_N = \Sigma V_N = \Sigma R_N I.$$

Потужність кола:

$$P = VI = \Sigma R_N I^2 = \Sigma P_N,$$

де $P = VI$ – потужність джерела, ΣP_N – сума потужностей споживачів.

При *паралельному* з'єднанні елементів (рис.1.9), однакова напруга V прикладена до них. Загальна (еквівалентна) провідність паралельного з'єднання дорівнює сумі потужностей елементів: $G = \Sigma G_n$.

Загальний струм кола (рис.1.9):

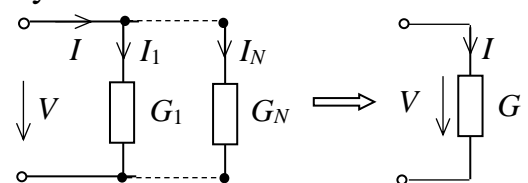


Рис.1.9

$$I = I_1 + \dots + I_N = \Sigma I_N = \Sigma G_N V.$$

Потужність кола:

$$P = VI = \Sigma G_N VV = \Sigma G_N V^2 = \Sigma P_N.$$

Для паралельного з'єднання двох елементів:

$$G = G_1 + G_2 = \frac{1}{R_1} + \frac{1}{R_2} = \frac{R_2 + R_1}{R_1 R_2}, \quad R = \frac{1}{G} = \frac{R_1 R_2}{R_1 + R_2}.$$

Коло з послідовним з'єднанням двох елементів (рис.1.10) можна розглядати як *подільник напруги*.

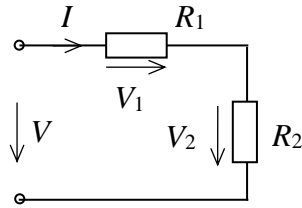


Рис.1.10

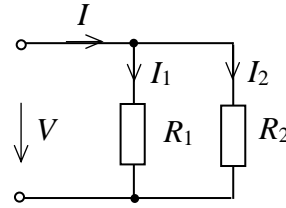


Рис.1.11

$$I = \frac{V}{R_1 + R_2}, \quad V_1 = R_1 I = V \frac{R_1}{R_1 + R_2}, \quad V_2 = R_2 I = V \frac{R_2}{R_1 + R_2}.$$

Коло з паралельним з'єднанням двох елементів (рис.1.11) можна розглядати як *подільник струму*.

$$V = I \frac{R_1 R_2}{R_1 + R_2}, \quad I_1 = V/R_1 = I \frac{R_2}{R_1 + R_2}, \quad I_2 = V/R_2 = I \frac{R_1}{R_1 + R_2}.$$

На рис.1.12 зображено *змішане* (послідовно-паралельне) з'єднання, його можна замінити одним еквівалентним (загальним) опором R :

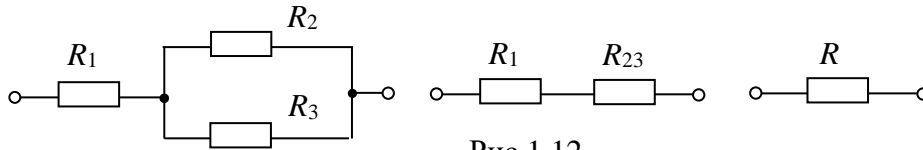


Рис.1.12

$$R_{23} = R_2 R_3 / (R_2 + R_3), \quad R = R_1 + R_{23}.$$

На рис.1.13 зображено *змішане* (паралельно-послідовне) з'єднання, його можна замінити одним еквівалентним (загальним) опором R :

$$R_{23} = R_2 + R_3, \quad R = R_1 R_{23} / (R_1 + R_{23})$$

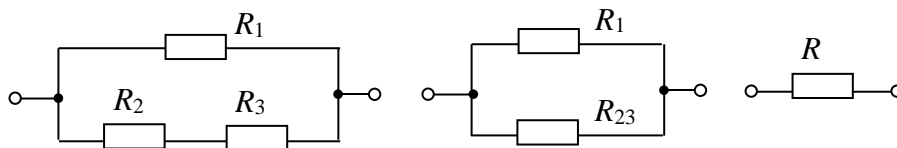


Рис.1.13

Складні з'єднання – «трикутник» (рис.1.14) та «зірка» (рис.1.15).

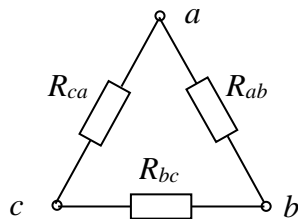


Рис.1.14

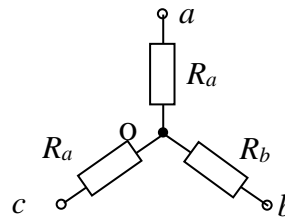


Рис.1.15

Реальні напрями струмів для складних з'єднань ми можемо визначити лише після розрахунку цих кіл. Можна також здійснити еквівалентне перетворення «трикутника» в «зірку»:

$$R_a = \frac{R_{ab}R_{ca}}{R_{ab}+R_{bc}+R_{ca}}, R_b = \frac{R_{ab}R_{bc}}{R_{ab}+R_{bc}+R_{ca}}, R_c = \frac{R_{ca}R_{bc}}{R_{ab}+R_{bc}+R_{ca}}.$$

Для розрахунку електричних кіл з одним джерелом застосовують *метод згортання*. Порядок розрахунку цим методом наступний:

- згортання кола до одного еквівалентного опору;
- розрахунок загального струму за законом Ома;
- розгортання кола, визначення струмів віток та напруг на ділянках кола;
- перевірка правильності розрахунку за допомогою рівняння балансу потужностей.

Розрахунок електричних кіл з кількома джерелами.

Методи розрахунку кіл з кількома джерелами базуються на *законах Кірхгофа*.

Перший закон Кірхгофа: алгебраїчна сума струмів у *вузлі* електричного кола дорівнює нулю $\sum I_n = 0$ (*вузол* – точка з'єднання двох і більше віток електричного кола, *вітка* – ділянка кола, по якій протікає однаковий струм, вітка може містити один або кілька елементів з'єднаних послідовно).

Другий закон Кірхгофа: алгебраїчна сума спадів напруг вздовж замкнутого *контур*у дорівнює алгебраїчній сумі е.р.с. вздовж цього ж контуру (*контур* – це будь-який замкнутий шлях в колі): $\sum R_n I_n = \sum E_n$.

Метод законів Кірхгофа.

Якщо коло містить p віток і q вузлів, то для розрахунку цього кола необхідно визначити p невідомих струмів. Для цього необхідно скласти систему рівнянь і розв'язати її.

На рис. 1.16 зображено коло зі складним з'єднанням елементів. Вибираємо довільно напрями струмів в цьому колі і позначаємо їх на схемі, далі позначаємо вузли $q=3$ та контури. За першим законом Кірхгофа складаємо $q - 1$ рівнянь, а за другим законом $p - q - 1$ рівнянь.

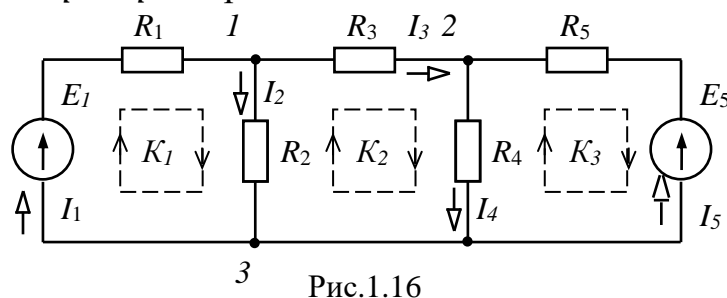


Рис.1.16

Для схеми (рис.1.16) $p = 5$ та $q = 3$.

За першим законом Кірхгофа складаємо два рівняння для вузлів 1 і 2 (струми, що входять у вузол враховуємо зі знаком +, а ті що виходять з вузла зі знаком -):

$$\text{“B1”}: +I_1 - I_2 - I_3 = 0,$$

$$\text{“B2”}: +I_3 - I_4 + I_5 = 0. \quad (1)$$

За другим законом Кірхгофа складаємо три рівняння для *контурів* $K1, K2, K3$ (напрями обходу контурів вибираємо за годинниковою стрілкою, якщо

напрями спадів напруг чи е.р.с. співпадають з напрямом обходу контуру, враховуємо їх зі знаком +, якщо не співпадають, то зі знаком -):

$$\begin{aligned} \text{“ } K_1 \text{ “} + R_1 I_1 + R_2 I_2 &= +E_1, \\ \text{“ } K_2 \text{ “} - R_2 I_2 + R_3 I_3 + R_4 I_4 &= 0, \\ \text{“ } K_3 \text{ “} - R_4 I_4 - R_5 I_5 &= -E_5. \end{aligned} \quad (2)$$

Таким чином, система рівнянь складена за методом законів Кірхгофа:

$$\begin{cases} +I_1 - I_2 - I_3 = 0 \\ +I_3 - I_4 + I_5 = 0 \\ +R_1 I_1 + R_2 I_2 = +E_1 \\ -R_2 I_2 + R_3 I_3 + R_4 I_4 = 0 \\ -R_4 I_4 - R_5 I_5 = -E_5 \end{cases} \quad (3)$$

Розв'язавши цю систему, отримаємо значення струмів віток. Якщо значення струмів отримані зі знаком +, то реальні напрями струмів співпадають з вибраними довільно до початку розрахунку. Якщо значення струмів отримані зі знаком -, то реальні напрями струмів протилежні з вибраними довільно до початку розрахунку.

Для перевірки правильності розрахунку кола використовуємо рівняння балансу потужностей, яке випливає із закону збереження енергії: сума потужностей джерел дорівнює сумі потужностей $\Sigma P_R = \Sigma P_E$. Для кола на рис.1.16 сума потужностей джерел: $\Sigma P_E = \Sigma E_n I_n = E_1 I_1 + E_5 I_5$. Сума потужностей споживачів: $\Sigma P_R = \Sigma R_n I_n^2 = R_1 I_1^2 + R_2 I_2^2 + R_3 I_3^2 + R_4 I_4^2 + R_5 I_5^2$.

Метод двох вузлів.

Цей метод застосовують для кіл з двома вузлами та кількома паралельними вітками (наприклад, трифазних кіл). Цей метод базується на першому законі Кірхгофа. Розглянемо коло на рис.1.20. Спочатку визначаємо міжвузлову напругу: $V = \Sigma G_n E_n / \Sigma G_n$, де G_n - провідність n вітки, E_n - е.р.с n вітки. Для кола на рис.1.20:

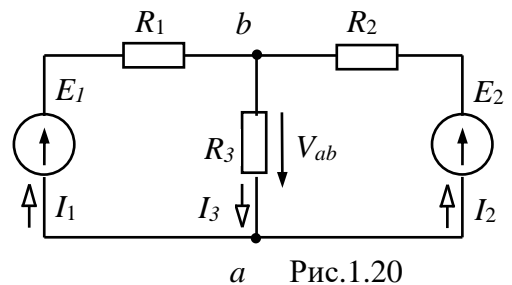
$$V_{ab} = \frac{G_1 E_1 + G_2 E_2}{G_1 + G_2 + G_3}.$$

Далі знаходимо струми віток:

$$V_{ab} = R_3 I_3, I_3 = \frac{V_{ab}}{R_3} = V_{ab} G_3,$$

$$V_{ab} = E_1 - R_1 I_1, I_1 = \frac{(E_1 - V_{ab})}{R_1} = (E_1 - V_{ab}) G_1,$$

$$V_{ab} = E_2 - R_2 I_2, I_2 = \frac{(E_2 - V_{ab})}{R_2} = (E_2 - V_{ab}) G_2.$$



Метод еквівалентного генератора.

Цей метод застосовують, коли необхідно визначити струм лише однієї вітки кола (наприклад, якщо ця вітка містить змінний або нелінійний опір). Для кола на рис.1.20 визначимо струм I_3 . Спочатку виділяємо вітку з невідомим струмом I_3 , а решту кола замінюємо еквівалентним генератором (рис.1.23) з параметрами $E_{екв}$ - еквівалентна е.р.с., яка дорівнює напрузі холостого ходу на розімкнутих затискачах ab (рис.1.24) та $R_{екв}$ - еквівалентний опір, який дорівнює

вхідному опорі решти кола відносно затискачів ab . Отже, потрібно розрахувати $E_{екв}$ та $R_{екв}$.

$$\text{Для кола на рис.1.20: } R_{екв} = \frac{R_1 R_3}{R_1 + R_3}.$$

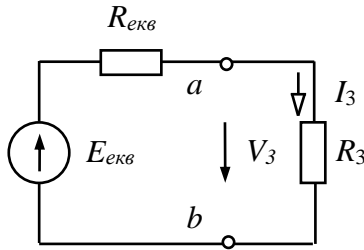


Рис.1.23

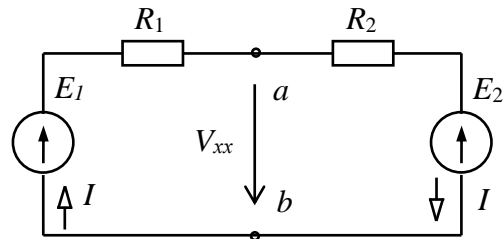


Рис.1.24

Розраховуємо $E_{екв}$ користуючись схемою рис.1.24:

$$U_x = E_{екв} = E_1 - R_1 I, \text{ де } I = \frac{E_1 - E_2}{R_1 + R_3}.$$

Користуючись схемою на рис.1.23, знаходимо невідомий струм:

$$I_2 = \frac{E_{екв}}{R_{екв} + R_2}.$$

Нелінійні кола постійного струму.

Нелінійними називають кола, що складаються з одного і більше нелінійних елементів. *Нелінійним* називають елемент, опір якого не є постійним, а змінюється в залежності від напруги, струму, температури, освітлення та ін. Основною характеристикою нелінійного елемента є його *вольт-амперна характеристика* (ВАХ) $V(I)$ і вона є нелінійною (рис.1.25).

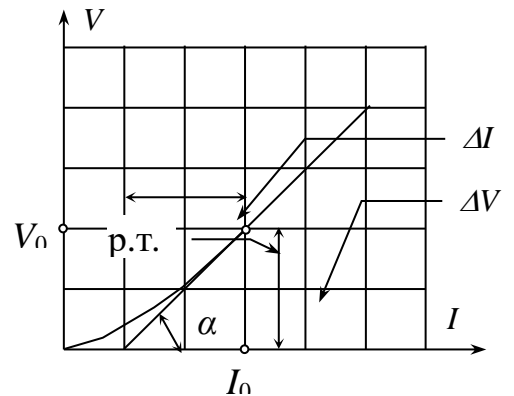


Рис.1.25.

Нелінійні елементи поділяються на керовані та некеровані. Некеровані елементи (резистори, діоди та ін.) мають два виводи, керовані елементи (транзистори, тиристри та ін.) мають три або більше виводів. ВАХ нелінійного елемента може бути симетричною або несиметричною. Коли опір елемента не залежить від напрямку струму та полярності прикладеної напруги, то ВАХ такого елемента буде симетричною. ВАХ $V(I)$ нелінійного елемента можна представити графічно, аналітично та за допомогою таблиці.

Для розрахунку нелінійних електричних кіл застосовують графо-аналітичний метод, суть якого полягає у знаходженні напруг та струмів кола за допомогою ВАХ нелінійних елементів, які представлені графічно або таблицею, застосовуючи закони Ома та Кірхгофа. Якщо ж ВАХ представлені аналітично (формулами) то для розрахунку можна застосовувати методи двох вузлів та еквівалентного генератора.

Нелінійні елементи характеризують *статичним* та *динамічним* опором. Ці опори розраховують для кожної окремо взятої точки ВАХ (на рис.1.25 робоча точка – р.т.):

$$R_{CT} = V_0/I_0, R_\delta = \Delta V/\Delta I = dV/dI = \operatorname{tg} \alpha,$$

α – кут між дотичною до ВАХ у робочій точці (р.т.) та віссю X. Статичний опір додатній $R_{CT} > 0$. Динамічний опір додатній ($R_\delta > 0$) якщо ВАХ зростаюча та від’ємний ($R_\delta < 0$), коли ВАХ спадаюча.

2. Кола змінного струму

Змінним називають струм, що періодично змінюється в часі за синусоїдним законом.

Миттєвим називають значення змінного струму в будь-який момент часу і очевидно що миттєве значення є функцією часу: $i(t) = I_m \sin(\omega t + \psi_I)$. Миттєве значення напруги записуємо аналогічно: $v(t) = V_m \sin(\omega t + \psi_V)$ (рис.2.1).

Отже, змінний струм характеризують наступними параметрами (рис.2.1):

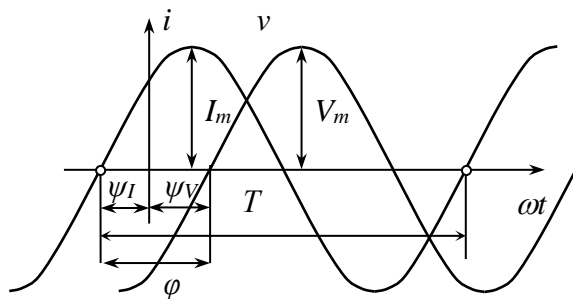


Рис.2.1

I_m - амплітуда, максимальне значення за період, період T , час по закінченні якого повторюються миттєві значення струму (напруги), *циклічна частота* $f = 1/T$ (кількість періодів за секунду) (Гц), *кутова частота* $\omega = 2\pi f$ (рад/с), фаза $\beta = (\omega t + \psi_I)$, *початкова фаза* струму ψ_I чи напруги ψ_M (фазовий зсув відносно нуля).

Кут зсуву фаз між напругою та струмом: $\phi = \psi_V - \psi_I$ (рис.2.1).

Середнє значення струму за півперіода:

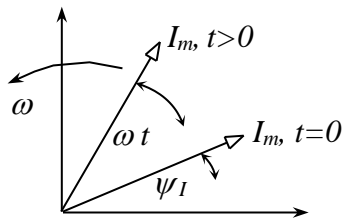


Рис.2.2

$$I_{\text{сеп}} = \frac{1}{\pi} \int_0^\pi I_m \sin \omega t dt, I_{\text{сеп}} = 2I_m/\pi = 0.637I_m.$$

Діюче значення змінного струму $i(t)$ (середньоквадратичне) рівне такому значенню постійного струму I , що за час рівний періоду змінного струму $T = 2\pi$, виділяє ту ж кількість тепла, що й змінний $i(t)$. Кількість енергії, що виділяє змінний струм

$$\text{за період: } Q_{\approx} = \int_0^T Ri^2 dt = RI_m^2 T \cdot \int_0^T Ri^2 dt$$

Кількість енергії, що виділяє постійний струм за період: $Q_- = RI^2 T$.

$Q_{\approx} = Q_-$, отже $Q_{\approx} = \int_0^T Ri^2 dt = RI^2 T$ і діюче значення змінного струму рівне

$$\text{в загальному випадку: } I = \sqrt{\frac{1}{T} \int_0^T Ri^2 dt}.$$

Для змінного синусоїдного струму $Q_{\approx} = RI_m^2 T = Q_- = RI^2 T$, отже співвідношення між діючим та амплітудним значеннями: $I = I_m/\sqrt{2}$.

Змінний струм можна представити *часовою*

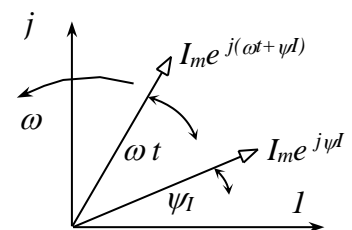


Рис.2.3

діаграмою (рис.2.1), вектором на площині (рис.2.2) та комплексним числом (рис.2.3).

Якщо ми представляємо змінний струм $i = I_m \sin(\omega t + \psi_I)$ вектором, то довжина цього вектора пропорційна амплітудному I_m (діючому I) значенню струму, а кут між цим вектором та віссю X : $\beta = \omega t + \psi_I$. За додатній напрям обертання прийнято напрям проти годинникової стрілки. В цьому випадку вектор струму (напруги) буде обертатися відносно початку координат з кутовою частотою ω . Зафіксуємо цей вектор в момент часу $t = 0$ (рис.2.2), в цьому випадку кут $\beta = \psi_I$ дорівнюватиме початковій фазі.

Векторною діаграмою називають сукупність векторів напруги та струму в колі, що виходять з однієї точки. Переважно векторну діаграму будують для діючих значень напруги та струму $I = I_m/\sqrt{2}$, $V = V_m/\sqrt{2}$. Побудову діаграми починають з опорного вектора. При послідовному з'єднанні опорним вибирають вектор струму, при паралельному – напруги.

