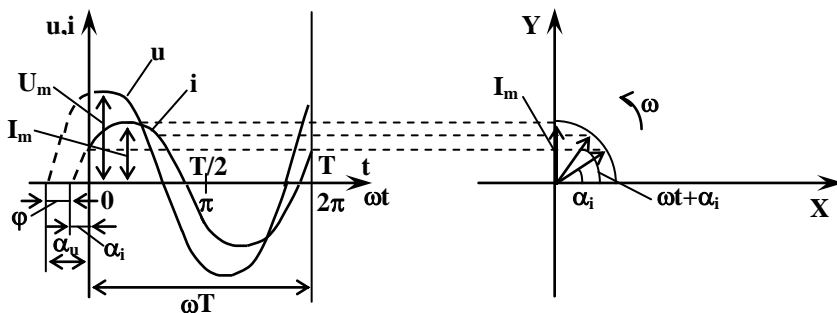


Короткий довідник з теорії електричних і магнітних кіл.



«Короткий довідник з теорії електричних і магнітних кіл». УжНУ, 2015, 30 с.

Методична розробка включає базові елементи теорії електричних і магнітних кіл, містить теоретичний мінімум, необхідний для вивчення тих інженерних дисциплін, які потребують знання основних положень і закономірностей електротехніки.

Укладач: Цигика В.В., канд. фіз.-мат. наук, доцент кафедри приладобудування

Рецензент: Славик В.М., канд. фіз.-мат. наук, доцент кафедри приладобудування

Відповідальний за випуск:

Турянця І.І., канд. фіз.-мат. наук, професор, завідувач кафедри приладобудування

Затверджено на засіданні кафедри приладобудування
5 вересня 2014 р., протокол № 1

Схвалено методичною комісією інженерно-технічного факультету “___” _____ 2015 р., протокол № ___

1. Електричні кола постійного струму

Електричним колом називають сукупність пристроїв і об'єктів, електромагнітні процеси в яких можуть бути описані за допомогою понять про електрорушійну силу (е.р.с.) E , силу струму I , напругу U , електроопір R .

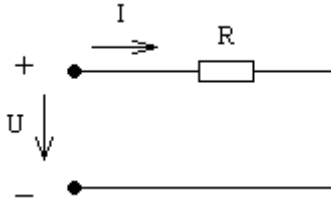


Рис.1.

На рис. 1 наведено схему ділянки електричного кола з резистором. Закон Ома для ділянки електричного кола:

$$I = \frac{U}{R}. \quad (1)$$

Потужність, яка споживається резистором

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

На рис. 2 наведено схему заміщення найпростішого електричного кола з джерелом електроенергії, яке характеризується електрорушійною силою E і внутрішнім опором $R_{вн}$, та споживачем електроенергії, що характеризується опором навантаження $R_{н}$. Для даного кола $U_{ab} = I \cdot R_{н} = E - I \cdot R_{вн}$, а закон Ома:

$$I = \frac{E}{R_{вн} + R_{н}}. \quad (3)$$

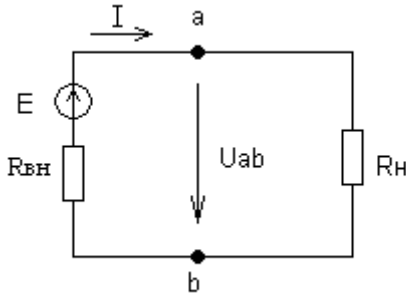


Рис.2

2. Закон електромагнітної індукції.

Один з основних законів електротехніки – закон електромагнітної індукції, який виражає нерозривний зв'язок електричного і магнітного полів. Якщо поверхня, обмежена провідниковим контуром, пронизується змінним магнітним потоком Φ , то в контурі наводиться е.р.с. індукції, рівна швидкості зміни потоку, тобто

$$e = - \frac{d\Phi}{dt} . \quad (4)$$

Магнітний потік – інтегральна характеристика магнітного поля – скалярна величина, рівна потоку вектора магнітної індукції \vec{B} через поверхню, обмежену площею S :

$$\Phi = \int_S \vec{B} d\vec{S} . \quad (5)$$

Якщо вектор $\vec{B} = \text{const}$ і перпендикулярний до площі, яку пронизує, то $\Phi = B \cdot S$. Вектор \vec{B} – основна силова характеристика магнітного поля. Магнітне поле породжується струмом, причому напрямки силових ліній магнітного поля і напрямку струму зв'язані правилом правоходового гвинта.

Для котушки з кількістю витків w , які пронизуються магнітним потоком Φ , сумарний магнітний потік ψ називається потокозчепленням:

$$\psi = w \cdot \Phi. \quad (6)$$

Потокозчеплення та струм котушки в лінійному колі пропорційні і зв'язані відношенням:

$$\psi = L \cdot i, \quad (7)$$

де L – коефіцієнт пропорційності – називається індуктивністю. Одиниця вимірювання індуктивності $[L] = [\psi]/[i] = \text{В} \cdot \text{с}/\text{А} = \text{Гн}$ (генрі). Умовне позначення котушки індуктивності на принципових електричних схемах приведено на рис. 3, а на схемах заміщення – на рис. 4.



Рис. 3

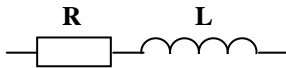


Рис. 4

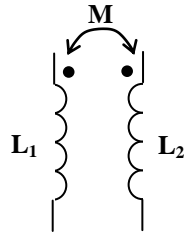


Рис. 5

Якщо магнітний потік, що пронизує контур чи котушку створено струмом даного контуру чи котушки, то виникає е.р.с. e_L , яку називають е.р.с. самоіндукції

$$e_L = - \frac{d\psi}{dt} = -L \frac{di}{dt}. \quad (8)$$

Окрім явища самоіндукції при наявності магнітного зв'язку між котушками виникає явище взаємодукції. Умовне позначення магнітозв'язаних котушок приведено на рис. 5.

3. Електроємність. Конденсатори.

