

Ток на отместване. Електромагнитно поле – уравнения на Максвел. Свободни електромагнитни трептения – незатихващи и затихващи. Основни характеристики, диференциални уравнения. Принудени електромагнитни трептения. Променив ток. Електромагнитни вълни. Скала на електромагнитните вълни

Ток на отместване. Електромагнитно поле

Установихме, че променливото магнитно поле поражда електрично поле. Максвел предполага, че променливото електрично поле също така може да породи магнитно поле. Тъй като магнитното поле се създава от токове, променливото електрично поле трябва да е свързано с промяна на зарядите в някаква област от пространството, а тази промяна на заряда е еквивалентна на протичане на някакъв ток. Този ток, породен от промяната на електричното поле, Максвел нарича ток на отместване I_d , за разлика от тока на проводимост I_c , който разглеждахме досега. Ток на отместване се създава винаги, когато имаме промяна на електричния заряд в дадена област – например при зареждане на кондензатор. Зарядът върху плочите му се изменя непрекъснато при зареждането, което е еквивалентно на протичане на ток:

$$I_d = \frac{dq}{dt}.$$

Във всички случаи, когато в дадена област се променя електричния заряд, това е свързано с промяна на интензитета $\vec{E}$ на електричното поле, а оттам и с потока на интензитета Φ_E през дадена повърхност, през която протича тока. На базата на такива разсъждения можем да получим по обща формула за тока на отместване, която не е свързана с конкретен случай:

$$(1) I_d = \epsilon_0 \frac{\partial \Phi_E}{\partial t}$$

и има подобен вид на закона на Фарадей за електромагнитната индукция, т.е. промяната на потока на интензитета на електричното поле поражда ток на отместване, който създава магнитно поле (също както промяната на потока на магнитната индукция поражда индуцирано ЕДН, което създава електрично поле). Ток на отместване I_d (1) се поражда винаги, когато има промяна на електричното поле, но той е много по-малък от тока на проводимост I_c (породен от насоченото движение на електрични заряди), затова неговото действие може да се прояви там където отсъства ток на проводимост (напр. между плочите на кондензатор).

Въвеждането на тока на отместване от една страна възстановява симетрията между електричното и магнитното поле (електрично поле може да се породи от заряди или от промяна на магнитното поле, а магнитно – от токове или промяна на електричното поле), а от друга – дава възможност да се дефинира един нов обект – електромагнитно поле, който показва неразривната връзка между електричното и магнитното поле. Променивото магнитно поле поражда променливо електрично поле, то, от своя страна, поражда променливо магнитно поле и т.н. – следователно в пространството се поражда електромагнитно поле, което се характеризира с интензитета $\vec{E}$ на електричното поле и индукцията $\vec{B}$ (или интензитета $\vec{H}$) на магнитното поле, които, са взаимно перпендикулярни. При този процес се извършва непрекъснато преобразуване на енергията на електричното поле в енергия на магнитното поле и обратно. Електромагнитното поле може да се опише с четири основни уравнения, наречени уравнения на Максвел, които по същество представляват обобщение на теоремите за циркулацията на електричното и магнитното поле и законите на Гаус за електричното и магнитното поле.

Уравнения на Максвел

Ще получим уравненията на Максвел в интегрална форма за вакуум. Показахме, че циркулацията на вихровото електрично поле по затворен контур L е:

$$\oint_L \vec{E}_i \cdot d\vec{l} = \mathcal{E}_i = -\frac{\partial \Phi_B}{\partial t}$$

(взели сме частна производна по времето, защото потокът Φ_B в общия случай може да зависи и от координатите), а знаем, че циркулацията на електростатичното поле по затворен контур е 0:

$$\oint_L \vec{E}_s \cdot d\vec{l} = 0$$

(означили сме интензитета на електростатичното поле с $\vec{E}_s$). Ако в дадена област от пространството имаме и постоянни електрични полета ($\vec{E}_s$) и променливи ($\vec{E}_i$), резултантното поле ще се

характеризира с интензитет $\vec{E}$, който съгласно принципа на суперпозицията ще бъде $\vec{E} = \vec{E}_s + \vec{E}_i$, а циркуляцията му по произволен затворен контур:

$$\oint_L \vec{E} \cdot d\vec{l} = \oint_L (\vec{E}_s + \vec{E}_i) \cdot d\vec{l} = \oint_L \vec{E}_s \cdot d\vec{l} + \oint_L \vec{E}_i \cdot d\vec{l} = 0 - \frac{\partial \Phi_B}{\partial t}$$

$$(2) \oint_L \vec{E} \cdot d\vec{l} = - \frac{\partial \Phi_B}{\partial t}.$$

Полученото уравнение (2) е първото уравнение на Максвел.