Змінний струм (напругу) можна також представити комплексним числом $i(t) = I_m \sin(\omega t + \psi_I) \div I_m e^{j(\omega t + \psi_I)} = I_m e^{j\psi_I} e^{j\omega t} = \underline{I}_m e^{j\omega t}$ (показникова форма комплексного числа). На рис.2.3 зображена комплексна площина, де “+1” дійсна вісь та “j” уявна вісь. Комплексна амплітуда струму $\underline{I}_m = I_m e^{j\psi_I}$ зображена на цій площині, Відповідно $\underline{I} = (I_m/\sqrt{2}) e^{j\psi_I}$ - це комплекс діючого значення, о відповідає миттєвому значенню струму в момент часу $t = 0$, який вже не залежить від часу (рис.2.3). Вирази комплексу діючого значення (комплексної амплітуди) не містять частоти, оскільки в колі діють напруги та струми однакової частоти.

Приймачі в колі змінного струму

Миттєві значення змінного струму та напруги відповідно:

$$i = I_m \sin(\omega t + \psi_I), v = V_m \sin(\omega t + \psi_V).$$

Напруга для резистивного елемента (рис.2.4) (активного опору) за законом Ома :

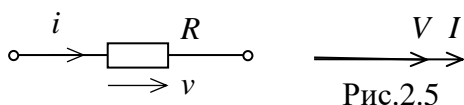


Рис.2.4

Рис.2.5

$$v = V_m \sin(\omega t + \psi_V) = Ri = RI_m \sin(\omega t + \psi_I),$$

тому $V_m = RI_m, V = RI$.

Початкові фази напруги і струму будуть рівні $\psi_v = \psi_i$, тому кут зсуву фаз дорівнює нулю

$$\varphi = \psi_v - \psi_i = 0.$$

Активний опір елемента R (Ом), активна провідність $G = 1/R$ (См). Векторна діаграма елемента зображена на рис.2.5.

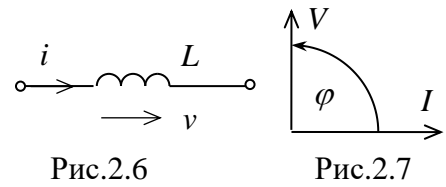
Активна потужність елемента (необоротне перетворення електричної енергії в теплову): $P = RI^2 = GV^2$ (Вт).

Індуктивність L (Гн) є основною характеристикою ідеального індуктивного елемента (рис.2.6). Для цього елемента застосуємо закон Ома в диференціальній формі:

$$v_L = V_m \sin(\omega t + \psi_V) = L \frac{di_L}{dt} = L \frac{d}{dt} I_m \sin(\omega t + \psi_I) =$$

$$= \omega L I_m \cos(\omega t + \psi_I) = \omega L I_m \sin(\omega t + \psi_I + \pi/2),$$

тому $V_m = \omega L I_m$, $V = X_L I$, реактивний опір індуктивності залежить від частоти $X_L = \omega L$ (Ом), реактивна провідність $B_L = 1/(\omega L)$ (См), фазове співвідношення $\psi_V = \psi_I + \pi/2$, тому кут зсуву фаз додатний $\varphi = \psi_V - \psi_I = \pi/2$, що означає напруга випереджає струм.



На постійному струмі $\omega = 0$ реактивний опір індуктивності рівний нулю $X_L = 0$, а реактивна провідність $B_L = \infty$.

Векторна діаграма для індуктивного елемента зображена на рис.2.7. Реактивна потужність (запас енергії магнітного поля елемента): $Q_L = X_L I^2 = B_L V^2$ (ВАр).

Ємність C є основною характеристикою ємнісного елемента (рис.2.8). Для цього елемента застосуємо закон Ома в інтегральній формі:

$$\begin{aligned} v_C &= V_m \sin(\omega t + \psi_V) = \frac{1}{C} \int i \, dt = \frac{1}{C} \int I_m \sin(\omega t + \psi_I) \\ &= -\frac{1}{\omega C} I_m \cos(\omega t + \psi_I) = \\ &= -\frac{1}{\omega C} I_m \cos(\omega t + \psi_I) = \frac{1}{\omega C} I_m \sin(\omega t + \psi_I - \pi/2), \end{aligned}$$

тому $V_m = \frac{1}{\omega C} I_m$, $V = X_C I$, реактивний опір елемента залежить від частоти $X_C = 1/(\omega C)$ (Ом), реактивна провідність $B_C = \omega C$ (См), фазове співвідношення $\psi_V = \psi_I - \pi/2$, тому кут зсуву фаз від'ємний $\varphi = \psi_V - \psi_I = -\pi/2$, що означає напруга відстає від струму.

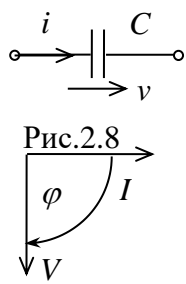


Рис.2.9

На постійному струмі $\omega = 0$ реактивний опір ємності дорівнює нескінченності (коло розімкнуте) $X_C = \infty$, а реактивна провідність $B_C = 0$.

Векторна діаграма для ємнісного елемента зображена на рис.2.9.

Реактивна потужність (запас енергії електричного поля елемента): $Q_C = X_C I^2 = B_C V^2$ (ВАр).

Зображення миттєвих значень струму та напруги:

$$i \div \underline{I} = \underline{I}_m / \sqrt{2} = I e^{j\psi_I}, \quad v \div \underline{V} = \underline{V}_m / \sqrt{2} = V e^{j\psi_V},$$

Зображення похідної та інтегралу:

$$d/dt \div j\omega, \quad \int dt \div 1/(j\omega) = -j/\omega.$$

Закон Ома в комплексній формі для резистивного елемента:

$$v = R i \div \underline{V} = R \underline{I}, \quad V e^{j\psi_V} = R I e^{j\psi_I},$$

Активний опір в комплексній показниковій формі:

$$R = V e^{j\psi_V} / I e^{j\psi_I} = (V/I) e^{j(\psi_V - \psi_I)} = R e^{j\varphi}, \quad \varphi = 0.$$

Закон Ома в комплексній формі для індуктивного елемента:

$$v = L di/dt \div \underline{V} = j\omega L \underline{I}, \quad V e^{j\psi_V} = j\omega L I e^{j\psi_I},$$

Реактивний індуктивний опір в комплексній показниковій формі:

$$j\omega L = V e^{j\psi_V} / I e^{j\psi_I} = (V/I) e^{j(\psi_V - \psi_I)} = X_L e^{j\varphi}, \quad \varphi = 90^\circ.$$

Реактивна провідність елемента: $B_L e^{-j\varphi} = -j/\omega L$.

Множення на оператор j означає поворот на 90 градусів за годинниковою стрілкою ($\varphi = 90^\circ$), тому j називають оператором повороту.

Закон Ома в комплексній формі для ємнісного елемента:

$$v = \int idt / C \div \underline{V} = -j(1/\omega C)\underline{I}, V e^{j\psi_v} = -j(1/\omega C)I e^{j\psi_I},$$

Реактивний ємнісний опір в комплексній показниковій формі: $-j(1/\omega C) = V e^{j\psi_v} / I e^{j\psi_I} = (V/I) e^{j(\psi_v - \psi_I)} = X_C e^{j\varphi}, \varphi = -90^\circ$.

Реактивна провідність елемента: $B_C e^{-j\varphi} = j\omega C$. Множення на оператор $-j$ означає поворот на 90 градусів проти годинникової стрілки ($\varphi = -90^\circ$).

Послідовне з'єднання приймачів в колі змінного струму

Рівняння електричного стану кола (рис.2.10) записане за другим законом Кірхгофа справедливе для миттєвих значень (для діючих не справджується) :

$$v_R + v_L + v_C = v.$$

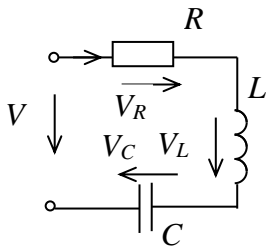


Рис.2.10

Якщо представимо ці миттєві значення векторами, то матимемо аналогічне рівняння: $\bar{V}_R + \bar{V}_L + \bar{V}_C = \bar{V}$.

Векторна діаграма для кола з послідовним з'єднанням зображена на рис.2.11. З цієї діаграми отримуємо *розрахунковий трикутник напруг* (рис.2.12).

Для нього справедливі наступні співвідношення:

$$V = \sqrt{V_R^2 + (V_L - V_C)^2}, \quad \varphi = \arctg(V_L - V_C)/V_R, \\ V_R = V \cos \varphi = V_a, \quad V_L - V_C = V \sin \varphi = V_p,$$

де відповідно активна та реактивна складова загальної (вхідної) напруги кола V .

Розрахунковий трикутник опорів (рис.2.12) отримуємо поділивши всі сторони трикутника напруг на значення струму в колі. Для цього трикутника справедливі наступні співвідношення :

$$Z = \sqrt{R^2 + (X_L - X_C)^2}, \quad \varphi = \arctg\left(\frac{X_L - X_C}{R}\right), \\ R = Z \cos \varphi, \quad X = X_L - X_C = Z \sin \varphi,$$

де повний, активний та реактивний опори кола.

Розрахунковий трикутник потужностей (рис.2.12) отримуємо помноживши всі сторони трикутника напруг на значення струму в колі. Для цього трикутника справедливі наступні співвідношення :

$$S = \sqrt{P^2 + (Q_L - Q_C)^2} \text{ (VA)}, \quad \varphi = \arctg\left(\frac{Q_L - Q_C}{P}\right),$$

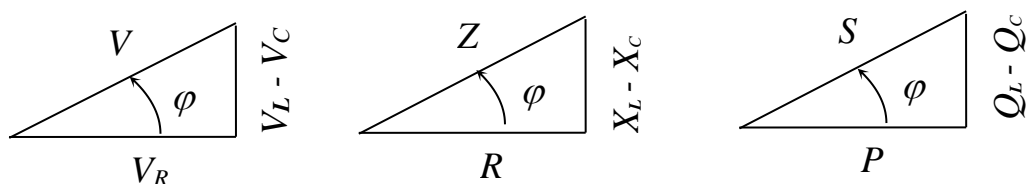


Fig.2.12

$$P = S \cos \varphi = VI \cos \varphi, \quad Q = Q_L - Q_C = S \sin \varphi = VI \sin \varphi,$$

де повна (ВА) активна та реактивна потужність кола.

Рівняння електричного стану кола (рис.2.10) в комплексній формі:

$$R\underline{I} + j\omega L\underline{I} - j/(\omega C)\underline{I} = \underline{V}.$$

Повний опір кола в комплексній алгебраїчній формі:

$$\underline{Z} = R + j\omega L - j/(\omega C) = R + j(X_L - X_C).$$

За законом Ома повний опір в комплексній показниковій формі:

$$\underline{Z} = \underline{V} / \underline{I} = \frac{V e^{j\psi_V}}{I e^{j\psi_I}} = \frac{V}{I} e^{j(\psi_V - \psi_I)} = Z e^{j\varphi} = Z \cos \varphi - jZ \sin \varphi = R + jX.$$

Паралельне з'єднання приймачів в колі змінного струму

Рівняння електричного стану кола (рис.2.13) записане за першим законом Кірхгофа справедливе для миттєвих значень (для діючих не справджується) :

$$i_R + i_L + i_C = i.$$

Якщо представимо ці миттєві значення векторами, то матимемо аналогічне рівняння: $\bar{I}_R + \bar{I}_C + \bar{I}_L = \bar{I}$.

Векторна діаграма для кола з послідовним з'єднанням зображена на рис.2.14. З цієї діаграми отримуємо *розрахунковий трикутник струмів* (рис.2.15). Для нього справедливі наступні співвідношення:

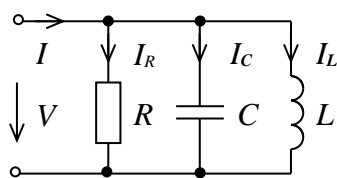


Рис.2.13

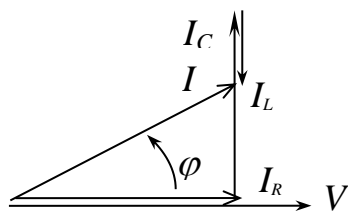


Рис.2.14

$$I = \sqrt{I_R^2 + (I_C - I_L)^2}, \quad \varphi = \arctg((I_C - I_L)/I_R),$$

$I_R = I \cos \varphi = I_a$, $I_C - I_L = I \sin \varphi = I_p$ - де відповідно активна та реактивна складова струму кола.

Розрахунковий трикутник провідностей (рис.2.15) отримуємо поділивши всі сторони трикутника струмів на значення напруги в колі. Для цього трикутника справедливі наступні співвідношення :

$$Y = \sqrt{G^2 + (B_C - B_L)^2}, \quad \varphi = \arctg\left(\frac{B_C - B_L}{G}\right),$$

$$G = Y \cos \varphi, \quad B = B_C - B_L = Y \sin \varphi$$

- де повна, активна та реактивна провідності кола.

Рівняння електричного стану кола (рис.2.13) в комплексній формі:

$$G\underline{V} + j\omega C\underline{V} - j/(\omega L)\underline{V} = \underline{I}.$$

Повна провідність кола в комплексній алгебраїчній формі:

$$\underline{Y} = G + j\omega C - j/(\omega L) = G + j(B_C - B_L).$$

За законом Ома повна провідність в комплексній показниковій формі:

$$\underline{Y} = \underline{I} / \underline{V} = \frac{I e^{j\psi_V}}{V e^{j\psi_I}} = \frac{I}{V} e^{j(\psi_I - \psi_V)} = Y e^{-j\varphi} = Y \cos \varphi - jY \sin \varphi = G + jB.$$

Потужності кола змінного струму

Комплекс повної потужності кола:

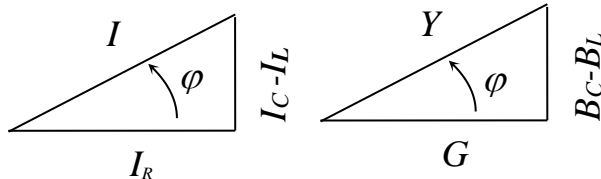


Рис.2.15

$$\begin{aligned} \underline{S} &= \underline{V}\underline{I}^* = V e^{j\psi_V} \cdot I e^{-j\psi_I} \\ &= VI e^{j(\psi_V - \psi_I)} = S e^{j\varphi} \\ &= \end{aligned}$$

$= S \cos \varphi + jS \sin \varphi = P + jQ$,
дійсна частина комплексу повної потужності $P = S \cos \varphi$ - це

активна потужність, уявна частина - $Q = S \sin \varphi$ – це реактивна потужність.

Для перевірки правильності розрахунку кола змінного струму користуємося рівняннями балансу потужностей: активна потужність джерела рівна сумі активних потужностей споживачів: $P_{дж} = \sum P_{сп}$,

$$P_{дж} = VI \cos \varphi, \sum P_{сп} = R_1 I_1^2 + R_2 I_2^2 + \dots = \sum R_n I_n^2,$$

реактивна потужність джерела рівна сумі реактивних потужностей споживачів: $Q_{дж} = \sum Q_{сп}$,

$$Q_{дж} = VI \sin \varphi, \sum Q_{сп} = X_1 I_1^2 + X_2 I_2^2 + \dots = \sum X_n I_n^2,$$

де I_n – діюче значення струму n -ї вітки, R_n – активний опір n -ї вітки, $X_n = X_{Ln}$ – реактивний опір n -ї вітки.

Перетворення в колі змінного струму

При розрахунку кіл змінного струму можна використовувати метод згортання кола. При цьому необхідно проводити перетворення послідовного

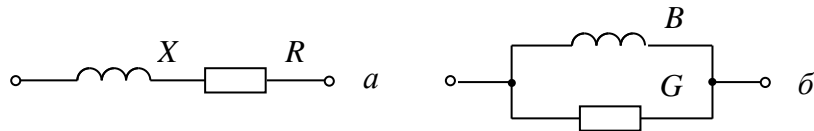


Fig.2.16

з'єднання в паралельне (рис.2.16) і навпаки (рис.2.18).

Формули для такого перетворення отримують з розрахункових трикутників

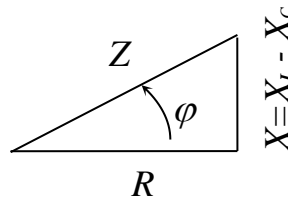


Рис.2.17а

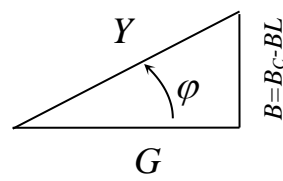


Рис.2.17б

опорів (рис.2.17а) та провідностей (рис.2.17б). Для цих трикутників запишемо наступні вирази:

$$\cos \varphi = \frac{R}{Z} = \frac{G}{Y}, \quad (1)$$

$$\sin \varphi = \frac{X}{Z} = \frac{B}{Y}. \quad (2)$$

При перетворенні послідовного з'єднання в паралельне переходимо від опорів до провідностей (рис.2.16), тобто з першого виразу визначаємо активну провідність G , а з другого виразу визначаємо реактивну провідність B :

$$R = \frac{GZ}{Y} = \frac{G}{Y^2} = \frac{G}{G^2 + B^2}, \quad X = \frac{BZ}{Y} = \frac{B}{Y^2} = \frac{B}{G^2 + B^2},$$

$$G = \frac{R}{(R^2 + X^2)}, \quad B = -\frac{X}{(R^2 + X^2)}.$$

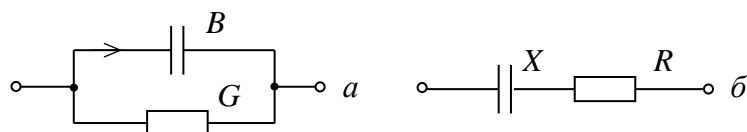


Fig.2.18

При перетворенні паралельного з'єднання в послідовне переходимо від провідностей до опорів (рис.2.18), тобто з першого виразу визначаємо активний

опір, а з другого виразу визначаємо реактивний опір:

$$R = \frac{GZ}{Y} = \frac{G}{Y^2} = \frac{G}{G^2+B^2}, X = \frac{BZ}{Y} = \frac{B}{Y^2} = \frac{B}{G^2+B^2}.$$

Схеми заміщення та показники якості елементів кола

Реальна котушка індуктивності відрізняється від ідеального індуктивного елемента наявністю втрат. Для розрахунку котушки використовують дві *схеми заміщення* послідовну (рис.2.16а) та паралельну (рис.2.16б), які є еквівалентними. Елементи цих схем: L - ідеальна індуктивність, реактивний опір та провідність: $X = \omega L, B = 1/(\omega L), R (G)$ – активний опір, відображає втрати. Взаємні перетворення цих схем проводимо за вище виведеними формулами.

Показником якості котушки індуктивності є її *добротність*:

$$d = Q/P = X_L/R = tg\varphi.$$

Реальний конденсатор відрізняється від ідеального ємнісного елемента наявністю втрат. Для розрахунку конденсатора використовують дві *схеми заміщення* паралельну (рис.2.18а) та послідовну (рис.2.16б), які є еквівалентними. Елементи цих схем: C - ідеальна ємність, реактивна провідність та опір: $B = \omega C, X = 1/(\omega C) R (G)$ – активний опір, відображає втрати. Взаємні перетворення цих схем проводимо за вище виведеними формулами.

Показником якості конденсатора є *тангенс кута втрат*:

$$tg\delta = P/Q = R/X_C, \delta = 90^\circ - \varphi.$$

Коефіцієнт потужності

Коефіцієнт потужності показує ефективність використання електричної енергії (яку частину повної потужності складає активна (корисна) потужність). З розрахункового трикутника потужностей (рис.2.12) матимемо :

$$\cos \varphi = P/S = P/\sqrt{P^2 + Q^2},$$

P - активна (корисна) потужність, Q - реактивна (не корисна потужність, яка необхідна для створення електромагнітного поля).

Коефіцієнт потужності залежить від характеру навантаження. З розрахункового трикутника опорів (рис.2.12) матимемо:

$$\cos \varphi = R/Z = R/\sqrt{R^2 + X^2}.$$

Для ефективного використання електричної енергії потрібно забезпечити максимальне значення коефіцієнта потужності $\cos \varphi = 1$. Для цього в першу чергу потрібно уникати довготривалої роботи приймачів в режимі без навантаження (холостого ходу). Оскільки більшість приймачів електричної енергії є активно-індуктивними RL (споживають потужності P і Q_L), то їх коефіцієнт потужності є невисоким і його необхідно штучно підвищувати. Для цього паралельно до активно-індуктивних споживачів підключають батареї конденсаторів C або спеціальні синхронні компенсатори. Ємність конденсаторів підбирають таким чином, щоб споживана ними реактивна потужність дорівнювала реактивній потужності приймача, яку необхідно компенсувати: $Q_L = Q_C$. Тоді загальна реактивна потужність кола з компенсатором $Q_L - Q_C = Q = 0$, і коефіцієнт потужності буде максимальним $\cos \varphi = 1$.

Резонанс напруг.

Резонансом називають такий режим роботи електричного кола, що містить індуктивний та ємнісний елемент, при якому реактивна потужність на затискачах кола дорівнює нулю. Є два види резонансу: резонанс напруг та резонанс струмів.