Пристрої, призначені для накопичення електричного заряду, називаються конденсаторами. Конструктивно представляють собою пластини (електроди), розділені шаром

діелектрика. На електродах конденсатора накопичуються заряди q протилежного знаку, причому

$$q = Cu, \quad (9)$$

де C – коефіцієнт пропорційності, який називається ємністю. В системі СІ вимірюється у фарадах ($1\text{Ф} = 1\text{А}\cdot\text{с}/\text{В}$). Схемне позначення конденсаторів ілюструє рис. 6.

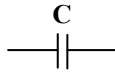


Рис.6

Струм через конденсатор

$$i = \frac{dq}{dt} = C \frac{du_C}{dt}. \quad (10)$$

В залежності від конструкції, матеріалу діелектрика розрізняють наступні типи конденсаторів: плоскі, сферичні, циліндричні, повітряні, паперові, слюдяні, електролітичні та ін.

4. Електричні кола змінного (синусоїдного) струму

4.1 Основні величини, що характеризують синусоїдні е.р.с., напруги і струми

В лінійних колах змінного струму е.р.с., напруги і струми є синусоїдними функціями часу:

$$e = E_m \sin(\omega t + \alpha_e); \quad u = U_m \sin(\omega t + \alpha_u); \quad i = I_m \sin(\omega t + \alpha_i). \quad (11)$$

Графіки синусоїдної напруги u та струму i показані на рис. 1.7а.

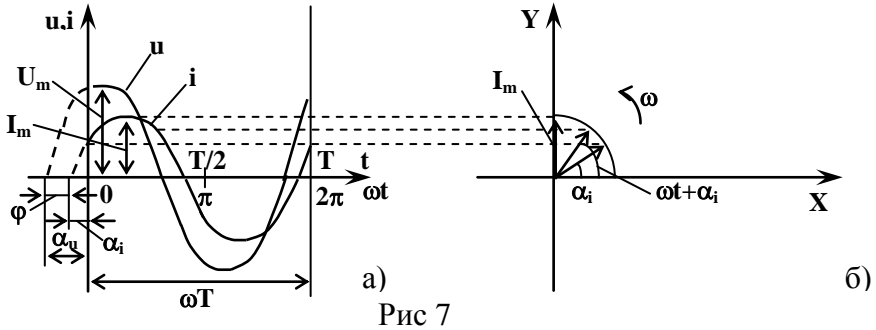


Рис 7

Синусоїдні функції часу характеризуються наступними величинами:

- 1) миттєве значення e , u , i , тобто значення в даний момент часу;
- 2) амплітуда E_m , U_m , I_m – максимальне значення функції;
- 3) фаза $\omega t + \alpha_e$, $\omega t + \alpha_u$, $\omega t + \alpha_i$ – аргумент синусоїдної функції;
- 4) кутова частота ω – швидкість зміни аргумента синусоїдної функції в рад/с;
- 5) початкова фаза α_e , α_u , α_i – значення аргумента при $t=0$;
- 6) зсув по фазі між струмом і напругою $\varphi = \alpha_u - \alpha_i$;
- 7) період $T = 2\pi/\omega$ – найменший інтервал часу, після якого миттєві значення періодичної величини повторюються;
- 8) частота $f = 1/T$ – число періодів за секунду. Одиниця вимірювання – герц ($1\text{Гц} = 1\text{с}^{-1}$);
- 9) діюче значення E , U , I – середньоквадратичне за період значення змінної величини. Зв'язок між діючими і амплітудними значеннями величин визначається співвідношеннями:

$$I = I_m / \sqrt{2} ; U = U_m / \sqrt{2} ; E = E_m / \sqrt{2} . \quad (12)$$

Електровимірювальні прилади безпосередньої оцінки електромагнітної та електродинамічної систем фіксують діючі значення величин.

4.2 Представлення синусоїдних функцій в різних формах

1. Аналітичне представлення i , u , e (формули (11)). Незручне для розрахунку електричних кіл, оскільки алгебраїчні дії з тригонометричними функціями приводять до громіздких обчислень.

2. Графічне (рис.7а) – є наочним, але, вочевидь, теж непридатне для розрахунку електричних кіл.

3. Представлення у векторній формі. Як слідує з рис.7б, проекція обертаючогося з кутовою швидкістю ω радіус-вектора \mathbf{I}_m на вісь ординат є не що інше, як миттєве значення сили струму $i = \mathbf{I}_m \sin(\omega t + \alpha_i)$. В електротехніці вектори зображають непорушними для моменту часу $t=0$, а масштаб вибирають так, щоб довжина вектора відповідала діючому значенню (\mathbf{E} , \mathbf{U} , \mathbf{I}).

Таким чином, вектор задає:

- а) діюче значення \mathbf{E} , \mathbf{U} , \mathbf{I} (модуль вектора);
- б) початкову фазу α_e , α_u , α_i (напрямок вектора).

Кутова частота ω повинна бути відома.

Сукупність векторів струмів, напруг і е.р.с. у спільній системі координат називається векторною діаграмою. Приклад векторної діаграми приведено на рис.8.

Додатній напрямок відліку кутів – проти годинникової стрілки. Відлік кута зсуву по фазі ϕ проводять в напрямку від вектора струму \mathbf{I} до вектора напруги \mathbf{U} . На відміну від фізичних векторів радіус-вектори струмів, напруг і е.р.с. позначають, наприклад, рискою під відповідним символом.

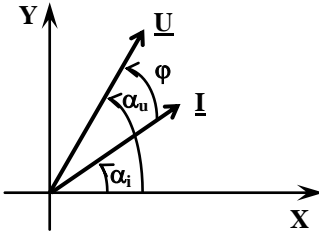


Рис. 8

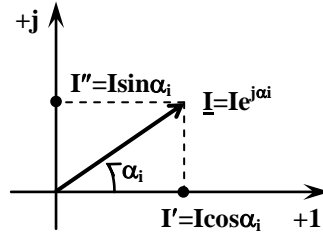


Рис. 9

4. Представлення у комплексній формі. Будь-якому комплексному числу $A = a + jb$, де $j = \sqrt{-1}$ – уявна одиниця, відповідає вектор на комплексній площині з осями координат $+1$ – вісь дійсних чисел та $+j$ – вісь уявних чисел. Стосовно сили струму перехід від векторного представлення до представлення на комплексній площині ілюструють рис. 8 та 9.