Като използваме (1) можем да обобщим теоремата на Ампер за циркуляцията на магнитното поле, която дефинирахме за тока на проводимост I_c :

$$\oint_L \vec{B} \cdot d\vec{l} = \mu_0 \sum_{j=1}^n I_j = \mu_0 I_c.$$

В общия случай трябва да отчетем и тока на отместване I_d (1) и тогава пълният ток през дадения затворен контур ще бъде $I_t = I_c + I_d$, а теоремата на Ампер ще придобие вида:

$$\oint_L \vec{B} \cdot d\vec{l} = \mu_0 I_t = \mu_0 I_c + \mu_0 I_d$$

$$(3) \oint_L \vec{B} \cdot d\vec{l} = \mu_0 I_c + \mu_0 \epsilon_0 \frac{\partial \Phi_E}{\partial t}.$$

Обобщената теорема за циркуляцията на магнитното поле (3) е второто уравнение на Максвел.

Третото и четвъртото уравнение на Максвел са законите на Гаус за потока на интензитета на електричното поле и потока на магнитната индукция през затворена повърхност S , които и за нестационарния случай (когато имаме променливи електрични и магнитни полета) имат същия вид:

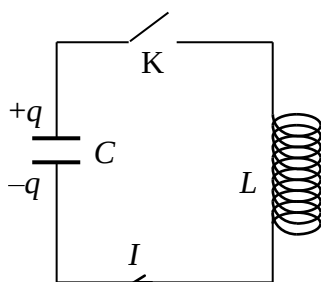
$$(4) \oint_S \vec{E} \cdot d\vec{S} = \frac{q}{\epsilon_0}$$

$$(5) \oint_S \vec{B} \cdot d\vec{S} = 0.$$

Четири основни уравнения на Максвел (2), (3), (4) и (5), заедно с някои помощни уравнения (напр. законът на Ом $\vec{j} = \sigma \vec{E}$) са напълно достатъчни за описание на електромагнитното поле и имат същото значение в електродинамиката, каквото имат трите принципа на Нютон в механиката.

Свободни незатихващи електромагнитни трептения

Нека да разгледаме един контур, в който се включени кондензатор с капацитет C и намотка с индуктивност L (фиг. 1). Ако кондензаторът е зареден със заряд q , между плочите му е създадено напрежение $U = -\Delta\phi = \frac{q}{C}$ и по контура ще започне да тече ток $I = -\frac{dq}{dt}$ (големините на напрежението и



фиг. 1

тока трябва да бъдат положителни величини). Ако в контура няма включена индуктивност, токът ще протича до изравняване на потенциалите на плочите на кондензатора (токът не е постоянен). Когато токът тече през намотката обаче, в нея се създава магнитно поле, което се увеличава с увеличаване на тока. Следователно в намотката се индуцира ЕДН на самоиндукция $\mathcal{E}_i = -L \frac{dI}{dt}$, което, по правилото на Ленц, създава ток в обратна посока на

протичащия. Това намалява тока във веригата и той по-бавно достига максималната си стойност. Когато токът започне да намалява, посоката на индуцирания ток се променя (пак по правилото на Ленц) и е в посока на

първоначалния ток. Това води до протичане на ток във веригата против посоката на електростатичното поле до зареждане на плочите на кондензатора със заряди, противоположни по знак на началните. Тъй като кондензаторът отново е зареден, пак ще започне да тече ток в контура, но в обратна посока. Ако пренебрегнем съпротивлението R на съединителните проводници и намотката, няма да имаме загуба на енергия за нагряването им и зарядите върху плочите на кондензатора ще се възстановяват до първоначалната си стойност. От закона на Ом за затворената верига на фиг. 1 ще получим:

$$(6) U + \mathcal{E}_i = IR$$

$$\frac{q}{C} - L \frac{dI}{dt} = \frac{q}{C} + L \frac{d^2 q}{dt^2} = 0$$

$$(7) \frac{d^2 q}{dt^2} + \frac{q}{LC} = 0$$

Полученото равенство (7) е диференциално уравнение от втори ред и има същия вид, както диференциалното уравнение на хармонично (свободно незатихващо) трептене на пружинно махало. Това ни дава основание да наречем промяната на заряда (тока, напрежението) в контура електромагнитно трептене (в разглеждания идеален случай това е хармонично трептене), а самия контур – трептящ кръг. В конкретния случай (7), величината, която се променя периодично (и отговаря на отклонението x на пружинното махало) е зарядът q върху плочите на кондензатора. Коефициентът пред q в уравнението трябва да е квадратът на кръговата честота на трептенето:

$$\omega = \sqrt{\frac{1}{LC}} \text{ (съответно периодът на трептенията е } T = \frac{2\pi}{\omega} = 2\pi\sqrt{LC} \text{),}$$

а решенията на (2) трябва да бъдат уравненията на трептенето:

$$(8) \begin{aligned} q &= q_m \sin(\omega t + \varphi) \\ q &= q_m \cos(\omega t + \varphi) \end{aligned}$$

където q_m и φ са двете произволни константи. Амплитудата на това трептене q_m е началният заряд, с който сме заредили кондензатора. Всеки от двата изрази (8) може да бъде уравнение на незатихващо електромагнитно трептене. Ако изберем началния момент да бъде моментът в който включваме ключа **K**, зарядът в този момент е максимален ($q=q_m \Rightarrow \varphi=0$) и уравнението на това свободно незатихващо трептене придобива вида:

$$(9) q = q_m \cos \omega t.$$

Напрежението U между плочите на кондензатора също ще се изменя по периодичен закон, подобен на (9):

$$(10) U = \frac{q}{C} = \frac{q_m}{C} \cos \omega t = U_m \cos \omega t,$$

където U_m е максималната стойност (амплитудата) на напрежението. Токът I е първата производна на заряда по времето и също ще се изменя по периодичен закон:

$$(11) I = -\frac{dq}{dt} = \omega q_m \sin \omega t = I_m \cos\left(\omega t - \frac{\pi}{2}\right).$$

Вижда се, че в този случай токът изостава по фаза с $\pi/2$ от напрежението.

Затихващи електромагнитни трептения

В един реален трептящ кръг винаги имаме и някакво съпротивление R на съединителните проводници и намотката (фиг. 2). Това води до отделяне на топлина и съответно до невъзвратими загуби на електрична енергия. Следователно електромагнитното трептене в реален трептящ кръг е аналогично на затихващо механично трептене, а съпротивлението R на контура, както ще видим по-нататък, е аналог на коефициентът на триене r . Като имаме предвид и съпротивлението R , законът на Ом (6) за този затворен контур ще се придобие вида:

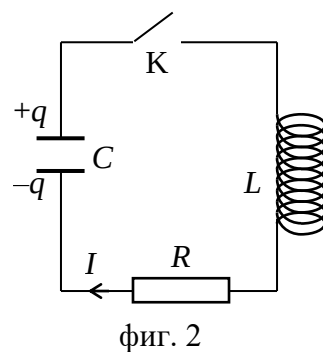
$$\frac{q}{C} - L \frac{dI}{dt} = RI = -R \frac{dq}{dt}$$

и диференциалното уравнение на затихващото електромагнитно трептене ще бъде:

$$\frac{q}{C} + L \frac{d^2 q}{dt^2} + R \frac{dq}{dt} = 0$$

$$\frac{d^2 q}{dt^2} + \frac{R}{L} \frac{dq}{dt} + \frac{q}{LC} = 0$$

$$(12) \frac{d^2 q}{dt^2} + 2\beta \frac{dq}{dt} + \omega_0^2 q = 0,$$



където $\beta = \frac{R}{2L}$ е коефициентът на затихване, а $\omega_0 = \sqrt{\frac{1}{LC}}$ е собствената кръгова честота. Виждаме, че с така въведените означения, (12) има същия вид, както и диференциалното уравнение на затихващо механично трептене. Следователно, решенията му трябва да имат същия вид:

$$(13) \quad \begin{aligned} q &= q_0 e^{-\beta t} \cos(\omega t + \varphi) \\ q &= q_0 e^{-\beta t} \sin(\omega t + \varphi) \end{aligned}$$

с намаляваща амплитуда $q_m(t) = q_0 e^{-\beta t}$ (q_0 е началният заряд, с които сме заредили кондензатора) и кръгова честота:

$$\omega = \sqrt{\omega_0^2 - \beta^2} = \sqrt{\frac{1}{LC} - \frac{R^2}{4L^2}}.$$

Също както и при механичните трептения, кръговата честота на затихващото трептене ω е по-малка от собствената кръгова честота ω_0 (съответно периодът $T = \frac{2\pi}{\omega} = \frac{2\pi}{\sqrt{\omega_0^2 - \beta^2}}$ е по-голям от $T_0 = \frac{2\pi}{\omega_0}$).