Резонанс напруг може відбуватися у колі з послідовним з'єднанням L, C елементів (рис.2.10). В режимі резонансу напруги на реактивних елементах рівні $V_L = V_C$, тому умовою резонансу є рівність реактивних опорів елементів $X_L = X_C$, тобто

$$\omega_0 L = 1/(\omega_0 C),$$

Звідки $\omega_0^2 LC = 1$ резонансна частота:

$$\omega_0 = 1/\sqrt{LC}.$$

Резонансу напруг можна досягнути шляхом зміни ємності, індуктивності або частоти.

$$\rho = \omega_0 L = 1/(\omega_0 C), \rho = \sqrt{L/C} \text{ називають хвильовим опором.}$$

В режимі резонансу напруг реактивний опір кола та реактивна потужність рівні нулю:

$$X = X_L - X_C = 0, Q_L - Q_C = Q = 0.$$

Повний опір кола має чисто активний характер: $Z = \sqrt{R^2 + X^2} = R$.

Повна потужність кола є активною: $S = \sqrt{P^2 + Q^2} = P$, а кут зсуву фаз між напругою та струмом в колі $\varphi = 0$.

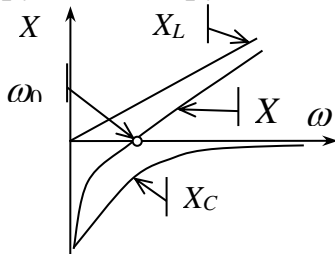


Рис.2.19

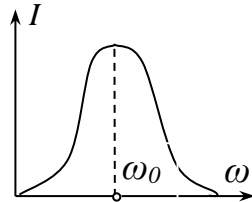


Рис.2.20

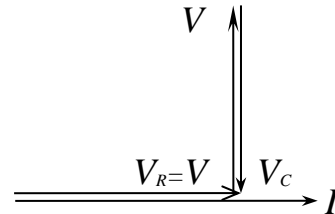


Рис.2.21

Струм в колі при резонансі $I = V/Z = V/R$ є максимальним, що є ознакою резонансу напруг. Частотні характеристики (залежність реактивних опорів від частоти): $X_L(\omega) = \omega L$, $X_C(\omega) = 1/(\omega C)$, $X(\omega) = X_L(\omega) - X_C(\omega)$ зображені на рис.2.19. При частоті меншій за резонансну $\omega < \omega_0$, реактивний опір кола та кут зсуву фаз між загальною напругою та струмом в колі від'ємні: $X < 0$, $\varphi < 0$, тобто опір має ємнісний характер. При частоті більшій за резонансну $\omega > \omega_0$, реактивний опір кола та кут зсуву фаз додатні: $X > 0$, $\varphi > 0$, тобто опір має індуктивний характер.

На рис.2.20 зображена резонансна крива струму (залежність струму від частоти) $I(\omega)$, а на рис.2.21 векторна діаграма кола для режиму резонансу.

Фазо-частотна характеристика $\varphi(\omega) = \arctg \frac{\omega L - 1/(\omega C)}{R}$ зображена на рис.2.22, а на рис.2.23 резонансні криві напруг $V_R(\omega)$, $V_L(\omega)$, $V_C(\omega)$.

Недолік режиму резонансу напруг полягає в тому, що напруги на елементах кола можуть в кілька разів перевищувати номінальні значення .

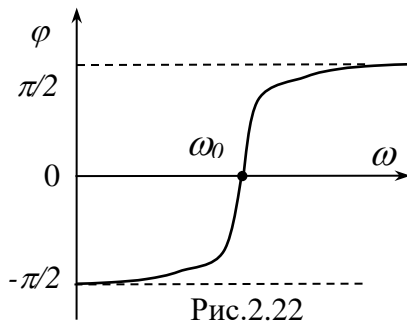


Рис.2.22

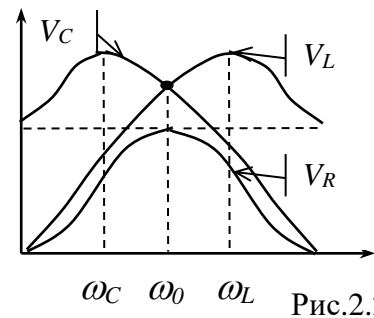


Рис.2.23

Резонанс струмів.

Резонанс струмів може відбуватися у колі з паралельним з'єднанням L, C елементів (рис.2.13). В режимі резонансу струми через реактивні елементи рівні $I_L = I_C$, тому умовою резонансу є рівність реактивних провідностей елементів $B_L = B_C$, для кола з паралельним з'єднанням ідеальних елементів (рис.2.13) цю умову можна записати так: $\omega_0 L = 1/(\omega_0 C)$.

Резонансна частота $\omega_0 = 1/\sqrt{LC}$.

Для кола з паралельним з'єднанням реальної котушки та ідеального конденсатора (рис.2.24) цю умову записуємо використовуючи формулу еквівалентного перетворення послідовного з'єднання RL в паралельне:

$$\omega_0 L / (R^2 + (\omega_0 L)^2) = 1/(\omega_0 C)$$

Резонансу струмів можна досягнути шляхом зміни ємності,

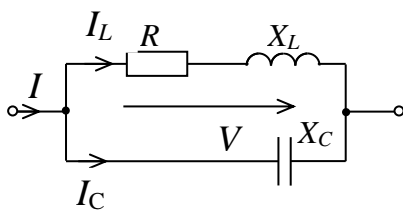


Рис.2.24

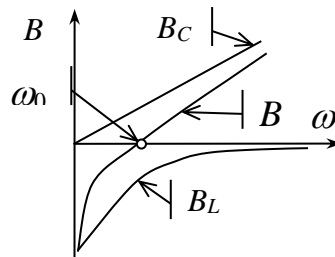


Рис.2.25

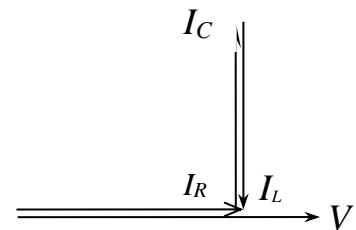


Рис.2.26

індуктивності або частоти.

В режимі резонансу струмів реактивна провідність кола та реактивна потужність рівні нулю:

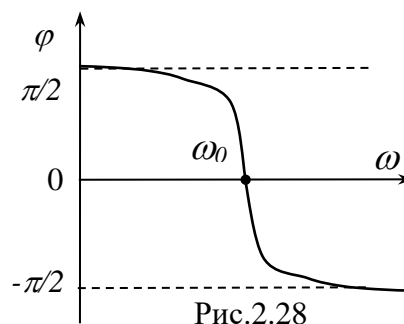
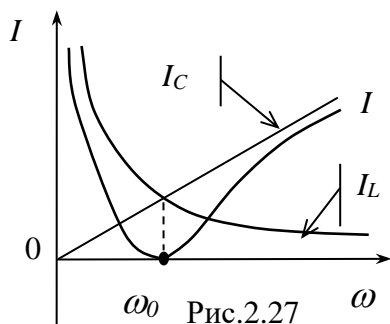
$$B = B_C - B_L = 0, \quad Q_L - Q_C = Q = 0,$$

Повна провідність кола має чисто активний характер: $Y = \sqrt{G^2 + B^2} = G$.

Повна потужність кола є активною: $S = \sqrt{P^2 + Q^2} = P$, а кут зсуву фаз між напругою та струмом в колі $\varphi = 0$.

Загальний струм в колі при резонансі $I = VY = VG$ є мінімальним, що є ознакою резонансу струму.

Частотні характеристики (залежність реактивних опорів від частоти) для кола на рис.2.13: $B_L(\omega) = 1/(\omega L)$, $B_C(\omega) = \omega C$, $B(\omega) = B_C(\omega) - B_L(\omega)$ зображено на рис.2.25. При частоті меншій за резонансну $\omega < \omega_0$, реактивна провідність кола від'ємна $B < 0$, тобто має індуктивний характер, тому кут зсуву фаз між загальним струмом та напругою буде додатнім $\varphi > 0$. При частоті



більшій за резонансну $\omega > \omega_0$ реактивна провідність кола додатня $B > 0$, тобто має ємнісний характер, тому кут зсуву фаз між загальним струмом та напругою буде від'ємним $\varphi < 0$.

Векторна діаграма кола (рис.2.13) при резонансі зображена на рис.2.26. На рис.2.27 зображені резонансні криві струмів: $I(\omega)$, $I_L(\omega) = B_L V$, $I_C(\omega) = B_C V$, а на рис. 2.28 зображені фазо-частотні характеристики $\varphi(\omega) = \arctg \frac{\omega C - 1/(\omega L)}{G}$.

Недолік режиму резонансу струмів полягає в тому, що струми через елементи кола можуть в кілька разів перевищувати номінальні значення. Проте, з іншого боку режим резонансу струмів застосовують для підвищення коефіцієнта потужності в електротехніці та є робочим режимом деяких електронних пристроїв.

3. Трифазні електричні кола

Трифазне електричне коло складається з трифазного джерела, що забезпечує трифазну систему е.р.с., трифазного приймача або трьох груп однофазних приймачів та з'єднувальних проводів (ліній).

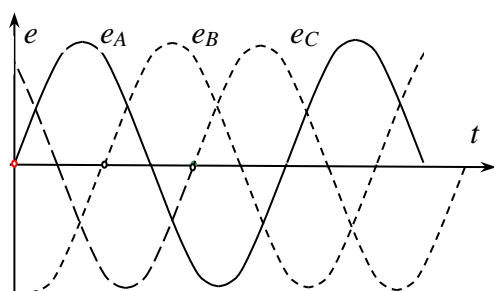


Рис.3.1

Трифазною системою е.р.с. називають сукупність трьох синусоїдних е.р.с. однакової частоти ω , які зсунуті одна відносно одної по фазі на кут $2\pi/3$ (120°). Фаза - це частина кола, по якій протікає однаковий струм. Амплітудні значення фазних е.р.с. позначають так:

E_{Am}, E_{Bm}, E_{Cm} , якщо вони рівні, то таку систему е.р.с. називають симетричною.

Миттєві значення фазних е.р.с. (рис.3.1):

$$e_A = E_{Am} \sin \omega t, e_B = E_{Bm} \sin(\omega t - 120^\circ), e_C = E_{Cm} \sin(\omega t + 120^\circ).$$

Порядком чергування фаз називають порядок проходження фазних е.р.с. через нуль. Прямий порядок чергування фаз - це ABC (рис.3.1), зворотній

порядок чергування фаз – це ACB .

Для діючих значень фазних е.р.с. симетричної системи запишемо:

$$E_A = E_B = E_C = E_\phi.$$

Якщо знехтувати втратами в джерелі, то відповідні е.р.с. будуть рівні фазним напругам джерела :

$$E_A = V_A, \quad E_B = V_B, \quad E_C = V_C.$$

Фазні напруги джерела V_A, V_B, V_C – це напруги між певною фазою (A, B, C) та нульовою точкою N позначено на рис.3.3. В комплексній формі фазні напруги записують так :

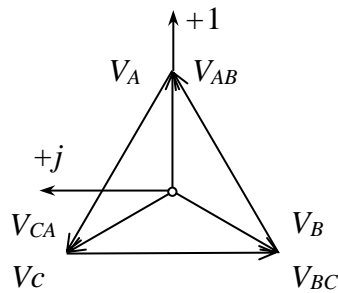


Рис.3.2

$$\underline{V}_A = V_A e^{j0}, \quad \underline{V}_B = V_B e^{-j120^\circ}, \quad \underline{V}_C = V_C e^{j120^\circ}.$$

Лінійні напруги (між лініями, що з'єднують джерело та приймач) позначено на рис.3.4, вони рівні геометричній (векторній) різниці відповідних фазних напруг (рис.3.2). В комплексній формі лінійні напруги записують так:

$$\underline{V}_{AB} = \underline{V}_A - \underline{V}_B = V_{AB} e^{j30^\circ},$$

$$\underline{V}_{BC} = \underline{V}_B - \underline{V}_C = V_{BC} e^{-j90^\circ}$$

$$\underline{V}_{CA} = \underline{V}_C - \underline{V}_A = V_{CA} e^{j150^\circ}.$$

Векторна діаграма (рис.3.2) ілюструє співвідношення між фазними та лінійними напругами. З діаграми видно, що лінійні напруги випереджають відповідні фазні на 30° .

Трифазне джерело та трифазні споживачі з'єднують «зіркою» Y (рис.3.3 та 3.5) або «трикутником» Δ (рис.3.7).

При з'єднанні трипровідною «зіркою» три клеми трифазного джерела з'єднують у спільну нульову точку N (рис.3.3), а інші три клеми джерела (A, B, C), під'єднують до лінійних провідників. Аналогічно при з'єднанні «зіркою» три клеми трифазного приймача з'єднують у спільну нульову точку n (рис.3.3), а інші три клеми споживача (a, b, c) під'єднують до лінійних провідників.

Фазні напруги джерела (між нульовою точкою N та точками A, B, C) позначають V_A, V_B, V_C , фазні напруги приймача (між нульовою точкою n та

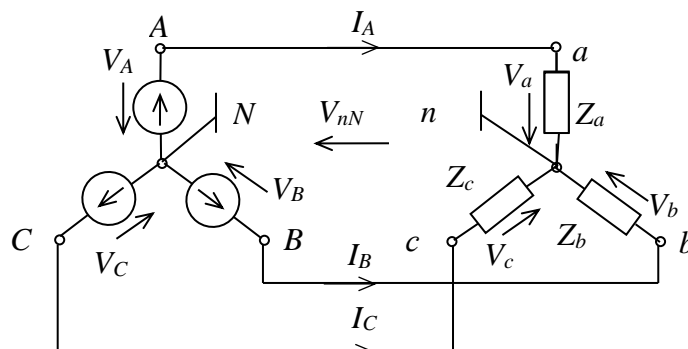


Рис.3.3

точками a, b, c) позначають V_a, V_b, V_c . Лінійні напруги джерела – напруги між точками A, B, C (рис.3.4) позначають відповідно V_{AB}, V_{BC}, V_{CA} , лінійні напруги приймача – напруги між точками a, b, c (рис.3.4) позначають відповідно V_{ab}, V_{bc}, V_{ca} . Напрями цих напруг зображені на рис.3.4. Співвідношення між діючими значеннями фазних та лінійних напруг наступне: $V_L = \sqrt{3}V_\phi$.

На рис.3.4 також зображено *фазні струми* (які течуть в кожній фазі) I_ϕ

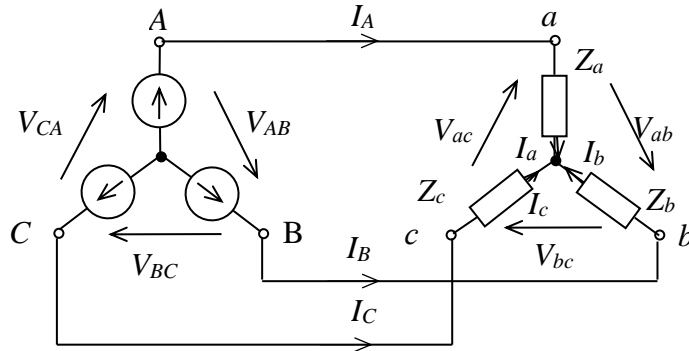


Рис.3.4

(I_a, I_b, I_c), та *лінійні струми* (які протікають в лініях, що з'єднують джерело і приймач) I_λ (I_A, I_B, I_C). З рис.3.4 показано напрями всіх струмів, а також видно, що при з'єднанні «зіркою» фазні струми рівні лінійним $I_\phi = I_\lambda$.

Симетричним називають *навантаження*, якщо комплекси повних опорів фаз рівні:

$$\underline{Z}_a = \underline{Z}_b = \underline{Z}_c = \underline{Z}_\phi,$$

Якщо навантаження симетричне, то відповідні фазні напруги джерел рівні фазним напругам приймачів:

$$V_a = V_A, \quad V_b = V_B, \quad V_c = V_C.$$

Фазні струми визначають за законом Ома:

$$\underline{I}_A = \underline{V}_a / \underline{Z}_a, \quad \underline{I}_B = \underline{V}_b / \underline{Z}_b, \quad \underline{I}_C = \underline{V}_c / \underline{Z}_c.$$

Діючі значення цих струмів будуть також рівні: $I_A = I_B = I_C = I_\phi = I_\lambda$.

При несиметричному навантаженні ($\underline{Z}_a \neq \underline{Z}_b \neq \underline{Z}_c$) між нульовими точками джерела та приймача з'являється *напруга зміщення нейтралі* \underline{V}_{nN} (рис.3.3), яку можна визначити за методом двох вузлів:

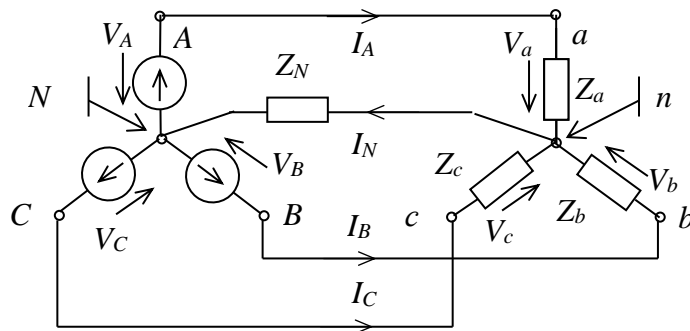


Fig.3.5

$$\underline{V}_{nN} = \frac{\underline{V}_A \underline{Y}_a + \underline{V}_B \underline{Y}_b + \underline{V}_C \underline{Y}_c}{\underline{Y}_a + \underline{Y}_b + \underline{Y}_c},$$

де $\underline{Y}_a = 1/\underline{Z}_a = I_a/V_a$, $\underline{Y}_b = 1/\underline{Z}_b = I_b/V_b$, $\underline{Y}_c = 1/\underline{Z}_c = I_c/V_c$.

В цьому випадку фазні напруги приймачів визначають за другим законом Кірхгофа:

$$\underline{V}_a = \underline{V}_A - \underline{V}_{nN}, \quad \underline{V}_b = \underline{V}_B - \underline{V}_{nN}, \quad \underline{V}_c = \underline{V}_C - \underline{V}_{nN},$$

Фазні струми визначають за законом Ома:

$$\underline{I}_a = \underline{V}_a / \underline{Z}_a, \quad \underline{I}_b = \underline{V}_b / \underline{Z}_b, \quad \underline{I}_c = \underline{V}_c / \underline{Z}_c.$$

При з'єднанні чотирипровідною «зіркою» нульові точки джерела N та приймача з'єднують нейтральним проводом (нейтраллю) (рис.3.5). Тоді напруга зміщення нейтралі буде нульовою ($V_{nN} = 0$), а струм нейтралі визначають за першим законом Кірхгофа для вузла n :

$$\underline{I}_A + \underline{I}_B + \underline{I}_C = \underline{I}_N.$$

При симетричному навантаженні ($\underline{Z}_a = \underline{Z}_b = \underline{Z}_c$): $\underline{I}_A + \underline{I}_B + \underline{I}_C = 0, I_N = 0, V_{nN} = 0$.

Векторна діаграма струмів при з'єднанні чотирипровідною «зіркою» та несиметричному навантаженні зображена на рис.3.6.

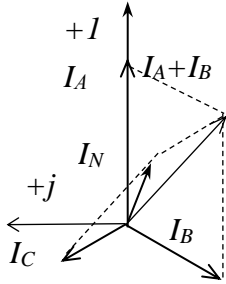


Рис.3.6

При з'єднанні «трикутником» кожену клему трифазного джерела (приймача) з'єднують з іншою клемою джерела (приймача) (рис.3.7). Для цього з'єднання фазні напруги рівні лінійним: $V_\phi = V_L, V_{AB} = V_{BC} = V_{CA} = V_L$.

Фазні (лінійні) напруги в комплексній формі:

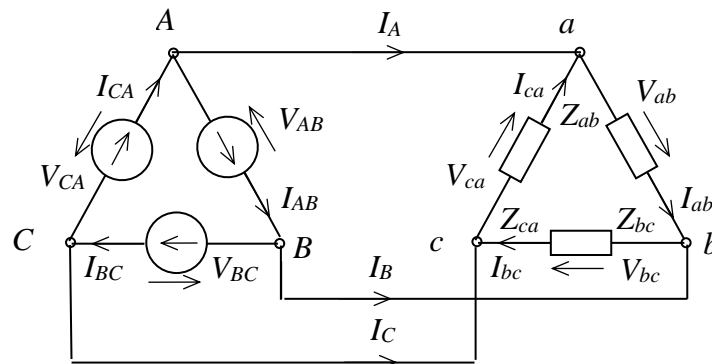


Рис.3.7

$$\underline{V}_{AB} = V_{AB} e^{j0}, \quad \underline{V}_{BC} = V_{BC} e^{-j120^\circ}, \quad \underline{V}_{CA} = V_{CA} e^{j120^\circ}.$$

Фазні (лінійні) напруги приймача рівні фазним (лінійним) напругам джерела:

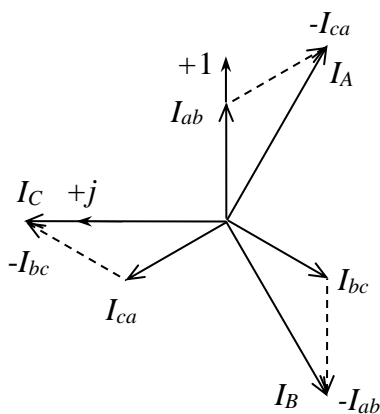


Рис.3.8

$$\underline{V}_{ab} = \underline{V}_{AB}, \quad \underline{V}_{bc} = \underline{V}_{BC}, \quad \underline{V}_{ca} = \underline{V}_{CA}.$$

При активному характері навантаження фаз ($\varphi = 0$), фазні струми I_{ab}, I_{bc}, I_{ca} співпадають по фазі з відповідними фазними напругами V_{AB}, V_{BC}, V_{CA} .