Вектор струму \underline{I} може бути записаний у комплексній формі: $\underline{I} = \underline{I}' + j\underline{I}''$. Як слідує з рис. 9 $\underline{I}' = I \cos \alpha_i$, $\underline{I}'' = I \sin \alpha_i$. Згідно формули Ейлера $e^{j\alpha_i} = \cos \alpha_i + j \sin \alpha_i$, тому вектор \underline{I} може бути представлений трьома різними комплексними формами запису – алгебраїчною, тригонометричною, показниковою:

$$\underline{I} = \underline{I}' + j\underline{I}'' = I \cos \alpha_i + j I \sin \alpha_i = I e^{j\alpha_i}.$$

(13)

Перехід від однієї форми до іншої здійснюється згідно формул:

$$I = \sqrt{(I')^2 + (I'')^2}; \quad \alpha_i = \arctg \frac{I''}{I'} \text{ при } I' > 0; \quad \alpha_i = \arctg \frac{I''}{I'} + 180^\circ \text{ при } I' < 0.$$

Таким чином, вектор може бути відображений за допомогою комплексного числа, яке характеризує діюче значення і початкову фазу синусоїдної функції часу. Третій параметр синусоїдної функції – кутова частота ω – повинен бути відомий.

Величини \underline{I} , \underline{U} , \underline{E} – комплексні діючі значення струму, напруги, е.р.с., або, коротше, комплексний струм, напруга та е.р.с.

Представлення у комплексній формі дає такі переваги:

1) дозволяє замінити графічні дії над векторами алгебраїчними діями над комплексними числами;

2) виникає повна аналогія запису рівнянь законів Кірхгофа, закону Ома і методів розрахунку кіл змінного струму з колами постійного струму.

4.3 Закон Ома для кола змінного струму

Нехай в колі з послідовним сполученням резистора R , котушки індуктивності L і конденсатора C (рис. 10, а) протікає змінний струм $i = I_m \sin \omega t$.

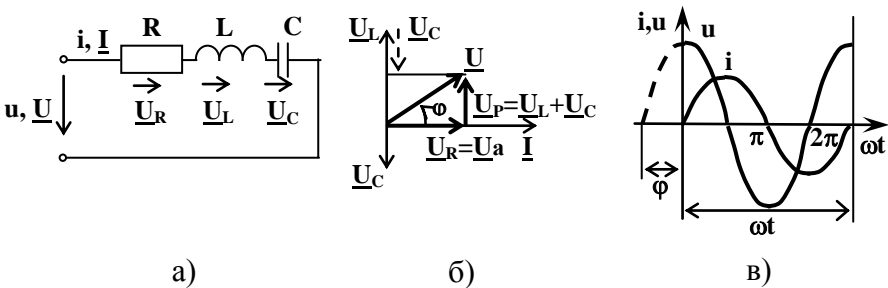


Рис. 10

Закон Ома для кола змінного струму, записаний для діючих значень величин має вигляд:

$$\mathbf{I} = \mathbf{U} / \mathbf{Z}. \quad (14)$$

Величина $\mathbf{Z} = \sqrt{R^2 + (X_L - X_C)^2}$ називається повним опором, R – активним опором, $X = X_L - X_C$ – реактивним опором, $X_L = \omega L$ – індуктивним опором, $X_C = 1/\omega C$ – ємнісним опором.

Спади напруг на окремих елементах і зсуви по фазі:

$$\begin{aligned} U_R &= IR; & \varphi_R &= 0; \\ U_L &= IX_L; & \varphi_L &= 90^\circ; \\ U_C &= IX_C; & \varphi_C &= -90^\circ. \end{aligned}$$

Згідно другого закону Кірхгофа у комплексній формі:

$$\underline{U} = \underline{U}_R + \underline{U}_L + \underline{U}_C.$$

Векторну діаграму для випадку $X_L > X_C$ (без координатних осей), графіки миттєвих значень струму та результуючої напруги u наведено на рис. 10, б,в.

Спад напруги на резисторі (активному опорі) називається активною напругою \underline{U}_a . На індуктивному і ємнісному елементах напруги знаходяться у протифазі, їх векторна сума називається реактивною напругою \underline{U}_P (модуль цього вектора $U_P = U_L - U_C$). З трикутника напруг векторної діаграми рис. 10, б, сторонами якого є \underline{U}_R , \underline{U}_P та \underline{U} слідує співвідношення:

$$U = \sqrt{U_R^2 + (U_L - U_C)^2} = I \sqrt{R^2 + (X_L - X_C)^2} = IZ$$

Якщо поділити сторони трикутника напруг на струм, отримаємо трикутник опорів (рис. 11).

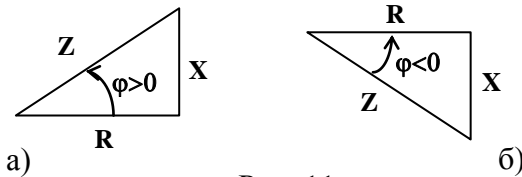


Рис. 11

З трикутника опорів слідує, наприклад, $\cos\varphi = R/Z$, $\operatorname{tg}\varphi = X/R$. Якщо $X_L > X_C$, то $\varphi > 0$, повний опір Z носить активно індуктивний характер (рис. 11, а). Якщо $X_L < X_C$, то $\varphi < 0$ і повний опір – активно-ємнісний (рис. 11, б).

Закон Ома в комплексній формі:

$$\underline{I} = \underline{U}/\underline{Z}. \quad (15)$$

Комплексний опір \underline{Z} в різних формах запису:

$$\underline{Z} = R + jX = Z \cos\varphi + jZ \sin\varphi = Ze^{j\varphi}. \quad (16)$$

Для аналізу кіл з паралельним включенням віток застосовують поняття провідностей кола змінного струму. Комплексна провідність $\underline{Y} = 1/\underline{Z} = 1/Z e^{-j\varphi} = Ye^{-j\varphi}$. Модуль комплексної провідності Y – повна провідність:

$$Y = \sqrt{G^2 + (B_L - B_C)^2}.$$

Величини $G = \frac{R}{R^2 + X^2} = \frac{R}{Z^2}$ та $B = \frac{X}{R^2 + X^2} = \frac{X}{Z^2}$ – активна і реактивна провідності. Оскільки $X = X_L - X_C$, то

$$B = \frac{X_L}{Z^2} - \frac{X_C}{Z^2} = B_L - B_C,$$

де B_L – індуктивна провідність, а B_C – ємнісна. Закон Ома для електричного кола з паралельним включенням віток:

$$I = U \cdot \sqrt{G^2 + (B_L - B_C)^2}. \quad (17)$$

4.4 Резонанс в електричних колах

Згідно (14), закон Ома для послідовного контуру $I = U / \sqrt{R^2 + (X_L - X_C)^2}$. В такому колі можливий резонанс напруг. Умова виникнення резонансу напруг:

$$X_L = X_C.$$

Досягнути умови резонансу можна шляхом зміни L , C або частоти ω . Резонансна частота послідовного контуру:

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

Опір ρ реактивного елемента при резонансній частоті називається характеристичним або хвильовим:

$$\rho = \omega_0 L = 1 / \omega_0 C = \sqrt{L/C}.$$

Відношення характеристичного опору до активного називається добротністю контуру:

$$Q = \rho / R.$$

В колі з паралельним включенням двох віток при умові $B_L = B_C$ (див. (17)) спостерігається явище резонансу струмів.

4.5 Потужність кола змінного струму

Для кола змінного струму розрізняють активну, реактивну і повну потужності.

Активна потужність: $P=IU\cos\varphi=I^2R$, Вт (ват);

Реактивна потужність: $Q=Q_L-Q_C=IU_P=IU\sin\varphi$, ВАр (вольт-ампер реактивний);

Повна потужність: $S=IU$, ВА (вольт-ампер).

Якщо помножити сторони трикутника напруг (рис. 11, б) на струм, одержимо трикутник потужностей із сторонами **S**, **P**, **Q** із якого слідує співвідношення між потужностями:

$$S = \sqrt{P^2 + Q^2} . \quad (18)$$

Величина

$$\cos\varphi=P/S=R/Z \quad (19)$$

називається коефіцієнтом потужності. Вказує, яка частина електроенергії незворотно перетворюється в даному електричному колі в інші види енергії. Експлуатація електроустановок необхідна при максимальному значенні **cosφ**.

5. Перехідні процеси в електричних колах

Перехідні процеси відбуваються при зміні режиму роботи електричного кола внаслідок, наприклад, комутації. Комутацією називають зміну схеми з'єднань електричного кола (включення, виключення, перемикання і т. д.).

Два закони комутації: струм в індуктивному і напруга на ємнісному елементах не можуть мінятися стрибкоподібно.

Перехідні процеси описуються диференціальними рівняннями, складеними згідно законів Кірхгофа для миттєвих значень напруг і струмів. Для розв'язку цих рівнянь застосовують різні методи: класичний, операторний, спектральний.

Розглянемо деякі приклади, зокрема підключення R,L - кола до джерела постійної е.р.с. E (рис. 12).

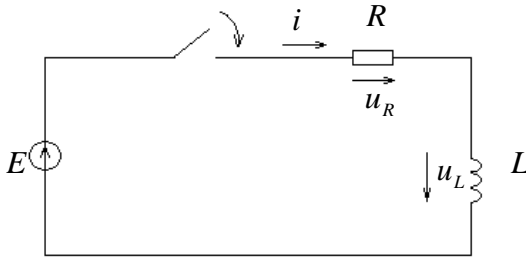


Рис.12

За другим законом Кірхгофа $E = u_R + u_L$, де спад напруги на резисторі $u_R = iR$, напруга котушки $u_L = -e_L = L \frac{di}{dt}$.

Отже, рівняння кола $L \frac{di}{dt} + iR = E$, а його розв'язок

$i = I(1 - e^{-t/\tau})$, де $I = \frac{E}{R}$; $\tau = \frac{L}{R}$ - постійна часу R,L - кола.

Графічна залежність $i(t)$ наведена на рис. 13.

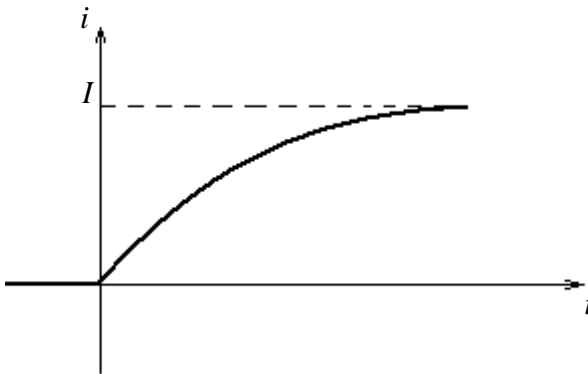


Рис.13

Розглянемо відключення даного кола від джерела живлення та його короткого замикання згідно схеми рис. 14.

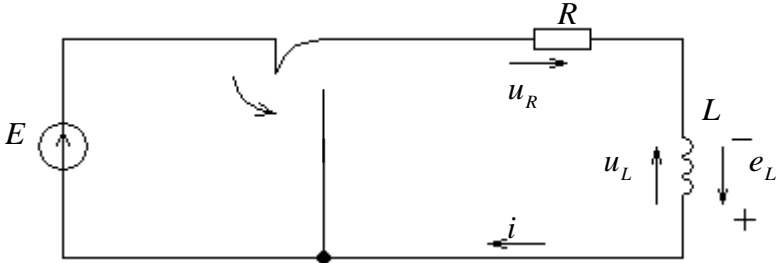


Рис.14

Рівняння кола: $L \frac{di}{dt} + iR = 0$, його розв'язок $i = Ie^{-t/\tau}$, а графічна залежність $i(t)$ наведена на рис.15