При активно-індуктивному характері навантаження ($\varphi > 0$), фазні струми I_{ab}, I_{bc}, I_{ca} відстають по фазі від відповідних фазних напруг V_{AB}, V_{BC}, V_{CA} на кут $\varphi = \arctg(X_\phi/R_\phi)$.

При активно-ємнісному характері навантаження ($\varphi < 0$), фазні струми I_{ab}, I_{bc}, I_{ca} випереджають по фазі відповідні фазні напруги V_{AB}, V_{BC}, V_{CA} на кут $\varphi =$

$\arctg(X_\phi/R_\phi)$.

Умова симетричного навантаження $\underline{Z}_{ab} = \underline{Z}_{bc} = \underline{Z}_{ca} = \underline{Z}_\phi$, а несиметричного $\underline{Z}_{ab} \neq \underline{Z}_{bc} \neq \underline{Z}_{ca}$.

Запишемо рівняння за першим законом Кірхгофа для вузлів a, b, c (рис.3.7):

$$\underline{I}_A + \underline{I}_{ca} - \underline{I}_{ab} = 0, \quad \underline{I}_B + \underline{I}_{ab} - \underline{I}_{bc} = 0, \quad \underline{I}_C + \underline{I}_{bc} - \underline{I}_{ca} = 0,$$

Тоді:

$$\underline{I}_A = \underline{I}_{ab} - \underline{I}_{ca}, \quad \underline{I}_B = \underline{I}_{bc} - \underline{I}_{ab}, \quad \underline{I}_C = \underline{I}_{ca} - \underline{I}_{bc}.$$

Векторна діаграма (рис.3.8) ілюструє співвідношення між фазними та лінійними струмами. З діаграми видно, що лінійні струми відстають від відповідних фазних на 30° .

Співвідношення між діючими значеннями фазних та лінійних струмів наступне: $I_L = \sqrt{3}I_\phi$.

Фазні струми визначають за законом Ома:

$$\underline{I}_{ab} = \underline{V}_{ab}/\underline{Z}_{ab}, \quad \underline{I}_{bc} = \underline{V}_{bc}/\underline{Z}_{bc}, \quad \underline{I}_{ca} = \underline{V}_{ca}/\underline{Z}_{ca}.$$

При симетричному навантаженні: $I_A = I_B = I_C, I_{ab} = I_{bc} = I_{ca}$.

Комплексна повна потужність трифазного кола:

$$\underline{S} = \underline{V}_A \underline{I}_A^* + \underline{V}_B \underline{I}_B^* + \underline{V}_C \underline{I}_C^* = P + jQ.$$

Активна потужність трифазного кола:

$$P = V_A I_A \cos \varphi_A + V_B I_B \cos \varphi_B + V_C I_C \cos \varphi_C = P_A + P_B + P_C.$$

Реактивна потужність трифазного кола:

$$Q = V_A I_A \sin \varphi_A + V_B I_B \sin \varphi_B + V_C I_C \sin \varphi_C = Q_A + Q_B + Q_C.$$

Ці вирази справедливі для будь-якого виду з'єднання.

Вирази для обчислення активної P , реактивної Q та повної S потужності приймача при симетричному навантаженні:

$$P = P_a + P_b + P_c = 3P_\phi = 3V_\phi I_\phi \cos \varphi_\phi = \sqrt{3}V_L I_L \cos \varphi_L,$$

$$Q = Q_a + Q_b + Q_c = 3Q_\phi = 3V_\phi I_\phi \sin \varphi_\phi = \sqrt{3}V_L I_L \sin \varphi_L,$$

$$\cos \varphi_\phi = R_\phi/Z_\phi, \quad \sin \varphi_\phi = X_\phi/Z_\phi.$$

$$S = S_a + S_b + S_c = 3S_\phi = 3V_\phi I_\phi, \quad S = \sqrt{P^2 + Q^2}.$$

Ці вирази справедливі для будь-якого виду з'єднання.

4. Магнітні кола

Магнітним колом називають сукупність джерел магніторушійної сили, феромагнітних та інших елементів, по яких замикається магнітний потік (лінії магнітного поля). Магнітні кола електромагнітних пристроїв складаються з двох основних компонентів: обмотки, струм якої створює магнітне поле *напруженістю* H (А/м) та феромагнітного осердя (немагнітних проміжків), вздовж яких замикається *магнітний потік* Φ (Вб).

Магнітне поле пристроїв з постійною *магніторушійною силою* (м.р.с.) створюють за допомогою постійних магнітів або електромагнітів.

Напрямок ліній магнітного поля, що мають вигляд концентричних кіл,

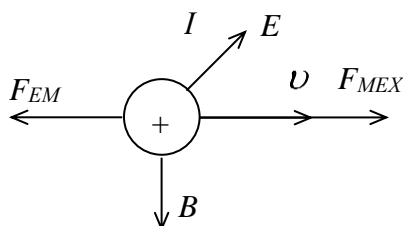


Рис. 6.1

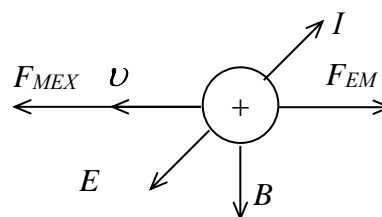


Рис. 6.2

визначають за правилом свердлика.

За законом електромагнітної індукції (індукційна дія поля) у провіднику зі струмом, що рухається у електромагнітному полі, індукується е.р.с. $E = Blv$, де l - довжина провідника; v – його швидкість руху, B - індукція магнітного поля (T). Напрямок цієї е.р.с. визначають за правилом правої руки (рис.6.1).

За законом Ампера (силова дія поля) сила, що діє на провідник зі струмом в магнітному полі змушує його рухатися $F = BlI$, де l - довжина провідника; v – його швидкість руху, I – струм провідника. Напрямок цієї сили визначають за правилом лівої руки (рис.6.2). Індукована в провіднику е.р.с. E протидіє зміні струму I .

Магнітна індукція B характеризує інтенсивність магнітного поля в точці (диференціальна характеристика поля), а магнітний потік Φ – це потік вектора магнітної індукції через певну поверхню S (інтегральна характеристика поля). Якщо лінії магнітного поля (магнітний потік) перпендикулярні поверхні S , то $\Phi = BS$.

Закон повного струму є основним законом магнітних кіл, він встановлює зв'язок між силою струму та магнітним полем, яке створюється цим струмом. Магнітне коло називають однорідним, якщо напруженість магнітного поля (залежить від середовища, в якому виникає магнітне поле, та площі поперечного перерізу магнітопроводу) однакова для всього магнітного кола (по всій довжині магнітопроводу), в іншому випадку коло буде неоднорідним. Крім того магнітні кола можуть бути нерозгалужені та розгалужені.

Прикладом однорідного нерозгалуженого магнітного кола може бути

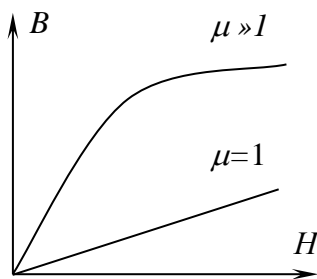


Рис. 6.3

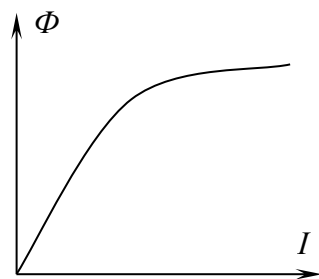


Рис. 6.4

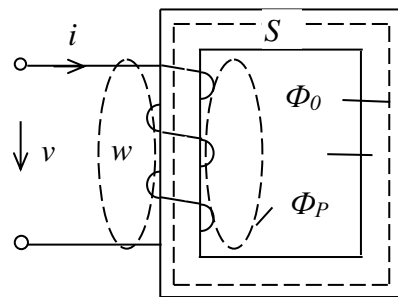


Рис. 6.5

індуктивна котушка з магнітопроводом зображена на рис.6.5, яка складається з феромагнітного осердя (з площею поперечного перерізу S) та обмотки з числом витків w . Прикладена до котушки напруга v зумовлює протікання струму i , який індукує магнітний потік в осерді (осердя в свою чергу завдяки своїм магнітним властивостям) це потік підсилює.

Закон повного струму для однорідного магнітного кола: $Hl = wI$, для неоднорідного (кола з немагнітним, повітряним проміжком): $Hl + H_\delta \delta = wI$, де H напруженість магнітного кола або його частини довжиною l ; H_δ - напруженість магнітного поля повітряного проміжку довжиною δ ; w - число витків обмотки, and $wI = F$ - магніторухійна сила.

Потокозчепленням називають зв'язок (зчеплення) магнітного потоку з замкнутим колом, через яке він замикається:

$$\Psi = LI = w\Phi.$$

Магнітна проникність μ характеризує властивості середовища, в якому поширюється магнітне поле (протікає магнітний потік) і показує наскільки це середовище здатне підсилювати магнітний потік. В залежності від значення магнітної проникності всі матеріали (речовини) поділяють на діамагнетики, парамагнетики та феромагнетики. Для діамагнетиків та парамагнетиків $\mu_r = 1$ (трохи менша 1 для діамагнетиків і трохи більша 1 для парамагнетиків), тому вони не є магнітними матеріалами. *Феромагнетики* мають велику магнітну проникність $\mu_r \gg 1$, тобто здатні підсилювати магнітне поле, тому саме їх використовують у магнітних колах.

Залежність магнітної індукції від напруженості магнітного поля $B(H)$ для діа- та парамагнетиків лінійна (рис.6.3) а для феромагнетиків нелінійна (рис.6.3) і її називають основною кривою намагнічування:

$$B = \mu_0 \mu_r H,$$

де абсолютна магнітна проникність, μ_r - відносна магнітна проникність середовища відносно вакууму, $\mu_0 = 4\pi \cdot 10^{-7} \text{ Гн/м}$ - магнітна проникність вакууму.

Вираз закону Ома для магнітного кола на рис.6.5 отримуємо із закону повного струму $NI = wI$:

$$wI = \Phi l / (\mu_0 \mu_r S),$$

де $R_M = l / (\mu_0 \mu_r S)$ - магнітний опір кола,

На рис.6.4 зображена залежність магнітного потоку ($\Phi \equiv B$) від струму ($I \equiv H$) $\Phi(I)$ - вебер амперна характеристика.

Магнітний потік Φ , що індукується струмом котушки (рис.6.5) є геометричною (векторною) сумою основного магнітного потоку Φ_o , що замикається вздовж осердя та магнітного потоку *розсіювання* Φ_p , що розсіюється в повітрі навколо обмотки (втрати магнітного потоку): $\Phi = \Phi_o + \Phi_p$. Магнітна проникність феромагнетика значно більша ніж магнітна проникність повітря, *тому* $\Phi_o \gg \Phi_p$, у багатьох випадках потоком розсіювання можна знехтувати. Якщо ж при розрахунках необхідно враховувати потік розсіювання, то таке магнітне коло буде неоднорідним.

На рис.6.6 зображені залежності $B(H)$ при циклічному перемагнічуванні феромагнітного осердя (в обмотці протікає змінний струм, магнітний потік також змінюється в часі). Крива 1 – це *основна крива намагнічування*, крива 2 - це *петля гістерезису*, по якій перемагнічується феромагнітне осердя протягом періоду змінного струму (рис.6.6). Крива 3 це також петля гістерезису отримана при іншому значенні намагнічуючого струму. Відставання зміни магнітної індукції від зміни напруженості магнітного поля називають гістерезисом: при $H = 0$ є *залишкова магнітна індукція* B_r , а при $B = 0$ затримуюча або *коерцитивна сила* $H = H_c$.

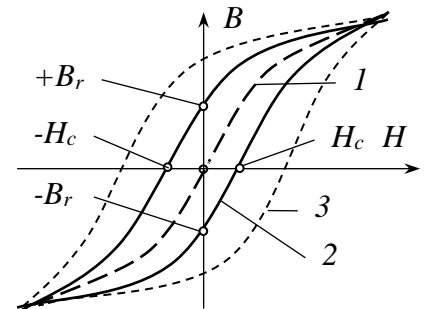


Рис. 6.6

В будь-якому електромагнітному пристрої є втрати (необоротне

перетворення електромагнітної енергії в тепло). Втрати в обмотках називають *електричними*, вони залежать від опору та сили струму: $\Delta P_E = R I^2$.

Втрати в магнітопроводі (осерді) називають *магнітними* ΔP_M - це є втрати внаслідок гістерезису (циклічного перемагнічування осердя) ΔP_Γ та внаслідок вихрових струмів ΔP_B : $\Delta P_M = \Delta P_\Gamma + \Delta P_B$. Втрати від гістерезису пропорційні площі петлі гістерезису і їх визначають за виразом:

$$\Delta P_\Gamma = \gamma_\Gamma \sigma f B_m^2,$$

де γ_Γ - питомі втрати на гістерезис; σ - маса магнітопроводу; f - частота струму намагнічування; B_m - амплітуда магнітної індукції. Для зменшення втрат на гістерезис осердя виготовляють з магнітом'яких феромагнітних матеріалів, що мають вузьку петлю гістерезису.

Вихрові струми (струми Фуко) індукуються і замикаються по поверхні осердя, нагрівають та розмагнічують його. Втрати від вихрових струмів визначають за виразом:

$$\Delta P_B = \gamma_B \sigma f^2 B_m^2,$$

де γ_B - питомі втрати на вихрові струми; σ - маса магнітопроводу; f - частота струму намагнічування; B_m - амплітуда магнітної індукції. Для зменшення втрат на вихрові струми осердя виготовляють шихтованим або феритовими (сталь з домішками кремнію), які мають високу магнітну проникність та великий електричний опір.

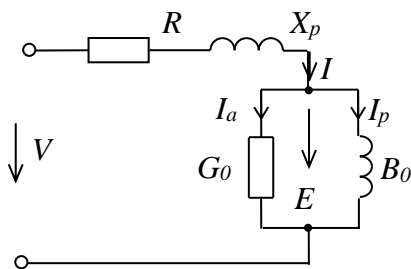


Рис. 6.7

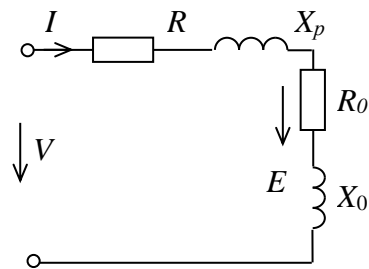


Рис. 6.8

На рис. 6.7 та 6.8 зображені дві еквівалентні *схеми заміщення індуктивної котушки* з осердям, елементи яких відображають всі властивості котушки: R – активний опір обмотки (електричні втрати); реактивний опір розсіювання $X_p = \omega L_p$ зумовлений потоком розсіювання Φ_p ; B_0 - реактивна провідність, X_0 – реактивний опір, зумовлені основним магнітним потоком Φ_0 ; G_0 - активна провідність, R_0 – активний опір магнітопроводу (магнітні втрати).

Для схем на рис.6.7. та 6.8 запишемо рівняння за другим законом Кірхгофа: $\underline{V} = -\underline{E} + R\underline{I} + jX_p\underline{I}$; $\underline{V} = -\underline{E} + R_0\underline{I} + jX_0\underline{I}$.

Миттєве та діюче значення електрорушійної сили, що індукується основним магнітним потоком:

$$e = -w d\Phi / dt, \quad E = \omega w \Phi_m / \sqrt{2} = 4.44 f w \Phi_m .$$

Миттєве та діюче комплексне значення електрорушійної сили, що індукується магнітним потоком розсіювання: $e_p = -L_p di/dt$,

$$\underline{E}_p = -j\omega L_p \underline{I} = -X_p \underline{I}.$$

Якщо магнітопровід має немагнітний (повітряний) проміжок (неоднорідне магнітне коло) закон Ома для нього також впливатиме із закону повного струму $Hl + H_\delta \delta = wI$:

$$wI = \Phi \left(\frac{l}{\mu_0 \mu_r S} + \frac{\delta}{\mu_0 S} \right),$$

магнітний опір кола $R_M = \left(\frac{l}{\mu_0 \mu_r S} + \frac{\delta}{\mu_0 S} \right)$ буде

збільшуватися із збільшенням величини цього

проміжку. Це мало б спричинити зростання магнітного потоку, проте магнітний потік є незмінним, бо залежить від величини прикладеної напруги. Тому згідно із законом Ома зростатиме струм живлення. Залежності струму I та індуктивності L осердя від величини немагнітного проміжку δ показано на рис.6.9. Тому котушки зі змінним немагнітним проміжком (дроселі) застосовують для регулювання струму.

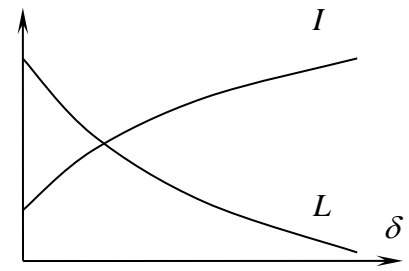


Рис. 6.9

5. Трансформатори

Трансформатор – це електромагнітний пристрій з двома чи більше обмоткам, які з'єднані індуктивно і призначений на перетворення параметрів



Рис.7.1

(напруги, струму) в колі змінного струму. На рис.7.1 наведено умовні позначення *однофазного* (а) та *трифазного* (б) трансформаторів.

Однофазний трансформатор (рис.7.3) конструктивно складається з феромагнітного осердя та двох обмоток (первинної та вторинної). Різні види осердь зображено на рис.7.2.

Принцип дії трансформатора ґрунтується на законі електромагнітної індукції, первинна та вторинна обмотки зв'язані магнітним зв'язком. Змінний струм *первинної обмотки* i_1 індукуює змінний магнітний потік Φ_1 (електрична енергія перетворюється в магнітну), основна частина якого замикається вздовж осердя Φ_{1o} , а невелика частина (потік розсіювання) Φ_{1p} , замикається в повітрі навколо первинної обмотки w_1 (рис.7.3). Магнітний потік Φ_1 індукуює також е.р.с. самоіндукції e_1 в первинній обмотці та е.р.с. взаємоіндукції e_2 у *вторинній обмотці* w_2 . Якщо до вторинної обмотки підключити навантаження, то по ній протікатиме струм i_2 (магнітна енергія перетворюється в електричну), що в свою чергу індукуює змінний магнітний потік Φ_2 , основна частина якого замикається вздовж осердя Φ_{2o} , а невелика частина (потік розсіювання) Φ_{2p} , замикається в

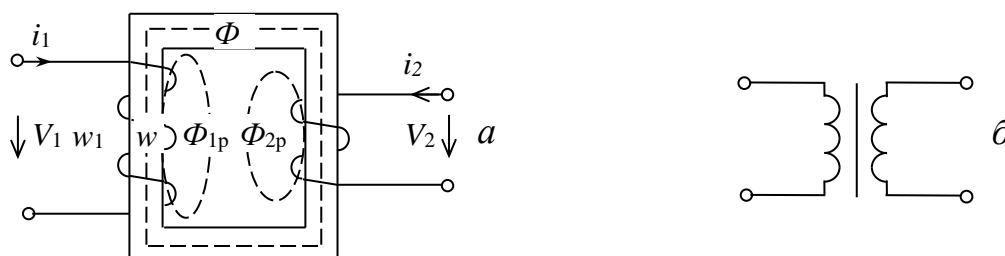


Рис.7.3

повітрі навколо вторинної обмотки w_2 .

Результуючий (основний) магнітний потік осердя Φ дорівнює сумі потоків Φ_{1o} та Φ_{2o} .

Вирази миттєвих значень е.р.с.:

$$e_1 = -w_1 d\Phi / dt, \quad e_2 = -w_2 d\Phi / dt,$$

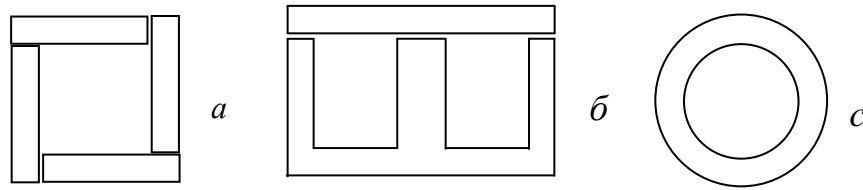


Рис.7.2

Індуковані е.р.с. відстають від магнітного потоку на кут $\pi/2$.