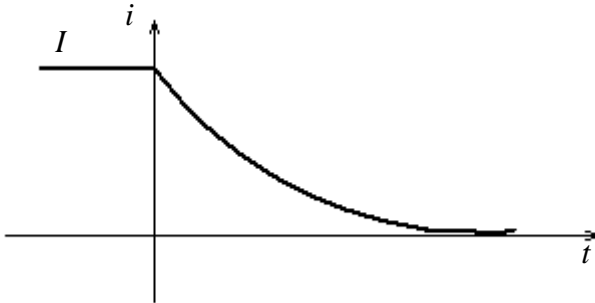


Рис.15

Підключення послідовного RC- кола до джерела постійної е.р.с. E (рис. 16) описується рівнянням другого закону Кірхгофа

$$u_R + u_C = E, \text{ де } u_R = iR = RC \frac{du_C}{dt}.$$

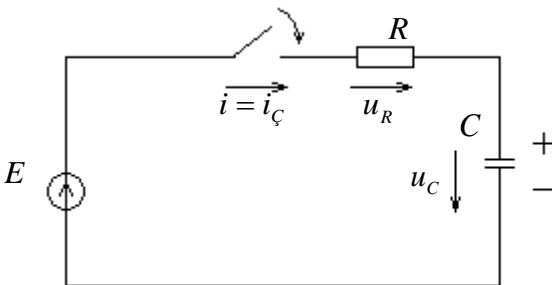


Рис. 16

Тобто, рівняння даного кола має вигляд $RC \frac{du_C}{dt} + u_C = E$.

Його розв'язок: $u_C = E(1 - e^{-\frac{t}{\tau}})$, де $\tau = RC$ - постійна часу R,C-кола. При умові, що $t \geq 3\tau$, конденсатор встигає майже повністю зарядитися і напруга на ньому досягає значення $u_C \approx E$. Якщо дане коло відключити від джерела живлення і замкнути накоротко (рис. 17), то конденсатор розряджається через резистор R, причому струми зарядки i_z та розрядки i_p направлені у взаємопротилежні сторони.

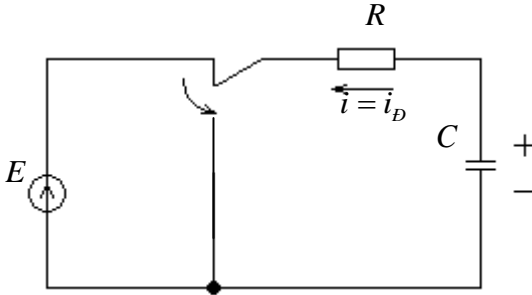


Рис.17

Рівняння даного кола: $RC \frac{du_C}{dt} + u_C = 0$. Його розв'язок:

$u_C = Ee^{-\frac{t}{\tau}}$, а графічну залежність $u_C(t)$ наведено на рис.18.

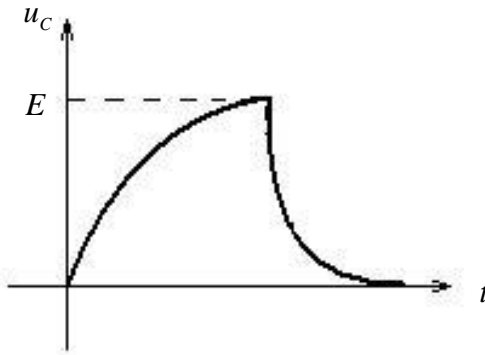


Рис.18

Розглянемо підключення до E послідовного R , L , C – контура (рис. 19)

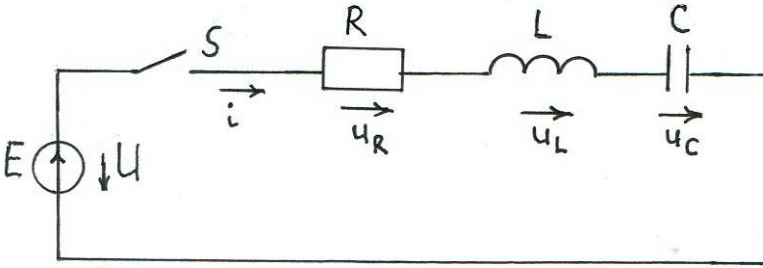


Рис.19

Згідно другого закону Кірхгофа для миттєвих значень напруг і струмів $u_R + u_L + u_C = E$, де $u_L = L \frac{di}{dt}$, $i = C \frac{du_C}{dt}$. Диференціальне рівняння, що описує перехідні процеси в даному послідовному контурі, а саме, зміну напруги на конденсаторі, має вигляд:

$$LC \frac{d^2 u_C}{dt^2} + RC \frac{du_C}{dt} + u_C = E.$$

Згідно класичного методу, розв'язок може бути представлено у вигляді суми усталеної (частковий розв'язок неоднорідного диф. рівняння) та вільної (загальний розв'язок однорідного диф. рівняння) складових:

$$u_C = U_y + A_1 e^{p_1 t} + A_2 e^{p_2 t},$$

де U_y – усталена складова напруги конденсатора, яка встановлюється по закінченні перехідного процесу. Для даного випадку $U_y = E$. Постійні A_1 і A_2 визначають із початкових умов, а p_1 і p_2 є коренями характеристичного рівняння $LCp^2 + RCp + 1 = 0$. Тобто,

$$p_{1,2} = -\frac{R}{2L} \pm \sqrt{\left(\frac{R}{2L}\right)^2 - \frac{1}{LC}}.$$

Якщо $\frac{R}{2L} > \frac{1}{LC}$, тобто, $R > 2\sqrt{L/C} = 2\rho$, то корені характеристичного рівняння будуть дійсними, якщо $R < 2\rho$, то комплексними спряженими:

$$p_{1,2} = -\delta \pm j\omega_c.$$

В першому випадку процес у колі аперіодичний (експоненціальні функції), у другому – коливний (рис.20).

Параметр $\delta = \frac{R}{2L}$ - коефіцієнт загасання,

$$\omega_c = \sqrt{\frac{1}{LC} - \left(\frac{R}{2L}\right)^2} = \sqrt{\omega_0^2 - \delta^2} - \text{кутова частота згасаючих}$$

коливань періодичного перехідного процесу, $\omega_0 = \frac{1}{\sqrt{LC}}$ - резонансна частота послідовного R, L, C – контуру, а розв'язок диференціального рівняння:

$$u_C = E - \frac{\omega_0}{\omega_c} E e^{-\delta t} \sin(\omega_c t + \alpha),$$

де $\alpha = \arctg \frac{\omega_c}{\delta}$.

Сила струму в контурі

$$i = C \frac{du_C}{dt} = \frac{E}{\omega_c L} e^{-\delta t} \sin \omega_c t = I \sin \omega_c t.$$

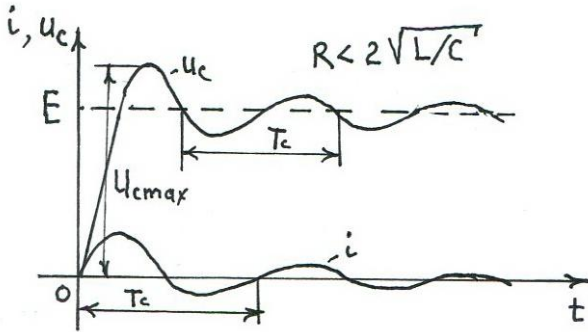


Рис.20

Період згасаючих коливань $T_c = 2\pi/\omega_c$, швидкість зменшення амплітуди характеризується декрементом коливань Δ , який визначають як відношення амплітуд в моменти часу t і $t+T_c$.

Стосовно сили струму $\Delta = \frac{Ie^{-\delta t} \sin\omega_c t}{Ie^{-\delta(t+T_c)} \sin\omega_c(t+T_c)}$, звідки слідує,

що декремент коливань $\Delta = e^{\delta T_c}$. Величину $\ln \Delta = \delta T_c$ називають логарифмічним декрементом коливань

6. Нелінійні електричні кола постійного струму.

Нелінійними електричними і магнітними елементами і колами називають такі, у яких основні параметри (опір R , індуктивність L , ємність C) не є постійними величинами а залежать від напруг, струмів, магнітних потоків чи інших величин.

Розглянемо електричне коло постійного струму з резистивним нелінійним елементом (НЕ), наведене на рис.21.

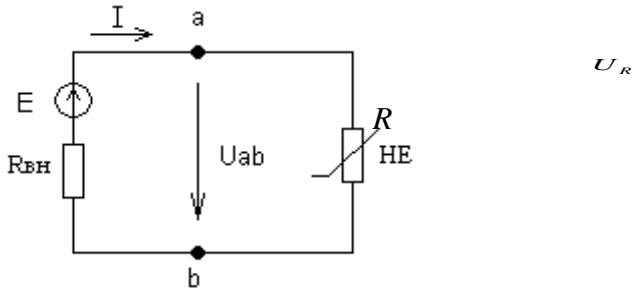


Рис. 21

Властивості резистивного нелінійного елемента описуються його вольт-амперною характеристикою (ВАХ) $I = f(U)$. В якості прикладу такого НЕ можна навести напівпровідниковий діод, умовне позначення і ВАХ якого представлено на рис.22.

Для визначення струму в колі рис. 20 використовують метод перетину характеристик. Для цього будують ВАХ НЕ та ВАХ резистора R_{BH} . Спад напруги на цьому резисторі: $IR_{BH} = E - U_{ab}$. Оскільки даний резистор є лінійним, то його вольт-амперна характеристика представляє собою

пряму, яку будують згідно закону Ома:
$$I = \frac{U}{R_{BH}} = \frac{E - U_{ab}}{R_{BH}} .$$

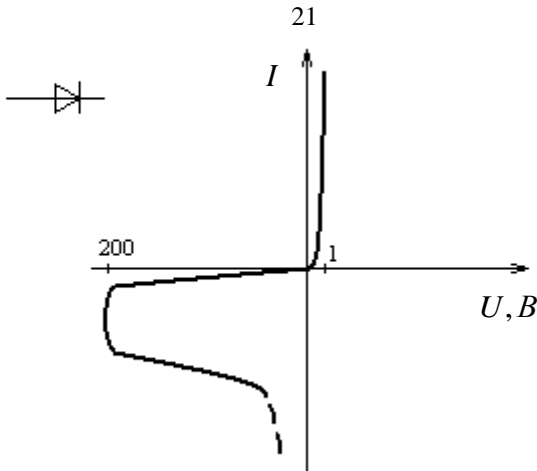


Рис.22

Отже, $I = \frac{E - U_{ab}}{R_{BH}}$ — рівняння прямої, яку будують по двох точках: $(I = 0; U_{ab} = E)$ - режим холостого ходу (ХХ) та $(I = \frac{E}{R_{BH}}; U_{ab} = 0)$ - режим короткого замикання (КЗ).

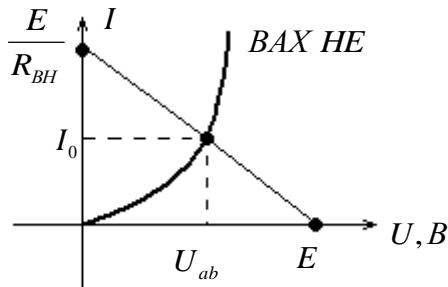


Рис.23

Напругу U_{ab} та струм I_0 визначають в точці перетину ВАХ (рис.23).

7. Магнітні кола постійного і змінного струму

7.1 Основною характеристикою магнітного поля є вектор магнітної індукції $\vec{B} = \mu_0 \mu \vec{H}$, де $\mu_0 = 4\pi \cdot 10^{-7}$ Гн/м – магнітна стала, μ – магнітна проникність середовища, H – напруженість магнітного поля.

7.2 Для немагнітних матеріалів магнітна проникність $\mu \approx 1$, для феромагнетиків $\mu \gg 1$ і є змінною величиною, а залежність $B(H)$ має вигляд, наведений на рис. 24.

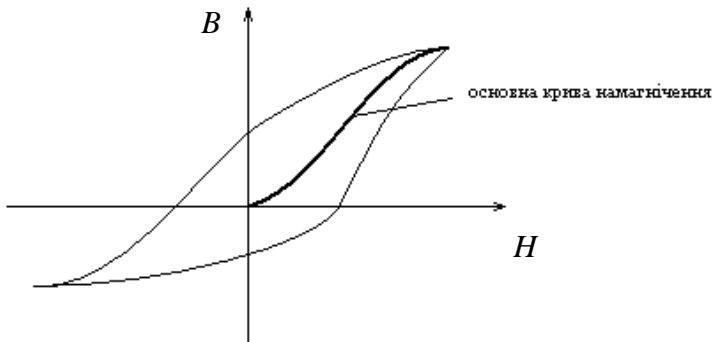


Рис.24

Феромагнітні матеріали застосовують в якості осердь (магнітопроводів), які підсилюють магнітне поле і задають йому необхідну конфігурацію.