Вирази діючих значень е.р.с.:

$$E_1 = \omega w_1 \Phi_m / \sqrt{2}, \quad E_2 = \omega w_2 \Phi_m / \sqrt{2},$$

де f – частота змінного струму, Φ_m – амплітуда основного магнітного потоку, w_1 – кількість витків первинної обмотки, w_2 – кількість витків вторинної обмотки.

Враховуючи, що $\omega / \sqrt{2} = 2\pi f / \sqrt{2} = 4.44 f$, матимемо:

$$E_1 = 4.44 w_1 f \Phi_m, \quad E_2 = 4.44 w_2 f \Phi_m$$

Отже, значення е.р.с. обмотки пропорційне кількості витків. Якщо $w_1 > w_2$ трансформатор понижувальний, якщо $w_1 < w_2$ – трансформатор підвищувальний. Основним параметром трансформатора є його коефіцієнт трансформації: $k_{12} = w_1 / w_2 = E_1 / E_2 > 1$ (для понижувального трансформатора) та $k_{21} = w_2 / w_1 = E_2 / E_1 > 1$ (для підвищувального трансформатора).

Електромагнітна схема заміщення трансформатора зображена на рис.7.4, в якій R_1 та R_2 – активні опори обмоток, X_1, X_2 – реактивні опори обмоток, зумовлені потоками розсіювання.

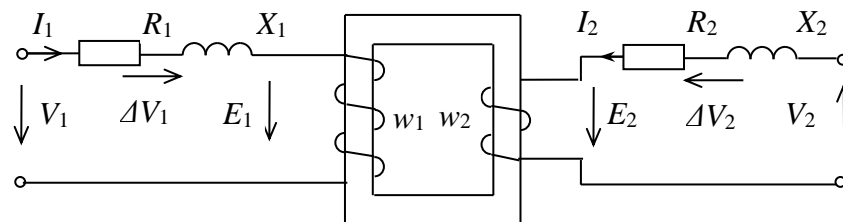


Рис.7.4

Рівняння електричного стану первинної та вторинної обмоток (за другим законом Кірхгофа) згідно схеми на рис.7.5:

$$\underline{V}_1 = -\underline{E}_1 + (R_1 + jX_1)\underline{I}_1 = -\underline{E}_1 + \underline{\Delta V}_1$$

$$\underline{V}_2 = \underline{E}_2 - (R_2 + jX_2)\underline{I}_2 = \underline{E}_2 - \underline{\Delta V}_2,$$

де $\underline{\Delta V}_1, \underline{\Delta V}_2$ – спади напруг у первинній та вторинній обмотках, зумовлені втратами в обмотках. Оскільки $\underline{\Delta V}_1 \approx (0,02 \div 0,05)\underline{V}_1$, то можна вважати, що $V_1 \approx E_1$.

Отже, $V_1 \approx E_1 = 4.44 w_1 f_1 \Phi_m$. Якщо напруга первинної обмотки незмінна $V_1 = const$, то магнітний потік практично не залежить від навантаження.

Вираз закону повного стуму в режимі холостого ходу:

$$w_1 I_{10} = Hl,$$

де I_{10} – струм холостого ходу первинної обмотки. Цей струм індукує магнітний потік $\Phi = \mu SH$. Такий же магнітний потік індукується струмами первинної та вторинної обмоток навантаженого трансформатора:

$$w_1 I_1 + w_2 I_2 = Hl.$$

Оскільки $\Phi \approx const$ та $H \approx const$, запишемо:

$$w_1 I_{10} = w_1 I_1 + w_2 I_2.$$

Звідки струм первинної обмотки:

$$\underline{I}_1 = \underline{I}_{10} - \underline{I}_2 w_2 / w_1 = \underline{I}_1 = \underline{I}_{10} + \underline{I}'_2,$$

де $\underline{I}'_2 = -\underline{I}_2 w_2 / w_1 = -\underline{I}_2 / k I'_2$ - *приведений* (до числа витків первинної обмотки) *струм* вторинної обмотки.

Оскільки $w_1 \neq w_2$, то $E_1 \neq E_2$. Для спрощення розрахунку трансформатора вторинну обмотку (кількість витків) трансформатора приводять до первинної

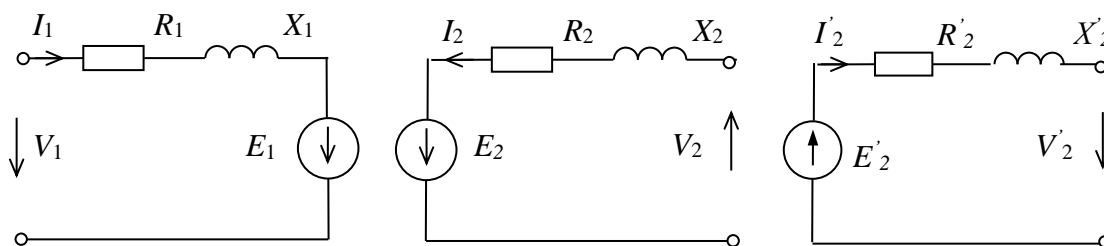


Fig.7.5

Fig.7.6

обмотки (кількості витків) $w'_2 = w_1$.

Реальну кількість витків w_2 заміняють приведеною $w'_2 = kw_2 = w_1$. *Приведена е.р.с.* вторинної обмотки: $E'_2 = kE_2 = E_1$, *приведена напруга* вторинної обмотки: $V'_2 = kV_2 = V_1$. Вираз *приведеного активного опору* вторинної обмотки випливає з рівняння рівності потужностей $I_2'^2 R'_2 = R_2 I_2^2$: $R'_2 = k^2 R_2$. Вираз *приведеного реактивного опору* вторинної обмотки випливає з рівності кута зсуву фаз $\varphi = \arctg(X'_2 / R'_2) = \arctg(X_2 / R_2)$: $X'_2 = k^2 X_2$. Приведена схема вторинної обмотки зображена на рис.7.6.

Оскільки $E'_2 = kE_2 = E_1$, то зі схеми на рис.7.5 отримуємо *T-подібну схему заміщення трансформатора* (рис.7.7), де $\underline{E}_1 = R_0 \underline{I}_{10} + jX_0 \underline{I}_{10}$. На цій схемі активний опір R_0 характеризує магнітні втрати в осерді ΔP_M та реактивний опір X_0 характеризує основний магнітний потік.

Режиму холостого ходу ($I'_2 = 0$) відповідає схема заміщення на рис.7.8,

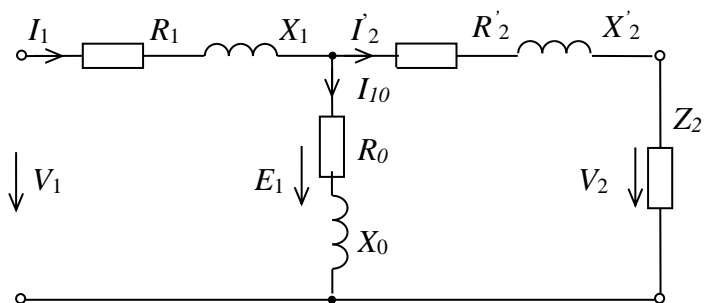


Рис.7.7

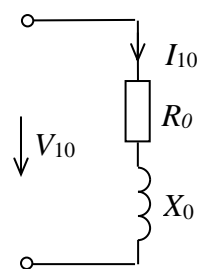


Рис.7.8

яку отримуємо з схеми на рис.7.7 нехтуючи опорами R_1 та X_1 , оскільки при холостому ході вони набагато менші як R_0 та X_0 . Величина струму холостого ходу залежить від якості осердя. Активний опір R_0 характеризує втрати в режимі холостого ходу: $P_0 = R_0 I_{10}^2$.

Коефіцієнт трансформації нехтуючи втратами в обмотках запишемо так:

$$k = w_1/w_2 = E_1/E_2 \approx V_1/V_{20}.$$

де V_{20} - напруга холостого ходу вторинної обмотки.

Отже, можемо записати:

$$V_{10} \cong E_1 = 4.44 w_1 f_1 \Phi_m, \Phi_m = B_m S.$$

Магнітні втрати є постійні і не залежать від навантаження. Втрати в режимі холостого ходу P_0 включають магнітні втрати в осерді ΔP_M та електричні втрати в первинній обмотці ΔP_{1E} : $P_0 = \Delta P_M + \Delta P_{1E}$, $\Delta P_{1E} = R_1 I_{10}^2$ (I_{10} - струм холостого ходу). Струм холостого ходу значно менший за номінальний $I_{1\text{НОМ}} \gg I_{10}$ ($I_{10} = (0.04 \div 0.1) I_{1\text{НОМ}}$), тому $\Delta P_{1E} \ll \Delta P_M$, електричними втратами при холостому ході можна знехтувати. Отже, потужність, яку споживає трансформатор при холостому ході витрачається на магнітні втрати: $P_0 \approx \Delta P_M$. Повний опір при цьому визначають за законом Ома: $Z_0 = U_{10} / I_{10}$.

При короткому замиканні вторинної обмотки трансформатора та номінальній напрузі живлення $V_{1\text{НОМ}}$ Струм обмотки буде набагато більший від номінального $I_{1\text{КЗ}} \approx (10 \div 25) I_{1\text{НОМ}}$, це є аварійний режим. Тому дослідження

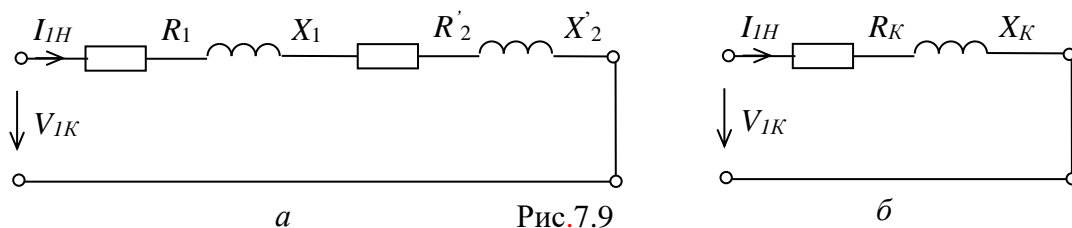


Рис.7.9

короткого замикання трансформатора можна проводити лише при пониженій напрузі $V_{1\text{КЗ}} = (0.05 \div 0.1) V_{1\text{НОМ}}$ та номінальному струмі $I_{1\text{КЗ}} = I_{1\text{НОМ}}$.

Схема заміщення трансформатора при короткому замиканні ($V_2' = 0$) показана на рис.7.9. Цю схему отримуємо зі схеми рис.7.7 нехтуючи опорами R_0 , X_0 , які набагато менші, ніж R_2' , X_2' та R_1' , X_1' . Для схеми на рис.7.9б: $R_1 + R_2' = R_{\text{КЗ}}$, $X_1 + X_2' = X_{\text{КЗ}}$.

Втрати при короткому замиканні включають електричні втрати в обмотках ΔP_E та магнітні втрати ΔP_M в осерді. Оскільки напруга первинної обмотки при короткому замиканні понижена $V_{1\text{КЗ}} = (0.05 \div 0.1) V_{1\text{НОМ}}$, то магнітний протік, що залежить від величини цієї напруги, буде суттєво менший, ніж в номінальному режимі. Магнітні втрати, що залежать від величини магнітного потоку, також будуть суттєво менші $\Delta P_M \ll \Delta P_E$, тому ними можна знехтувати. Отже, потужність, яку споживає трансформатор при короткому замиканні витрачається на електричні втрати в обмотках: $P_{\text{КЗ}} \approx \Delta P_E$. Ці втрати є змінні оскільки залежать від струму (навантаження трансформатора) $P_{\text{КЗ}} = R_{\text{КЗ}} I_{1\text{НОМ}}^2$. Повний опір при цьому визначають за законом Ома: $Z_{\text{КЗ}} = V_{1\text{КЗ}} / I_{1\text{НОМ}}$.

Отже, досліджуючи трансформатор при холостому ході та короткому замиканні, можемо визначити магнітні та електричні втрати, а також розрахувати параметри схем заміщення трансформатора (рис.7.8 та 7.9б).

Зовнішньою характеристикою трансформатора називають залежність напруги від струму на виході трансформатора при різному характері навантаження (рис.7.10: крива 1 при активному навантаженні $\cos\varphi_2=1$ ($\varphi_2=0$), крива 2 – при активно-індуктивному $\cos\varphi_2 < 1$ ($\varphi_2 > 0$), крива 3 – при активно-ємнісному $\cos\varphi_2 < 1$ ($\varphi_2 < 0$)).

Енергетична діаграма трансформатора зображена на рис.7.11, де $P_1 = V_1 I_1 \cos\varphi_1$ - вхідна активна потужність, ΔP_{E1} - електричні втрати в первинній обмотці; P_{EM} - електромагнітна потужність, що передається від первинної до вторинної обмотки; ΔP_M - магнітні втрати в осерді; ΔP_{E2} - електричні втрати у вторинній обмотці; $P_2 = V_2 I_2 \cos\varphi_2$ - вихідна активна потужність.

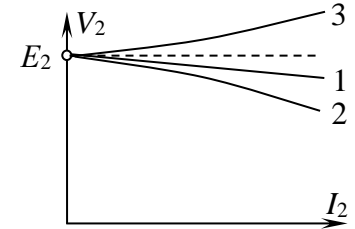


Рис.7.10

Повні потужності на вході та виході трансформатора рівні: $S_1 = S_2 = V_1 I_1 = V_2 I_2$, тому $V_1/V_2 = I_2/I_1 \approx k$.

Коефіцієнт корисної дії трансформатора визначають за формулою:

$$\eta = \frac{P_2}{P_1} = \frac{P_2}{P_2 + \Delta P} = \frac{\beta S_{2ном} \cos\varphi_2}{\beta S_{2ном} \cos\varphi_2 + P_0 + \beta^2 P_{кз}}$$

де $\Delta P = P_0 + \beta^2 P_{кз}$ - загальні втрати в трансформаторі; P_0 - споживана потужність при холостому ході (магнітні втрати); $P_{кз}$ - споживана потужність при короткому замиканні; $\beta = I_2/I_{2ном}$ - коефіцієнт навантаження, показує наскільки струм навантаження відрізняється від номінального. Електричні втрати залежать від навантаження (струму), тому: $\Delta P_E = \beta^2 P_{кз}$. Повна потужність також залежить від струму, тому: $S_2 = \beta S_{2ном}$.

Залежність к.к.д. від навантаження трансформатора $\eta(\beta)$ зображена на рис.7.12. Максимальний к.к.д. буде, коли електричні та магнітні втрати рівні.

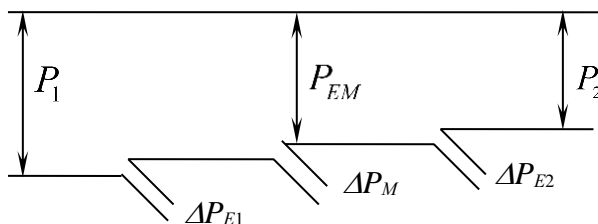


Рис. 7.11

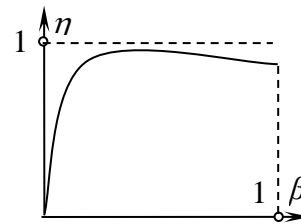


Рис. 7.12

6. Машини постійного струму

Машина постійного струму є оборотною, тобто може працювати як двигун та як генератор.

Будова машини постійного струму зображена на рис.8.1. Нерухому

частину машини називають статором, рухому - ротором.

Статор складається зі сталюого осердя (8), по якому замикається основний магнітний потік, та основних (6), на які намотана обмотка. Статор виконує функцію індуктора, оскільки струм обмотки статора створює (індукує) основне магнітне поле машини. Тому обмотку статора називають ще *обмоткою збудження* (7).

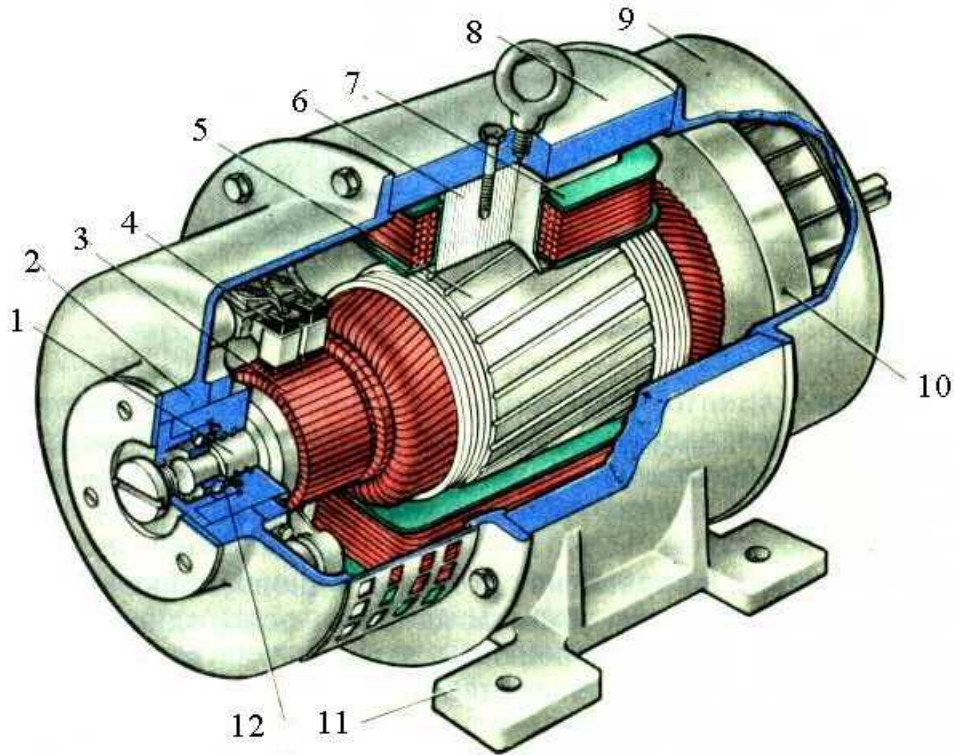


Рис.8.1. Будова машини постійного струму:

1– вал; 2– передній щиток; 3– колектор; 4– щітки; 5– ярмір; 6– осердя; 7– обмотка статора; 8– корпус; 9– задній щиток; 10– вентилятор; 11– лапи; 12– підшипники.

Ротор виконує функцію ярміра, оскільки до нього підключають навантаження (електричне у генераторі та механічне у двигуні). Він складається з ламінованого осердя (5) з обмоткою (*обмотка ярміра*). На валу машини також розміщено *щітково-колекторний вузол* (3). Обмотка ярміра складається з окремих секцій, які розміщені в пазах ярміра і під'єднані до пластин колектора, вона буває петлева (рис.8.2а) або хвильова (рис.8.2б). Кількість секцій рівна кількості колекторних пластин.

Щітково-колекторний вузол виконує функцію механічного перетворювача змінного струму у постійний в двигуні та постійного в змінний в генераторі.

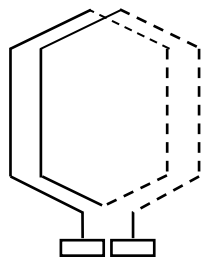


Рис.8.2а

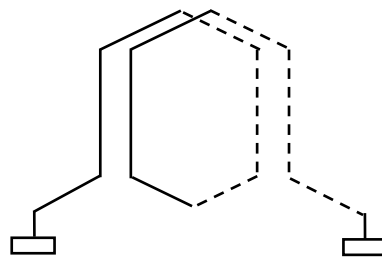


Рис.8.2б

Колектор складається з мідних пластин (ламель) (3), що розміщені вздовж його

поверхні, до них прилягають щітки (4), що забезпечують ковзаючий контакт.

Принцип дії генератора: струм обмотки збудження створює постійне в часі та нерухоме в просторі магнітне поле, яке в свою чергу індукує е.р.с. та змінний струм в рухомій обмотці якоря (індукційна дія поля), напрям цієї е.р.с. визначають за правилом правої руки. Змінний струм якоря перетворюється на однополярний (постійний) за допомогою щітково-колекторного вузла.

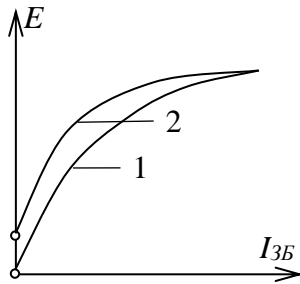


Рис.8.3

Характеристика холостого ходу генератора – залежність е.р.с. якоря від струму збудження $E(I_{зБ})$ при відсутності навантаження ($I_{я}=0$) та сталій частоті обертання ротора ($n=const$) зображена на рис.8.3. Крива 1 цієї характеристики показує, що при збільшенні струму збудження нелінійно зростає е.р.с., далі при зменшенні струму збудження е.р.с. також буде зменшуватися, але по кривій 2, що зумовлено залишковою намагніченістю магнітопроводу.