7.3 До основних законів електромагнетизму відносяться закон електромагнітної індукції (4), закон повного струму, закон електромагнітної сили (розглянуто нижче). Визначення понять магнітний потік Φ , потокозчеплення ψ , індуктивність L , само- і взаємоіндукція наведено в розділі 2.

7.4 Розглянемо магнітне коло рис.25, яке складається із котушки з числом витків w і магнітопроводу. Джерелом постійного магнітного поля є струм I .

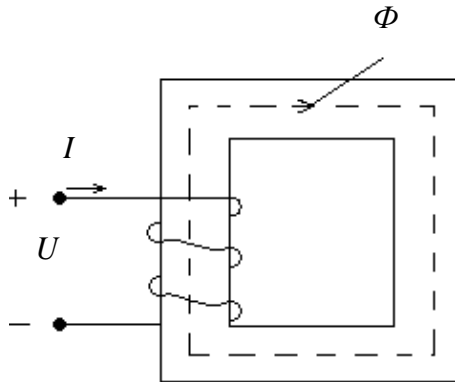


Рис.25

Закон повного струму для даного кола має вигляд: $H_{cm} l_{cm} = Iw$, де l_{cm} - довжина середньої лінії магнітопроводу, виконаного з електротехнічної сталі (позначена пунктирною лінією), добуток $H l_{cm} = U_m$ - називається магнітна напруга, а $F = Iw$ - магніторушійна сила.

В загальному випадку закон повного струму записують у вигляді $\sum_{k=1}^n H_k l_k = \sum_{k=1}^m I_k w_k$, де n - кількість однорідних ділянок магнітопроводу, m - кількість котушок. Наприклад, для магнітного кола, наведеного на рис. 26, яке складається з двох однорідних ділянок - феромагнітного матеріалу (сталі) і повітряного прошарку величиною 2δ , а магнітний потік породжується струмом однієї котушки, закон повного струму:

$$H_{cm} l_{cm} + H_n 2\delta = Iw, \quad (20)$$

де напруженість магнітного поля в повітряному прошарку

$$H_n = \frac{B}{\mu_0}; \quad \text{а напруженість магнітного поля у сталюму}$$

магнітопроводі H_{cm} визначають згідно заданої основної кривої намагнічування (див. рис. 24) та величини B .

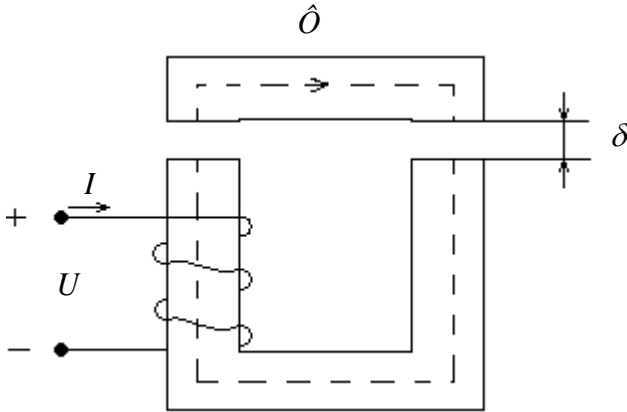


Рис.26

7.5 На провідник із струмом I , поміщений в магнітне поле з індукцією B , діє механічна сила, яку називають електромагнітною силою F_{em} . Якщо $B = const$, $B \perp I$, то $F_{em} = BI l$, де l – довжина провідника. Напрямок електромагнітної сили визначають згідно правила лівої руки.

7.6 Закон Ома для ділянки магнітного кола (рис.27)
 $\Phi = \frac{U_m}{R_m}$, де величину $R_m = \frac{l}{\mu \cdot \mu_0 S}$ називають магнітним опором.

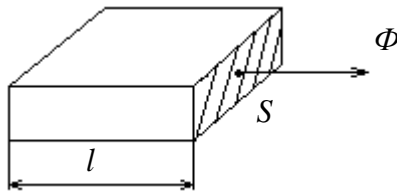


Рис. 27

7.7 Розглянемо ідеалізовану котушку з феромагнітним осердям в колі змінного струму. Для такої котушки нехтують активним опором обмотки ($R_k=0$) і магнітним потоком розсіяння ($\Phi_p=0$), який замикається не через магнітопровід, а через повітря (рис. 28). Струм котушки породжує змінний магнітний потік Φ , який, згідно закону електромагнітної індукції (4), наводить у витках обмотки е.р.с. індукції, миттєве значення якої :

$$e = -w \frac{d\Phi}{dt} . \quad (21)$$

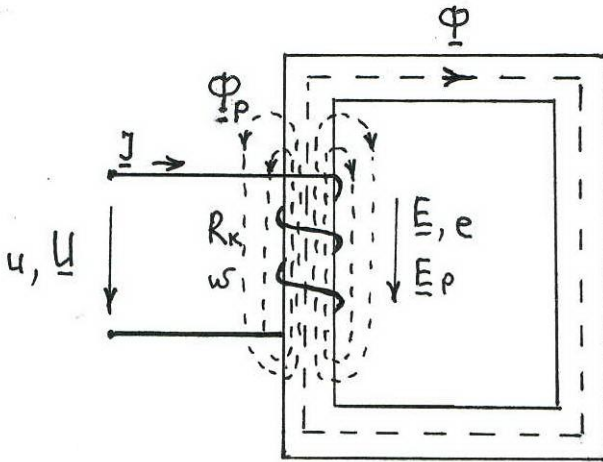


Рис. 28

Згідно другого закону Кірхгофа для ідеалізованої котушки: $u = -e = w \frac{d\Phi}{dt}$. Визначимо з даного рівняння магнітний потік при умові, що миттєве значення напруги живлення $u = U_m \cos \omega \cdot t = U_m \sin(\omega \cdot t + 90^\circ)$. Отримаємо:

$$\Phi = \frac{1}{w} \int u \cdot dt = \frac{U_m}{\omega \cdot w} \sin \omega t,$$