Зовнішню характеристику – залежність напруги на виході від струму якоря $V(I_{я})$ при сталому струмі збудження ($I_{зБ}=const$) та частоті обертання ротора ($n=const$), зображено на рис.8.4. Крива 1 – це зовнішня характеристика генератора незалежного збудження, крива 2 – генератора

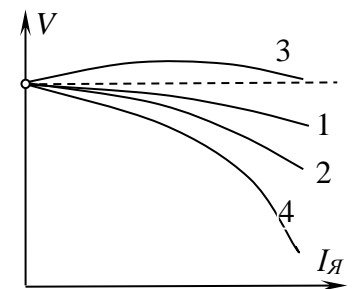


Рис.8.4

паралельного збудження, крива 3 – генератора послідовного збудження та крива 4 – генератора змішаного збудження.

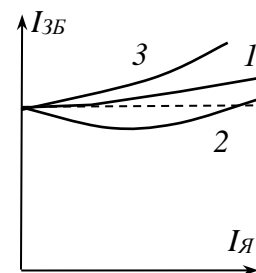


Рис.8.5

Регульовальну характеристику – залежність струму збудження від струму якоря $I_{зБ}(I_{я})$ при сталій напрузі на виході генератора ($V=const$) та сталій частоті обертання ротора ($n=const$), зображено на рис.8.5. Крива 1 – це зовнішня характеристика генератора незалежного та паралельного збудження, крива 2 – генератора змішаного узгодженого збудження, крива 3 – генератора змішаного неузгодженого збудження.

збудження.

Рівняння електричного стану кола якоря генератора (за другим законом Кірхгофа):

$$V = E_{я} - R_{я}I_{я},$$

де V - вихідна напруга генератора, $R_{я}$ – опір обмотки якоря. Струм на виході генератора: $I = I_{зБ} - I_{я}$, де $I_{я}$ – струм якоря, $I_{зБ}$ – струм збудження.

Принцип дії двигуна постійного струму ґрунтується на силевій дії електромагнітного поля (силі Ампера). Двигун живиться постійним струмом, який перетворюється на змінний за допомогою щітково-колекторного вузла. Основне магнітне поле створене струмом обмотки збудження діє з певною силою на провідники зі змінним струмом в пазах обмотки якоря (ротора), внаслідок чого ротор обертається.

Механічний момент на валу двигуна:

$$M = c_M \Phi I_A,$$

де c_M - коефіцієнт, що залежить конструкції двигуна та числа пар полюсів; Φ – основний магнітний потік двигуна; I_A - струм якоря. Для генератора цей момент буде гальмівним.

Індукована в обмотці якоря е.р.с.:

$$E_A = c_E \Phi n,$$

де c_E - коефіцієнт, що залежить конструкції двигуна, Φ – основний магнітний потік двигуна, n – частота обертання ротора.

Реакцією якоря називають вплив магнітного поля, створеного струмом якоря (рис.8.6б) на основне магнітне поле машини постійного струму (рис.8.6а). В результаті реакції якоря основне магнітне поле машини скошується (рис.8.6с), оскільки фізична нейтраль $q'-q'$ (рис. 8.6с) (пряма перпендикулярна силовим лініям магнітного поля) зміщується на певний кут α проти напрямку обертання ротора відносно геометричної нейтралі $q-q$ (рис.8.6а). Це приводить до зменшення е.р.с. якоря та погіршення комутації (між колектором та щітками виникає іскріння).

Для зменшення впливу реакції якоря між основними полюсами машини

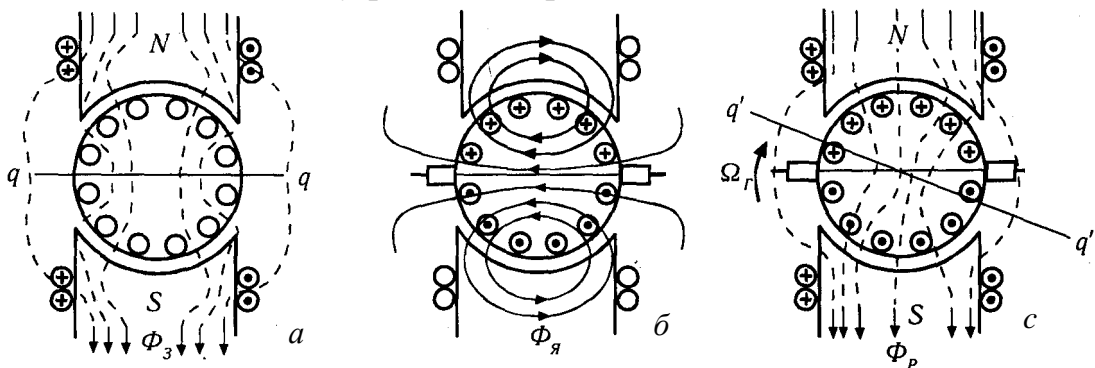


Рис 8.6

розміщують додаткові, струм обмотки яких створює магнітний потік, що скомпенсує (протилежний) магнітному потоку створеному струмом якоря, або ж намотують на основні полюси додаткову компенсаційну обмотку, струм якої так само створює магнітний потік, що скомпенсує реакцію якоря. З цією ж метою щітки розміщують не вертикально (по геометричній нейтралі $q-q$), а під кутом α (по фізичній нейтралі $q'-q'$). Величина кута зсуву фізичної нейтралі α залежить від величини навантаження.

Способи збудження машин постійного струму: незалежне збудження та

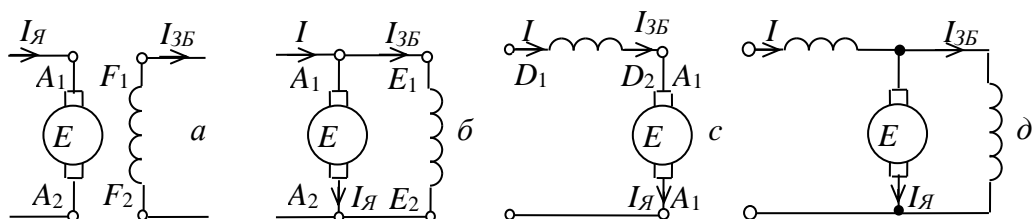


Рис.8.7

самозбудження (паралельне, послідовне та змішане). В машинах незалежного збудження (рис.8.7а) обмотка збудження та обмотка якоря живляться від двох різних джерел. При паралельному збудженні (рис.8.7б) обмотку збудження підключають паралельно обмотці якоря і живляться вони від одного джерела. При послідовному збудженні (рис.8.7с) обмотку збудження підключають

послідовно до обмотки якоря і живляться вони від одного джерела. (рис.8.7с) При змішаному збудженні (рис.8.7д) є дві обмотки збудження, які підключають послідовно та паралельно до обмотки якоря.

Рівняння електричного стану кола якоря двигуна (за другим законом Кірхгофа):

$$V = E_{\text{я}} + R_{\text{я}}I_{\text{я}},$$

де V - напруга живлення двигуна, $R_{\text{я}}$ – опір обмотки якоря. Струм живлення двигуна: $I = I_{\text{зб}} + I_{\text{я}}$, де $I_{\text{я}}$ – струм якоря, $I_{\text{зб}}$ – струм збудження. Отже, користуючись рівнянням електричного стану та виразом для е.р.с. якоря $E_{\text{я}} = c_E \Phi n$ запишемо вираз струму якоря:

$$I_{\text{я}} = (V - E_{\text{я}})/R_{\text{я}} = (V - c_E n \Phi)/R_{\text{я}}.$$

де V – напруга живлення, $R_{\text{я}}$ – опір обмотки якоря, $I_{\text{я}}$ – струм якоря.

При пуску двигуна частота обертання $n = 0$, тому $E_{\text{я}}=0$. Оскільки опір обмотки якоря невеликий, то пусковий струм $I_{\text{п}} = V/R_{\text{я}}$ може в кілька разів перевищувати номінальний.

Для обмеження пускового струму в коло якоря послідовно підключають пусковий реостат, опір якого $R_{\text{п}}$ поступово збільшують від максимального значення до нуля. Вираз для пускового струму якоря з пусковим реостатом: $I_{\text{п}} = V/(R_{\text{я}} + R_{\text{п}})$.

Опір пускового реостата вибирають з умови: $I_{\text{п}} \leq (2.0...2.5)I_{\text{яном}}$ (пусковий струм якоря для кола з пусковим реостатом не повинен перевищувати номінального струму більш ніж в 2-2.5 рази) .

Зменшити пусковий струм також можна шляхом зниження напруги живлення при пуску.

Підставивши $E_{\text{я}} = V - R_{\text{я}}I_{\text{я}}$ у вираз для е.р.с. якоря $E_{\text{я}} = c_E \Phi n$, отримаємо вираз швидкісної характеристики двигуна:

$$n = (V - R_{\text{я}}I_{\text{я}})/c_E \Phi_{\text{я}}.$$

З цього рівняння випливає, що у режимі холостого ходу частота обертання ротора:

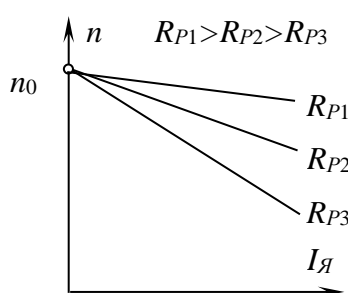


Рис. 8.8

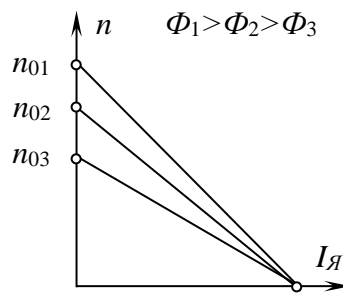


Рис.8.9

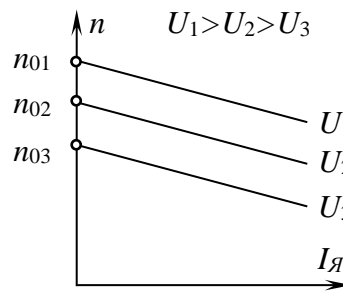


Рис.8.10

$$n = n_0 = V/(c_E \Phi),$$

де n_0 – частота обертання ротора при холостому ході.

Проаналізувати способи регулювання частоти обертання двигуна можна скориставшись виразом частотної характеристики двигуна:

а) шляхом зміни струму якоря, підключивши послідовно в коло якоря регульовальний реостат $R_{\text{р}}$. Частотні характеристики при різних значеннях опору регульовального реостата $R_{\text{р}}$ зображені на рис.8.8. Перевагами цього методу

регулювання є простота та широкий діапазон регулювання частоти ($0 \leq n \leq n_{\text{ном}}$), недоліками є втрати в обмотці якоря та неможливість отримати частоту більшу за номінальну.

б) шляхом зміни основного магнітного потоку (струму збудження), підключивши послідовно в обмотку збудження регулювальний R_p . Частотні характеристики при різних значеннях магнітного потоку зображені на рис.8.9. Перевагами цього методу регулювання є простота та ефективність (малі втрати), недоліками є неможливість отримати частоту більшу за номінальну та порівняно вузький діапазон регулювання частоти ($0 \leq n \leq n_{\text{ном}}$).

в) шляхом зміни напруги живлення. Частотні характеристики при різних значеннях напруги живлення зображені на рис.8.10. Перевагами цього методу регулювання є широкий діапазон регулювання частоти ($0 \leq n \leq n_{\text{ном}}$), недоліком є необхідність додаткового регульованого джерела живлення.

Основною характеристикою двигуна є його *механічна характеристика* $n(M)$ - залежність частоти обертання від моменту на валу двигуна при сталих напрузі живлення $V = \text{const}$ та струмі збудження $I_{зБ} = \text{const}$. Вираз механічної характеристики отримаємо з частотної характеристики $n = (V - R_{я}I_{я})/c_E\Phi = V/c_E\Phi - R_{я}I_{я}/c_E\Phi$.

З виразу для моменту двигуна $M = c_M\Phi I_{я}$ визначимо струм якоря $I_{я} = M/(c_M)$ і підставимо його у вираз частотної характеристики, отримаємо:

$$n = V/c_E\Phi - R_{я}M/(c_Mc_E\Phi^2) = n_0 - \Delta n,$$

де - n_0 частота обертання холостого ходу, Δn - зміна частоти обертання, зумовлена зміною навантаження двигуна. Механічну характеристику двигуна без реостата в колі якоря називають природньою, а з реостатом – штучною. Особливістю двигунів постійного струму є те, що їх механічна характеристика залежить від типу збудження. Для двигунів з незалежним та паралельним збудженням механічна характеристика буде жорсткою (рис.8.11), частота

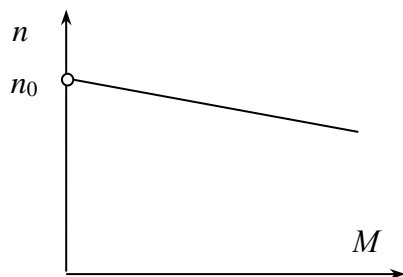


Рис.8.11

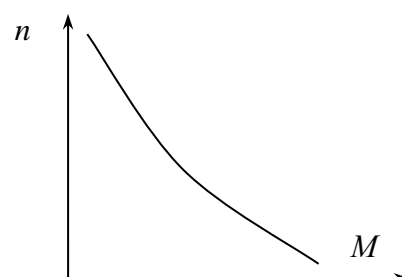


Рис.8.12

обертання мало залежить від моменту (навантаження двигуна). Для двигунів з послідовним та змішаним збудженням характеристика буде м'якою (рис.8.12), частота обертання дуже залежить від моменту (навантаження двигуна). Різні види характеристик зумовлюють різні сфери застосування відповідних двигунів. З механічної характеристики (рис.8.12) випливає, що двигуни з послідовним та змішаним збудженням не можуть працювати без навантаження, що може просто зруйнувати двигун.

Енергетична діаграма двигуна постійного струму зображена на рис.8.13. Вхідна електрична потужність двигуна $P_1 = VI$. Електромагнітна потужність (передається від статора до ротора через немагнітний проміжок) $P_{EM} = E_{я}I_{я}$.

Механічна потужність на виході двигуна $P_2 = \Omega \cdot M$. Загальні втрати в двигуні:

$$\Delta P = \Delta P_{\text{я}} + \Delta P_{\text{зб}} + \Delta P_{\text{М}} + \Delta P_{\text{мех}} + \Delta P_{\text{дод}},$$

де $\Delta P_{\text{зб}} = R_{\text{зб}} I_{\text{зб}}^2$ - втрати в обмотці збудження; $\Delta P_{\text{я}} = R_{\text{я}} I_{\text{я}}^2$ - втрати в обмотці якоря; $\Delta P_{\text{М}}$ - магнітні втрати; $\Delta P_{\text{мех}}$ - механічні втрати; $\Delta P_{\text{дод}}$ - втрати в колекторно-щітковому вузлі.

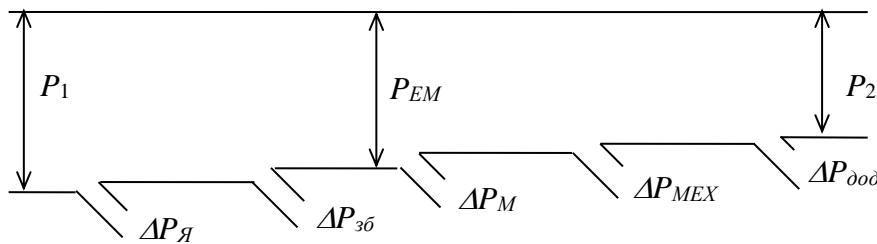


Рис.8.13

Коефіцієнт корисної дії двигуна: $\eta = P_2/P_1 = P_2/(P_2 + \Delta P)$.

Властивості двигуна як елемента електричного кола описують робочі характеристики $I_{\text{я}}(P_2)$, $\eta(P_2)$ - залежність електричних параметрів від потужності на валу (навантаження двигуна) (рис.8.14). Властивості двигуна як елемента електроприводу описують робочі характеристики $n(P_2)$, $M(P_2)$ - залежність механічних параметрів від потужності на валу (навантаження двигуна) (рис.8.15).

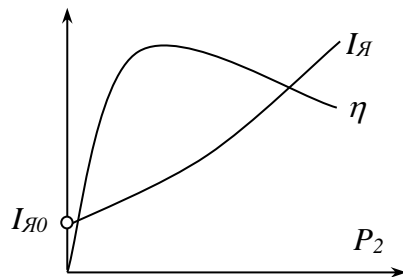


Рис.8.14

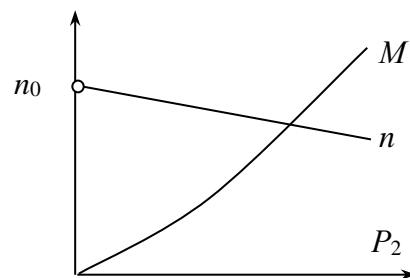


Рис.8.15

7. Асинхронні двигуни.

Асинхронні машини є машинами змінного струму і їх застосовують переважно в якості двигунів, оскільки характеристики генераторів є гіршими порівняно з синхронними генераторами. Найбільш популярними є трифазні асинхронні двигуни, оскільки вони мають найкращі робочі характеристики. Перевагами цих двигунів також є простота конструкції, експлуатації, надійність та менша вартість порівняно з іншими типами двигунів. Недоліками є значна споживана реактивна потужність (невисокий коефіцієнт потужності), висок чутливість до зміни напруги живлення (момент на валу двигуна пропорційний квадрату напруги живлення).

Двигун складається з статора (осердя (10), в пазах якого вкладена трифазна обмотка) та ротора, який також складається з осердя (9) та обмотки (рис.9.1). Ротор може бути короткозамкнутим (рис.9.2а) або фазним (рис.9.2б).

Елементами конструкції двигуна з короткозамкнутим ротором (осердя та короткозамкнута обмотка) також є (рис.9.1): лапи для кріплення (12), рамка (11), корпус (8), підшипники (2,6), підшипникові щити (3,7), вал (1), клемна коробка (4), вентилятор (5).

Трифазна обмотка статора вкладається в пазах під просторовим кутом 120° , струм цієї обмотки створює змінне в часі та обертове у просторі магнітне

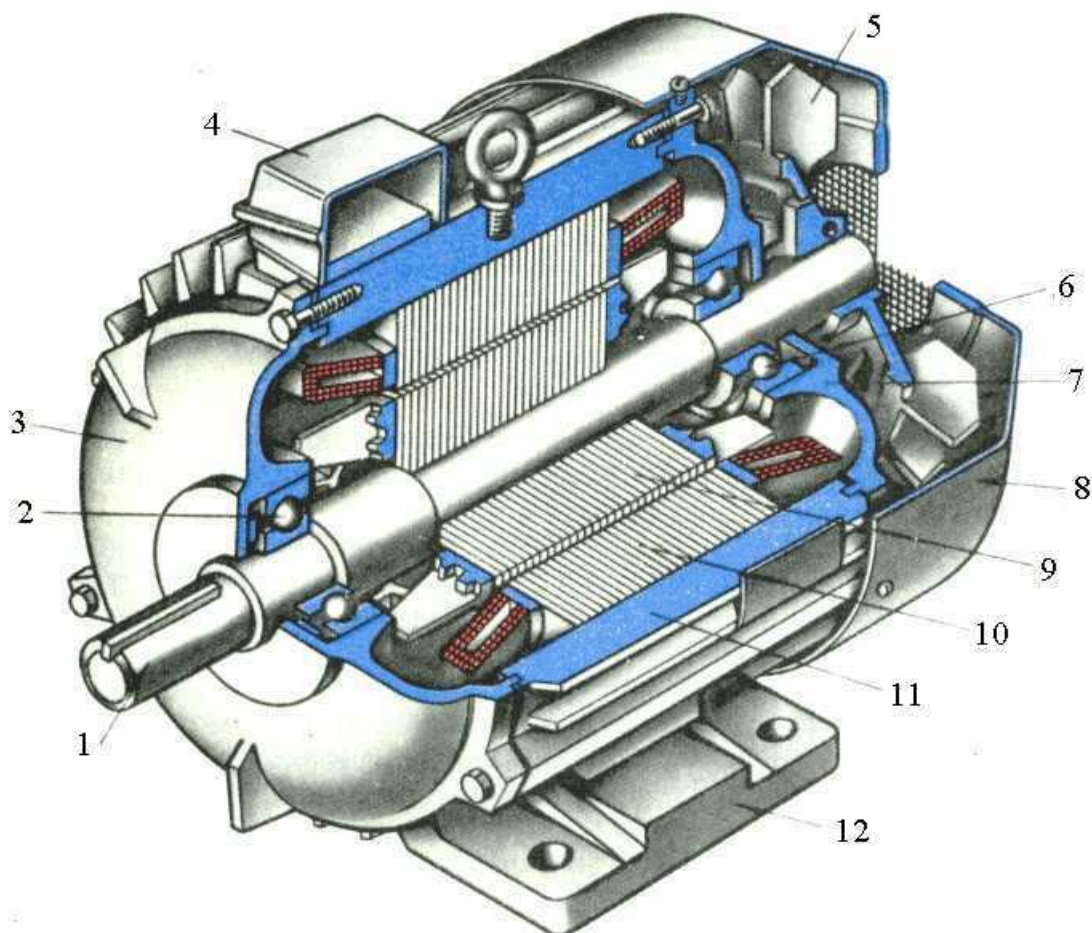


Рис.9.1

поле. Трифазна обмотка статора може бути з'єднана «трикутником» або «зіркою». Основне обертове магнітне поле двигуна обертається з частотою $n_1 = 60f/p$, де f - частота струму, p - число пар полюсів двигуна. Статор двигуна з фазним ротором має таку ж конструкцію як короткозамкнутий, лише його ротор має будову подібну до статора (осердя, в пазах якого вкладається трифазна обмотка). Кінці обмотки ротора через контактні кільця та щітки можуть під'єднуватися до реостатів для покращення пускових властивостей двигуна (підвищення пускового моменту) чи регулювання частоти обертання двигуна.