звідки слідує, що при синусоїдній напрузі живлення магнітний потік Φ теж синусоїдний і відстає по фазі від прикладеної

напруги на 90^0 . Амплітуда магнітного потоку $\Phi_m = \frac{U_m}{\omega \cdot w}$, а зв'язок між амплітудою магнітного потоку і діючим значенням напруги живлення:

$$U = \frac{U_m}{\sqrt{2}} = E_L = \frac{\omega w \Phi_m}{\sqrt{2}} = 4,44 f w \Phi_m. \quad (22)$$

Рівняння (22), яке називають рівнянням трансформаторної е.р.с., ілюструє той факт, що магнітний потік ідеалізованої котушки залежить, на відміну від магнітних кіл постійного струму, не від магнітного опору магнітопроводу, а визначається напругою живлення U , частотою f та кількістю витків обмотки w .

7.8 В зв'язку з магнітним гістерезисом (рис. 24), струм котушки при синусоїдних напрузі і магнітному потоці є періодичним несинусоїдним. Для розрахунків такий струм потрібно розкласти в ряд Фур'є. Проте, якщо амплітуди вищих гармонік невеликі, розрахунок електричних кіл можна проводити методом еквівалентної синусоїди, замінивши реальний струм еквівалентним синусоїдним.

7.9 Незважаючи на те, що активний опір ідеалізованої котушки $R_k=0$, струм відстає від напруги живлення на кут $\psi < 90^0$. Реактивна складова струму I_o , яка створює магнітне поле, співпадає по фазі з магнітним потоком. Наявність активної складової струму I_a , яка співпадає по фазі з напругою живлення, пояснюється магнітними втратами - на перемагнічування (гістерезисні втрати) і на вихрові струми. Магнітні втрати називають втратами в сталі.

Паралельна схема заміщення ідеалізованої котушки включає активний опір R , обумовлений магнітними втратами, та індуктивний опір X , обумовлений основним магнітним потоком Φ .

На схемі заміщення реальної котушки з феромагнітним осердям, яку наведено на рис. 29, R_k – активний опір обмотки, X_p – індуктивний опір, який обумовлений магнітним потоком

розсіяння Φ_p , \underline{E} - е.р.с. індукції, \underline{U}_i - напруга ідеалізованої котушки.

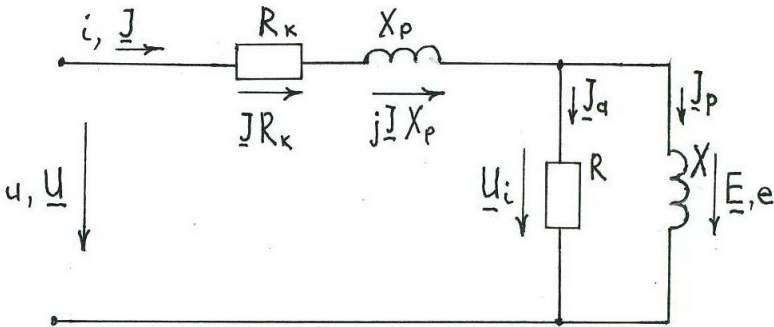


Рис. 29

Для даної схеми, згідно другого закону Кірхгофа у комплексній формі:

$$\underline{U} = -\underline{E} + \underline{I}(R_k + jX_p) \quad (23)$$

Побудуємо векторну діаграму, яка відповідає схемі заміщення та рівнянню (23). Оскільки магнітний потік $\Phi = \Phi_m \sin \omega t$, вектор $\underline{\Phi}$ вибираємо в якості вихідного. Враховуючи (21), вектор \underline{E} відстає від $\underline{\Phi}$ на 90° .

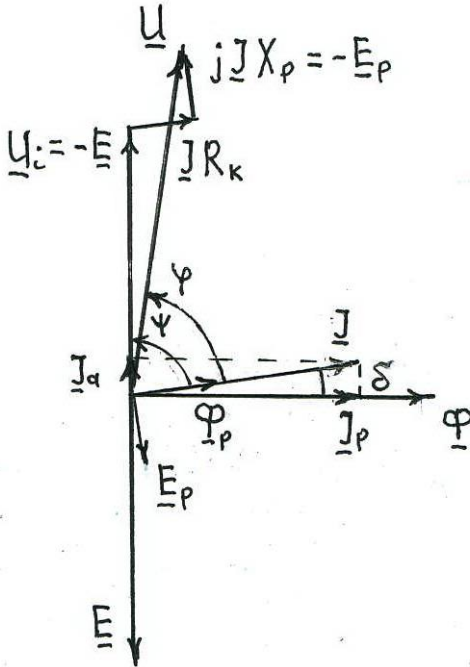


Рис.30

На векторній діаграмі рис.30 δ - кут магнітних втрат, \underline{E}_p - е.р.с., яка індукуюється магнітним потоком розсіяння.

ЛІТЕРАТУРА

1. Коруд В.І., Гамола О.Є., Малинівський С.М. Елетротехніка. - Львів: "Магнолія плюс", 2005. - 447 с.
2. Волынский Б.А., Зейн Е.Н., Шатерников В.Е. Электротехника. – М.:Энергоатомиздат, 1987, 525 с.
3. Касаткин А.С., Немцов М.В. Электротехника.- М.: ВШ, 2000, 542 с.

ЗМІСТ

	Стор.
1	Електричні кола постійного струму..... 3
2	Закон електромагнітної індукції..... 4
3	Електроємність. Конденсатори..... 5
4	Електричні кола змінного (синусоїдного) струму 6
4.1	Основні величини, що характеризують синусоїдні е.р.с., напруги і струми..... 6
4.2	Представлення синусоїдних функцій в різних формах 8
4.3	Закон Ома для кола змінного струму..... 10
4.4	Резонанс в електричних колах 12
4.5	Потужність кола змінного струму..... 13
5	Перехідні процеси в електричних колах 13
6	Нелінійні електричні кола постійного струму..... 19
7	Магнітні кола постійного і змінного струму 22
	Література..... 28