Принцип дії двигуна ґрунтується на індукційній та силовій дії електромагнітного поля. Обертове магнітне поле, створене трифазним струмом обмотки статора індукуює в обмотці ротора електрорушійну силу та струм (індукційна дія). Це ж поле діє з певною силою на провідники зі струмом обмотки ротора (силова дія), внаслідок чого ротор обертається за напрямом поля. Напрямок обертання поля (ротора) визначається порядком чергування фаз трифазної обмотки статора.

Особливістю асинхронного двигуна є те, що частота обертання ротора n_2 завжди менша від частоти обертання поля n_1 , тому двигун називають

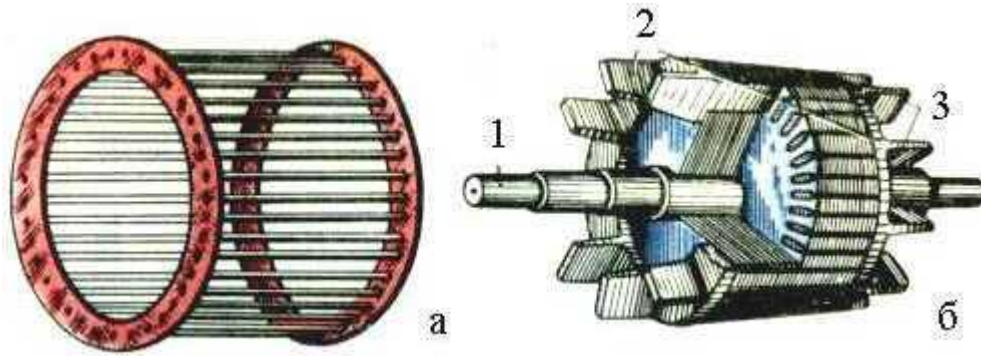


Рис.9.2

асинхронним.

Степінь цього відставання характеризує ковзання s :

$$s = (n_1 - n_2)/n_1.$$

Звідки частота обертання ротора залежить від ковзання, цю залежність називають частотною характеристикою двигуна: $n_2 = n_1(1 - s)$.

Підставивши в цю формулу вираз для частоти n_1 , матимемо:

$$n_2 = n_1(1 - s) = 60f_1(1 - s)/p.$$

З цього виразу видно, що змінювати частоту обертання двигуна можна трьома способами: шляхом зміни частоти струму мережі f за допомогою спеціальних перетворювачів частоти; шляхом зміни ковзання s за допомогою регулювальних реостатів у колі ротора (для двигунів з фазним ротором); шляхом зміни числа пар полюсів двигуна p .

Обертове магнітне поле індукуює в кожній фазі статора та ротора відповідні е.р.с: $E_1 = \omega_1 w_1 \Phi$ та $E_2 = \omega_2 w_2 \Phi$ (у випадку короткозамкнутого ротора). Частота обертання поля статора при цьому: $\omega_1 = 2\pi n_1/60$, (f_1), а ротора: $\omega_2 = s2\pi n_1/60 = s\omega_1$, ($f_2 = sf_1$).

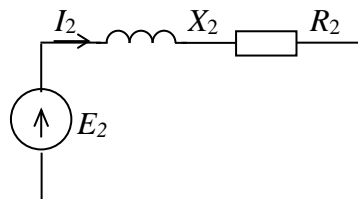


Рис.9.3

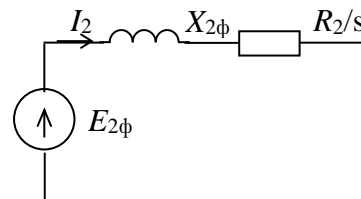


Fig.9.5

Електрорушійна сила обмотки ротора

$$E_2 = \omega_2 w_2 \Phi = s\omega_1 w_2 \Phi = sE_{2н},$$

де $E_{2н}$ – електрорушійна сила нерухомого ротора, яка є величиною сталою.

На рис.9.3 зображено схему заміщення фази короткозамкнутого ротора.

Струм ротора $I_2 = E_2/\sqrt{R_2^2 + X_2^2}$ (R_2 , X_2 - активний та реактивний опори обмотки ротора).

В режимі холостого ходу двигуна: $s = 0$, $n_2 = n_1$, $R_{екв} = \infty$, в режимі короткого замикання (пуску) двигуна: $s = 1$, $n_2 = 0$, $R_{екв} = 0$.

Залежність моменту на валу двигуна від ковзання (моментна характеристика двигуна):

$$M = 2M_{max}/(s/s_{кр} + s_{кр}/s),$$

де $s_{кр}$ - критичне ковзання (при максимальному моменті).

Частотна характеристика двигуна $n_2(s)$ в інтервалі зміни ковзання $0 < s < 1$ зображена на рис.9.4.

Моментна характеристика двигуна $M(s)$ в інтервалі ковзання $0 < s < 1$ зображена на рис.9.5. В інтервалі ковзання $s_{кр} < s < 1$ характеристика є

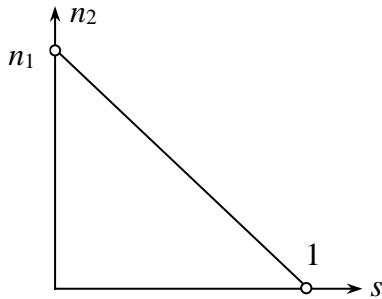


Рис.9.4

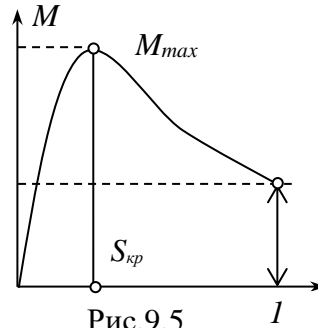


Рис.9.5

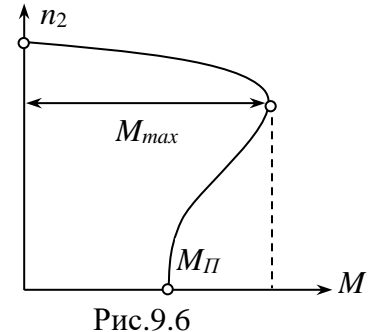


Рис.9.6

нестабільною.

Основною характеристикою двигуна є його механічна характеристика – залежність частоти обертання двигуна від моменту $n_2(M)$, вона зображена на рис.9.6.

Номинальний момент двигуна $M_{ном}$ є в діапазоні ковзання $0 < s < s_{кр}$. Двигун також характеризують перевантажувальною здатністю: $\lambda = M_{MAX} / M_{НОМ}$

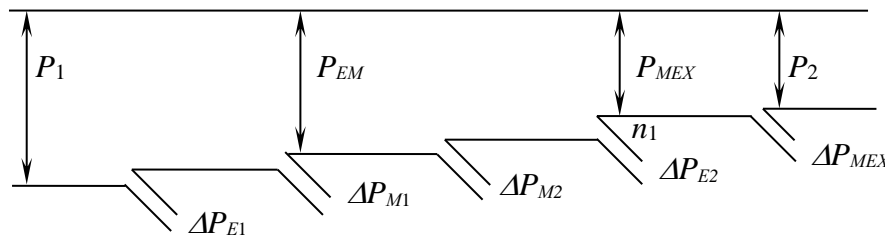


Рис.9.7

Пускові характеристики двигуна оцінюють кратністю пускового моменту: $\gamma = M_{II} / M_{НОМ}$, а пусковий струм кратністю цього струму: $\beta = I_{II} / I_{НОМ} = 5 - 7$.

Енергетична діаграма двигуна зображена на рис.9.9, де $P_1 = \sqrt{3}VI \cos \varphi_1$ - споживана електрична потужність двигуна, $P_{EM} = 2\pi n_1 M / 60 = \omega_1 M$ - електромагнітна потужність двигуна (передається від статора до ротора через повітряний проміжок), $P_2 = 2\pi n_2 M / 60 = \omega_2 M$ - механічна потужність на виході двигуна.

Втрати в двигуні: $\Delta P = \Delta P_E + \Delta P_M + \Delta P_{мех}$, де $\Delta P_E = \Delta P_{E1} + \Delta P_{E2}$ електричні втрати в обмотках, $\Delta P_M = \Delta P_{M1} + \Delta P_{M2}$ - магнітні втрати в осердях, $\Delta P_{мех}$ - механічні втрати.

Вирази коефіцієнта корисної дії двигуна:

$$\eta = P_2 / P_1 \text{ для значень } \eta < 0.85 \text{ та } \eta = 1 - \Delta P / P_1 \text{ для значень } \eta > 0.85.$$

Властивості асинхронного двигуна як елемента електричного кола описують його робочі характеристики на рис.9.8: залежності струму I_1 ,

коефіцієнта корисної дії η та коефіцієнта потужності $\cos \phi$ від потужності на валу

двигуна P_2 .

Коефіцієнт потужності асинхронних двигунів значно менший 1, оскільки вони споживають крім активної потужності значну реактивну потужність, яка необхідна для створення магнітного поля:

$$\cos \varphi = P_2 / \sqrt{(P_2^2 + Q^2)}$$

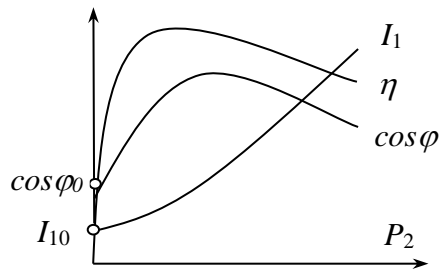


Рис.9.8

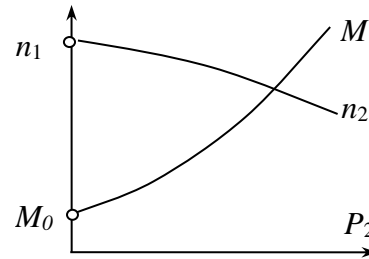


Рис.9.9

Властивості асинхронного двигуна як елемента електроприводу описують його робочі характеристики на рис.9.9, це залежності частоти обертання двигуна та моменту від потужності на валу двигуна $n_2(P_2)$, $M(P_2)$.

8. Синхронні машини

Особливістю синхронних машин є те, що їх ротор обертається з тією ж частотою, що і магнітне поле статора. Синхронні машини застосовують в основному як генератори змінного струму, в меншій мірі як двигуни, а також в якості синхронних компенсаторів (в режимі холостого ходу).

Синхронні генератори використовують на теплових гідравлічних і атомних електростанціях, а також на пересувних електростанціях і транспортних установках (тепловозах, автомобілях, літаках). Конструкція синхронного генератора визначається в основному його приводом. Залежно від цього розрізняють турбогенератори, гідрогенератори й дизельні генератори. Енергія, яка передається з валу первинного механічного двигуна перетворюється в електричну енергію і віддається в мережу споживачам змінного струму. На сучасних електростанціях, незалежно від їх типу та потужності, джерелами електричного струму є виключно синхронні генератори. Більшість синхронних генераторів є трифазними машинами.

Синхронні двигуни, які перетворюють електричну енергію в механічну, в порівнянні з асинхронними, використовують менше і в основному в приводах зі сталим режимом роботи, що не вимагає регулювання частоти обертання (потужні насоси, вентилятори, компресори, кульові та стержньові млини, прокатні стани металургійних заводів), а також у потужних агрегатах для перетворення змінного струму в постійний.

Синхронні компенсатори використовують для генерування та споживання реактивної потужності з метою підвищення коефіцієнта потужності мережі й регулювання її напруги.

Синхронні мікромашини широко використовують в електро побутових приладах та системах управління. До мікромашин відносять індукторні,

реактивні, гістерезисні, крокові двигуни та двигуни з постійними магнітами.

Перевагою синхронних машин є високий к.к.д. та коефіцієнт потужності, незалежність е.р.с. генератора від навантаження. Частота обертання синхронних двигунів не регулюється, їх пуск складніший порівняно з асинхронними двигунами та для живлення синхронних двигунів необхідно два джерела (постійного та змінного струмів).

Електромагнітна система трифазних синхронних генераторів із часу їх створення залишилася незмінною, але вдосконалювалося їх конструктивне виконання та зростали електромагнітні навантаження, що дало можливість значно покращити масо-габаритні та енергетичні показники. Особливо великі вигоди в цьому відношенні дало застосування у великих машинах водяного та водневого охолодження. Магнітна система синхронної машини є розгалуженим симетричним магнітним колом.

Основними частинами генератора є нерухомий статор і рухомий ротор. Статор синхронних машин має неявно виражені полюси (як і в асинхронних машинах), а ротор має дві принципово різні конструкції – з явно вираженими (рис.10.1) та неявно вираженими полюсами. Радіальний проміжок у машині з явно вираженими полюсами неоднаковий, а з неявно вираженими полюсами – однаковий. У роторі з явно вираженими полюсами кожен полюс виготовляють у вигляді окремого вузла, який складається з осердя 1, полюсного наконечника 2 і

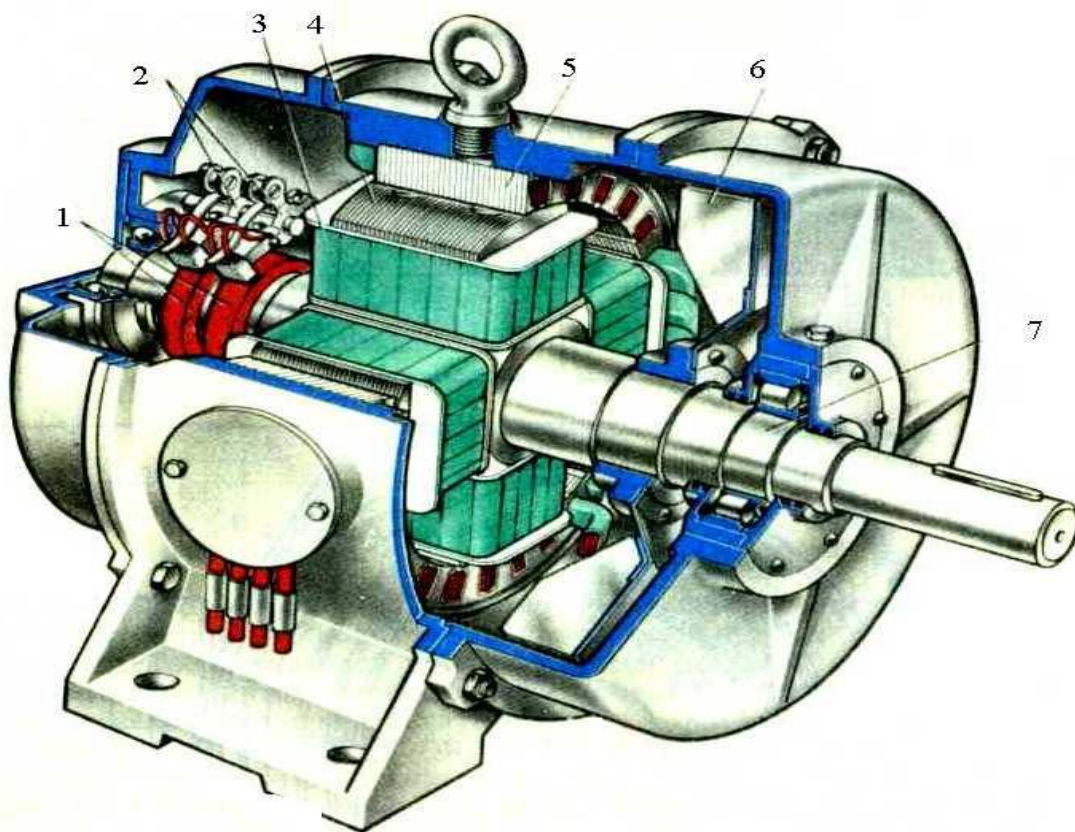


Рис.10.1. Синхронний генератор

- 1 – контактні кільця; 2 – щіткотримач; 3 – полюсна котушка ротора;
4 – полюсний наконечник; 5 – осердя статора; 6 – вентилятор; 7- вал

полюсної котушки 3, всі полюси закріплено на ободі 4, який є ярмом магнітної

системи, по якому замикаються магнітні потоки полюсів (рис.10.1).

У пазах статора, який є циліндричним магнітопровідом і набраний з окремих листів електротехнічної сталі, розміщують провідники обмотки. В конструктивному відношенні статор синхронного генератора принципово не відрізняється від статора асинхронного двигуна. Обмотка ротора має форму котушки, яку за допомогою кілець під'єднано до зовнішнього електричного кола.

В пазах двополюсного трифазного статора розміщено три однофазні обмотки, які зміщені під кутом 120° , тобто мають просторову симетрію. Фазні обмотки статора з'єднують зіркою або трикутником.

В синхронному двигуні, як і в асинхронному, струм, що протікає в трифазній обмотці статора, створює обертове магнітне поле. В обмотці ротора синхронного двигуна постійний струм протікає тому, що обмотка живиться від окремого джерела постійного струму. В асинхронних же двигунах струм ротора індукуюється обертовим магнітним полем статора. Отже, ротор синхронного двигуна відносно обертового магнітного поля статора є нерухомим.

Ротор генератора – це система електромагнітів, обмотки збудження яких живляться постійним струмом через контактні кільця. Полісні котушки кріплять за допомогою полюсних наконечників до ротора, який механічним способом створює обертове магнітне поле. Індуктор генератора живиться від збудника, роль якого виконує генератор постійного струму. Потужність збудника складає $0.5 \div 3.5\%$ від номінальної потужності синхронного генератора.

Роль якоря виконує статор, в його трифазній обмотці наводиться електрорушійна сила. Ротор тихохідної синхронного генератора (частота обертання до 3000 об/хв) виготовляють із явно вираженими полюсами, а швидкохідного (частота обертання понад 3000 об/хв) – з неявно вираженими полюсами. Статор синхронного двигуна виготовляють явнополюсним.

В основу роботи синхронного генератора покладено явище індукційної дії поля, а в основу роботи двигуна – явище силової дії поля. При подаванні на ротор постійної напруги виникає струм, що збуджує магнітне поле. При механічному обертанні ротора створюється постійне в часі магнітне поле, яке індукуює в обмотці якоря (статора) електрорушійну силу.

В синхронних машинах малої потужності використовується принцип збудження постійними магнітами, які розміщують на роторі. При такому способі збудження відпадає потреба в обмотці збудження та контактних кільцях. У результаті конструкція машини спрощується, стає економічнішою та надійнішою.

Оскільки генератор призначений для створення синусоїдної електрорушійної сили, то необхідно, щоб магнітний потік (магнітна індукція) в повітряному проміжку між статором і ротором) також змінювалися в часі за синусоїдним законом. У машинах з явнополюсним ротором це досягається за рахунок нерівномірного радіального проміжку, який забезпечує форма наконечника полюса (у вигляді шапки гриба), в машинах з неявнополюсним ротором – за рахунок нерівномірного розподілу обмотки збудження.

В синхронних машинах, як і в машинах постійного струму, існує реакція

якоря, тобто магнітне поле якоря (для генераторів статора) впливає на основне магнітне поле машини, створене індуктором (для генераторів ротором). Результуючий магнітний потік створюється потоками обмотки якоря та індуктора. Реакція якоря в синхронних машинах на відміну від машин постійного струму (в яких це явище однозначно негативне) залежить від виду навантаження. При активному навантаженні генератора магнітний потік якоря відстає від потоку, створеного обмоткою збудження на кут 90° , тому реакцію якоря називають поперечною. Якщо навантаження індуктивне, то потік якоря напрямлений зустрічно потоку збудження, тому результуюче магнітне поле послаблюється, коли ж навантаження ємнісне, потоки якоря і збудження напрямлені узгоджено (в один бік), тому результуюче магнітне поле підсилюється.

Частота індукованої електрорушійної сили фази обмотки якоря генератора залежить від числа пар полюсів і частоти обертання ротора : $n_0 = 60f/p$.

Величина індукованої електрорушійної сили генератора:

$$E_1 = \omega_1 w_1 k_w \Phi ,$$

де w_1 - число витків фази обмотки статора, k_w - обмотковий коефіцієнт, Φ - магнітний потік пари полюсів ротора.

Однією з важливих характеристик синхронного генератора є характеристика холостого ходу – магнітна характеристика, яка знімається при відсутності навантаження в режимі холостого ходу

Характеристика холостого ходу – це залежність електрорушійної сили обмотки статора (якоря) від струму збудження $E_y(I_{зБ})$ при сталій частоті обертання ротор та без навантаження. Характеристика холостого ходу генератора (рис.10.2) має вигляд віток, що розходяться. Це зумовлено впливом явища гістерезису магнітної системи машини. Зі збільшенням втрат у магнітопроводі на гістерезис розходження віток стає більшим.

Із характеристики холостого ходу бачимо, що зі збільшенням струму збудження електрорушійна сила генератора зростає майже лінійно. Нахил характеристики визначає величина повітряного проміжку, зі збільшенням якого збільшується нахил. У процесі подальшого зростання струму збудження відбувається насичення магнітної системи генератора і як наслідок – збільшення потоку розсіювання, в результаті чого зменшується зростання електрорушійної сили.

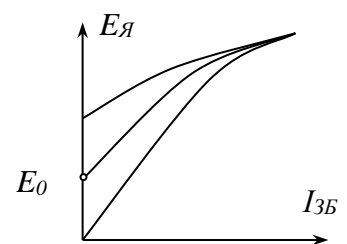


Рис.10.2

Зовнішня характеристика – це залежність напруги на затискачах обмотки статора від струму навантаження $V(I_y)$ при сталому струмі збудження та частоті обертання ротора. На рис. 10.3 зображено зовнішні характеристики, що відповідають різному характеру навантаження синхронного генератора. При активному навантаженні (крива 1) збільшення струму супроводжується зменшенням напруги, що пояснюється збільшенням спаду напруги в обмотці статора. При індуктивному

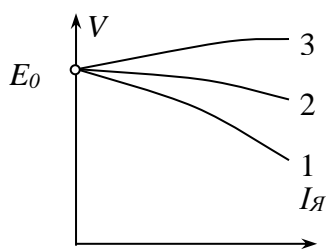


Рис.10.3

навантаженні (крива 2) збільшення струму супроводжується зменшенням напруги за рахунок розмагнічуючої дії реакції якоря. При ємнісному навантаженні (крива 3) збільшення струму супроводжується зростанням напруги за рахунок намагнічуючої дії реакції якоря.

Регулювальна характеристика генератора – залежність струму збудження від струму якоря $I_{ЗБ}(I_{Я})$ при сталій частоті обертання ротора та напрузі на затискачах генератора. Вона ілюструє як потрібно змінити струм збудження при зміні навантаження генератора для того, щоб напруга на його затискачах залишалася незмінною. На рис.10.4 зображено зовнішні характеристики, що відповідають різному характеру навантаження генератора. Для активного навантаження (крива 2) зростання струму якоря потребує зменшення струму збудження для того, щоб підтримувати напругу на затискачах генератора незмінною. Аналогічна ситуація буде і для індуктивного навантаження (крива 1). Для ємнісного навантаження збільшення струму якоря навпаки потребує збільшення струму збудження для того, щоб підтримувати напругу на затискачах генератора незмінною (крива 3).

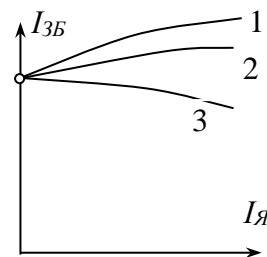


Рис.10.4

Синхронні машини не є оборотними на відміну від машин постійного струму, тобто одна і та ж машина не може працювати генератором і двигуном. Це зумовлено тим, що двигун не має свого власного пускового моменту (на відміну від асинхронного двигуна). Струми трифазної обмотки статора, яка живиться від джерела трифазної напруги створюють обертове магнітне поле. Обмотка збудження, що знаходиться на роторі живиться від джерела постійної напруги, тобто в ній протікає постійний струм. Силова дія обертового магнітного поля статора на провідники зі струмом обмотки ротора створює обертальний момент двигуна і, таким чином, ротор «втягується в синхронізм», починає обертатися з частотою n_2 , що дорівнює частоті обертового магнітного поля статора n_1 . Отже, двигун називається синхронним тому, що частоти обертання ротора і обертового магнітного поля однакові $n_2 = n_1 = n_0$, ця умова є необхідною умовою роботи двигуна. Проте, двигун не має свого пускового моменту, тобто його не можна запустити просто включивши в мережу.

Для пуску синхронного двигуна можна розігнати його ротор до частоти обертання близької синхронній n_0 , а далі він «втягується в синхронізм», тобто працює самостійно. Проте для такого пуску необхідно додатковий двигун, який розганяв би синхронний. Такий пуск називають синхронним. Інший спосіб пуску – асинхронний. Для цього на заводі-виробнику в пази ротора вкладають короткозамкнуту обмотку (як в асинхронному двигуні). Вона вмикається при пуску, двигун запускають як асинхронний, а по закінченні пуску (коли двигун «втягнеться в синхронізм»), спрацьовує реле, що вимикає цю обмотку, вмикаючи при цьому обмотку збудження і двигун працює вже як синхронний. Отже, в синхронних двигунах, на відміну від генераторів, є ще додаткова пускова обмотка. Пуск синхронних двигунів великої потужності проводиться при пониженій напрузі для того, щоб обмежити пускові струми.

Енергетичні перетворення у синхронному генераторі ілюструє діаграма, зображена на рис.10.5. Загальні втрати потужності у генераторі складаються з суми електричних ΔP_E , магнітних ΔP_M і механічних ΔP_{MEX} втрат $\Delta P = \Delta P_E + \Delta P_M + \Delta P_{MEX}$. Електричні втрати – це втрати в обмотках статора $\Delta P_{E1} = 3R_1 I_1^2$ та ротора $\Delta P_{E2} = R_2 I_2^2$, де R_1, R_2 – опори обмоток відповідно фази статора й ротора, I_1, I_2 – струми фаз статора й ротора. Загальні електричні втрати $\Delta P_E = \Delta P_{E1} + \Delta P_{E2}$. Магнітні втрати у генераторі – це втрати в осердях статора й ротора $\Delta P_M = \Delta P_{M1} + \Delta P_{M2}$.

Інтенсивність незворотної передачі енергії від обмотки ротора до обмотки статора характеризується електромагнітною потужністю

$$P_{EM} = E_1 I_1 \cos \varphi_1,$$

де φ_1 – зсув фаз між електрорушійною силою та струмом.

Коефіцієнт корисної дії генератора – це відношення потужності, яку віддає генератор у мережу P_2 , до механічної потужності P_1 , яку він споживає:

$$\eta = P_2 / P_1 = P_2 / (P_2 + \Delta P).$$

Електромагнітна потужність, що передається від ротора до статора

$$P_{EM} = M \omega,$$

де M – електромагнітний момент машини, ω – частота обертання.

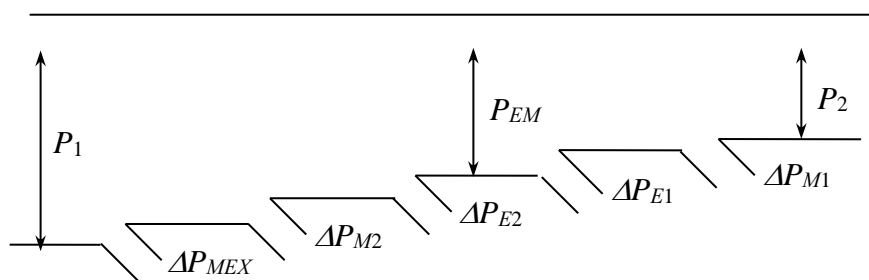


Рис.10.5

У машинах втрати потужності в обмотці якоря, порівняно з активною потужністю, незначні, тому можна вважати, що активна потужність машини дорівнює електромагнітній $P_{EM} = P = 3UI \cos \varphi$, а вираз моменту на валу має вигляд:

$$M = 3UI \cos \varphi / \omega.$$

Енергетична діаграма синхронного двигуна співпадає з енергетичною діаграмою генератора з тією різницею, що двигун споживає електричну потужність P_1 , а вихідна потужність P_2 - механічна. Коефіцієнт корисної дії двигуна – це відношення механічної потужності P_2 , до електричної потужності P_1 , яку він споживає з мережі:

$$\eta = P_2 / P_1 = P_2 / (P_2 + \Delta P).$$

Електрорушійні сили, що індукуються в обмотці статора потоками якоря та розсіювання, відповідно рівні: $E_{\text{я}} = -jI_{\text{я}} X_{\text{я}}$, $E_{\text{р}} = -jI_{\text{я}} X_{\text{р}}$,

де $X_{\text{я}}$ – індуктивний опір якоря, $X_{\text{р}}$ – індуктивний опір розсіювання. Тоді реактивний синхронний опір: $X_{\text{с}} = X_{\text{я}} + X_{\text{р}}$.

Спрощену схему заміщення синхронної машини зображено на рис.10.6,

для неї за другим законом Кірхгофа можна записати рівняння фази, якщо не враховувати активні втрати в колі якоря:

$$\underline{E} + \underline{E}_я + \underline{E}_р = \underline{I}_я \underline{Z}_н = \underline{U}.$$

Таким чином, основне рівняння синхронного генератора таке: $\underline{U} = \underline{E} - jX_c \underline{I}_я$.

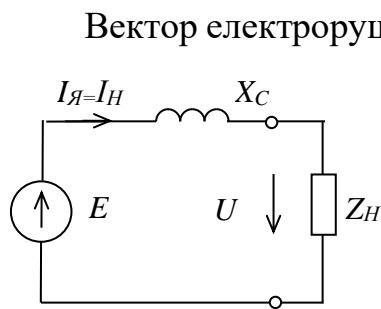


Рис.10.6

Вектор електрорушійної сили \overline{E} випереджає вектор напруги на затискачах генератора \overline{U} на кут Θ . При збільшенні струму навантаження цей кут збільшується, тому його називають кутом навантаження синхронної машини. Якщо $\overline{E} > \overline{U}$, синхронна машина працює у режимі генератора та $\Theta > 0$, якщо $\overline{E} < \overline{U}$, то вона працює в режимі двигуна та $\Theta < 0$, при $\Theta = 0$ машина працює у режимі холостого ходу.

Магнітне поле якоря обертається синхронно з ротором, але осі полів якоря та індуктора зміщені на кут Θ . Момент на валу генератора змінюється за синусоїдним законом (рис.10.7):

$$M = M_{\text{макс}} \sin \Theta,$$

де $M_{\text{макс}}$ – амплітуда моменту. Залежність $M(\Theta)$ називають кутовою характеристикою машини. Синхронна машина працюватиме в режимі двигуна $M > 0$, якщо $0 < \Theta < \pi$, та в режимі генератора $M < 0$, якщо $-\pi < \Theta < 0$.

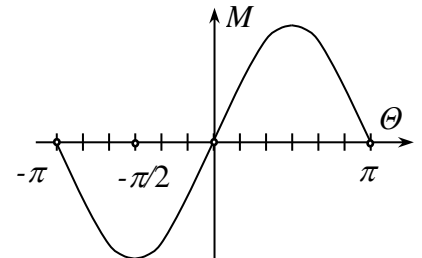


Рис.10.7

Стійкий режим роботи генератора відповідає куту навантаження для генератора $-\pi/2 < \Theta < 0$, а для двигуна $0 < \Theta < \pi/2$.

Механічна характеристика синхронного двигуна $n(M)$ є жорсткою, тобто частота обертання практично не залежить від моменту і не регулюється. Це зумовлює порівняну вузьку область застосування синхронних машин в якості двигунів.

Якщо момент на валу двигуна $M = 3UI \cos \varphi / \omega$ не змінюється, то сталою залишається і активна потужність $P = UI \cos \varphi = \text{const}$ та активна складова споживаного струму I_a . Проте, якщо змінювати струм збудження $I_{зб}$, то при сталій потужності змінюється струм живлення двигуна, а точніше його реактивна складова I_p (споживана реактивна потужність Q та коефіцієнт потужності $\cos \varphi$). Отже, змінюючи струм збудження, можна змінювати коефіцієнт потужності. Залежність реактивної складової струму живлення від струму збудження двигуна $I_p(I_{зб})$ при сталій активній потужності називають U -подібною характеристикою (рис.10.8).

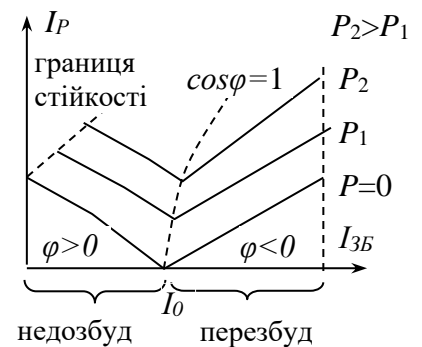


Рис.10.8

З графіків видно, що мінімальні струми статора будуть при $\cos \varphi = 1$ та при деякому значенні струму збудження I_0 , в цьому режимі машина не віддає в мережу та не споживає з мережі реактивної потужності. Области розміщені зліва

від значення I_0 відповідають роботі машини зі струмами, що відстають по фазі від напруг (індуктивний характер навантаження) називають недозбудженим режимом роботи, розміщені справа від I_0 – роботі машини зі струмами, що випереджають по фазі напруги (ємнісний характер навантаження) – перезбудженим режимом роботи.

Синхронні двигуни, які працюють в режимі холостого ходу в перезбудженому режимі $I_{зб} > I_0$ називають *синхронними компенсаторами*. Їх підключають так само як і батареї конденсаторів паралельно до приймачів, які споживають з мережі велику реактивну потужність (асинхронні двигуни, трансформатори), Синхронні компенсатори віддають в мережу реактивну ємнісну потужність Q_C , яка скомпенсовує реактивну індуктивну потужність Q_L приймачів і, таким чином, підвищує $\cos \varphi$.

Рекомендована література

Базова

1. Малинівський С. М. Загальна електротехніка [Текст]: Підручник/ С. М. Малинівський – Львів: Бескид Біт, 2003. – 640 с.
2. Будіщев М.С. Електротехніка, електроніка та мікропроцесорна техніка [Текст]: Підручник/ М.С. Будіщев – Львів: Афіша, 2001. – 424 с.
3. Мурзін В.К. Загальна електротехніка [Текст]: Підручник / В.К. Мурзін – Полтава: Кременчук, 2003. – 314 с.
4. Паначевний Б.І. Загальна електротехніка: теорія і практикум [Текст]: Підручник/ Б.І. Паначевний, Ю.Ф. Свергун – К.: Каравела, 2004. – 440 с.

Допоміжна

1. Загірняк М.В. Електричні машини [Текст]: Підручник / М.В. Загірняк, Б.І. Невзлін – К.: Знання, 2009. – 399с.
2. Болух В.Ф. Основи електротехніки та мікропроцесорної техніки [Текст]: Навчальний посібник/ В.Ф.Болух, В.Г.Данько – Харків.: ХНП ДУ, 2008. – 240с.
3. Гамола О.Є. Практикум з електротехніки [Текст]: Навчальний посібник/ О.Є. Гамола, В.І. Коруд, В.С. Мазай, Н.П. Мусихіна – Львів.: Видавництво НУ „Львівська політехніка”, 2008. – 212с.

Інформаційні ресурси

1. Курс лекцій з дисципліни «Електротехніка електроніка та мікропроцесорна техніка» /Укладач Куземко Н.А. Інтернет ресурс. Шлях до ресурсу.<http://dl.tntu.edu.ua/content.php?cid=56046>,<http://dl.tntu.edu.ua/content.php?cid=56047>,<http://dl.tntu.edu.ua/content.php?cid=137324>.

2. Підручники з дисципліни «Електротехніка електроніка та мікропроцесорна техніка». Інтернет ресурс. Шлях до ресурсу.<http://dl.tntu.edu.ua/content.php?cid=163358>,<http://dl.tntu.edu.ua/content.php?cid=167570>

Додаток

Позначення та одиниці вимірювання фізичних величин

| Найменування величини | Позначення | Розмірність |
|-------------------------------|-----------------|------------------------|
| Опір активний | $R, Ом$ | Ом |
| Опір реактивний | $X, Ом$ | Ом |
| Опір повний | $Z, Ом$ | Ом |
| Провідність активна | $G, См$ | Сіменс |
| Провідність реактивна | $B, См$ | Сіменс |
| Провідність повна | $Y, См$ | Сіменс |
| Ємність | $C, Ф$ | Фарада |
| Індуктивність власна | $L, Гн$ | Генрі |
| Індуктивність взаємна | $M, Гн$ | Генрі |
| Електрорушійна сила | $E, В$ | Вольт |
| Потенціал | $\varphi, В$ | Вольт |
| Різниця потенціалів, напруга | $U, В$ | Вольт |
| Струм | $I, А$ | Ампер |
| Потужність активна | $P, Вт$ | Ват |
| Потужність реактивна | $Q, ВАр$ | Вольт-Ампер реактивний |
| Потужність повна | $S, ВА$ | Вольт-Ампер |
| Магніторушійна сила | $F, А$ | Ампер |
| Магнітна індукція | $B, Тл$ | Тесла |
| Напруженість магнітного поля | $H, А/м$ | Ампер на метр |
| Магнітний потік | $\Phi, Вб$ | Вебер |
| Потокозчеплення | $\psi, Вб$ | Вебер |
| Маг. проникність абсолютна | $\mu_0, Гн/м$ | Генрі на метр |
| Магнітна проникність відносна | μ | |
| Магнітна стала | $\mu_0, Гн/м$ | $4\pi \cdot 10^{-7}$ |
| Частота коливань | $f, Гц$ | Герц |
| Частота коливань кутова | $\omega, рад/с$ | радіан за секунду |
| Довжина | $l, м$ | метр |
| Висота, глибина | $h, м$ | метр |
| Проміжок | $\delta, d, м$ | метр |
| Площа | $S, м^2$ | метр квадратний |
| Магніторушійна сила | $F_M, А$ | Ампер |
| Опір магнітний | R_M | |
| Кількість витків | w | |
| Кількість провідників | N | |

| № | <i>Грецькі літери</i> | | |
|----|-----------------------|---------------------|----------------|
| 1 | <i>A</i> | α | <i>альфа</i> |
| 2 | <i>B</i> | β | <i>бета</i> |
| 3 | <i>Г</i> | γ | <i>гама</i> |
| 4 | <i>Δ</i> | δ | <i>дельта</i> |
| 5 | <i>E</i> | ε | <i>епсілон</i> |
| 6 | <i>Z</i> | ζ | <i>дзета</i> |
| 7 | <i>H</i> | η | <i>ета</i> |
| 8 | <i>Θ</i> | $\theta,$ | <i>тета</i> |
| 9 | <i>I</i> | ι | <i>йота</i> |
| 10 | <i>K</i> | κ | <i>капа</i> |
| 11 | <i>Λ</i> | λ | <i>ламбда</i> |
| 12 | <i>M</i> | μ | <i>мі, мю</i> |
| 13 | <i>N</i> | ν | <i>ні, ню</i> |
| 14 | <i>Ξ</i> | ξ | <i>ксі</i> |
| 15 | <i>O</i> | o | <i>омікрон</i> |
| 16 | <i>Π</i> | π | <i>пі</i> |
| 17 | <i>P</i> | ρ | <i>ро</i> |
| 18 | <i>Σ</i> | σ, ς | <i>сигма</i> |
| 19 | <i>T</i> | τ | <i>тау</i> |
| 20 | <i>Υ</i> | υ | <i>іпсілон</i> |
| 21 | <i>Φ</i> | φ | <i>фі</i> |
| 22 | <i>X</i> | χ | <i>хі</i> |
| 23 | <i>Ψ</i> | ψ | <i>псі</i> |
| 24 | <i>Ω</i> | ω | <i>омега</i> |

Зміст

| | |
|---|----|
| 1. Кола постійного струму. | |
| Джерела та споживачі | 3 |
| З'єднання елементів | 5 |
| Розрахунок електричних кіл з кількома джерелами | 7 |
| Метод законів Кірхгофа | 7 |
| Метод двох вузлів | 8 |
| Метод еквівалентного генератора | 8 |
| Нелінійні кола постійного струму | 9 |
| 2. Кола змінного струму | 10 |
| Приймачі в колі змінного струму | 11 |
| Послідовне з'єднання приймачів в колі змінного струму | 13 |
| Паралельне з'єднання приймачів в колі змінного струму | 14 |
| Потужності в колі змінного струму | 15 |
| Перетворення в колі змінного струму | 15 |
| Схеми заміщення та показники якості елементів кола | 16 |
| Коефіцієнт потужності | 16 |
| Резонанс напруг | 17 |
| Резонанс струмів | 18 |
| 3. Трифазні електричні кола | 19 |
| 4. Магнітні кола | 23 |
| 5. Трансформатори | 27 |
| 6. Машини постійного струму | 31 |
| 7. Асинхронні двигуни | 37 |
| 8. Синхронні машини | 41 |
| 9. Література | 48 |
| Додаток | 49 |