Всеки от двата израза (13) може да бъде уравнение на затихващо електромагнитно трептене. За затихващите електромагнитни трептения също можем да дефинираме декремент на затихване, като отношението на две съседни амплитуди (които се различават във времето с един период T):

$$\frac{q_m(t)}{q_m(t+T)} = \frac{q_0 e^{-\beta t}}{q_0 e^{-\beta(t+T)}} = e^{\beta T}$$

и логаритмичен декремент на затихване:

$$\delta = \ln e^{\beta T} = \beta T = \pi \frac{R}{L} \frac{1}{\sqrt{\frac{1}{LC} - \frac{R^2}{4L^2}}}.$$

Принудени електромагнитни трептения

Ако искаме да поддържаме реално незатихващо трептене, трябва, както и в случая на механичните трептения, да внасяме енергия в системата в подходящ момент т.е. трябва да включим в трептящия кръг източник на ЕДН (фиг. 3). И в този случай външното ЕДН (също както външната сила при механичните трептения) трябва да се променя по периодичен закон напр. $\mathcal{E} = \mathcal{E}_m \cos \omega t$, но то трябва да е отместено по фаза на π от фазата на собственото трептене (това е ЕДН, което зарежда кондензатора, т.е. трябва да действа обратно на посоката на електростатичното поле) и при така избраните начален момент и положителна посока на тока, външното ЕДН трябва да бъде $\mathcal{E} = \mathcal{E}_m \cos(\omega t \pm \pi) = -\mathcal{E}_m \cos \omega t$, законът на Ом ще бъде:

$$U + \mathcal{E}_i + \mathcal{E} = IR,$$

а диференциалното уравнение на принуденото трептене ще придобие вида:

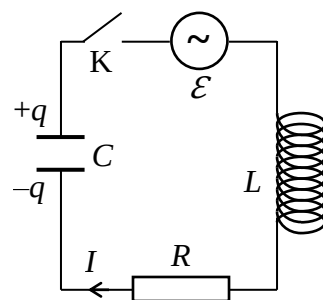
$$(14) \quad \begin{aligned} \frac{q}{C} + L \frac{d^2 q}{dt^2} + R \frac{dq}{dt} &= \mathcal{E}_m \cos \omega t \\ \frac{d^2 q}{dt^2} + 2\beta \frac{dq}{dt} + \omega_0^2 q &= \frac{\mathcal{E}_m}{L} \cos \omega t \end{aligned}$$

Както казахме и за механичните трептения, общото решение на това нехомогенно уравнение (14) се получава от сумата на общото решение (13) на хомогенното уравнение (12) и едно частно решение на (14), което ще търсим пак във вида:

$$(15) \quad q = q_m \cos(\omega t - \psi).$$

Като използваме полученото за механичните трептения, за амплитудата q_m и началната фаза ψ на (15) можем да запишем:

$$\begin{aligned} q_m &= \frac{\mathcal{E}_m}{L \sqrt{(\omega_0^2 - \omega^2)^2 + 4\beta^2 \omega^2}}, \\ \tan \psi &= \frac{2\beta \omega}{\omega_0^2 - \omega^2} \end{aligned}$$



фиг. 3

и като имаме предвид конкретните стойности на ω_0 и β ($\omega_0 = \frac{1}{\sqrt{LC}}$, $\beta = \frac{R}{2L}$), можем да запишем:

$$(16) q_m = \frac{\mathcal{E}_m}{\omega \sqrt{R^2 + \left(\omega L - \frac{1}{\omega C}\right)^2}}$$

$$(17) \tan \psi = \frac{R}{\frac{1}{\omega C} - \omega L}.$$

Величината $X_L = \omega L$ се нарича индуктивно съпротивление, а $X_C = 1/\omega C$ – капацитивно. Така (16) и (17) могат да се запишат в по-компактен вид:

$$q_m = \frac{\mathcal{E}_m}{\omega \sqrt{R^2 + (X_L - X_C)^2}}$$

$$\tan \psi = \frac{R}{X_C - X_L}.$$

Следователно уравнението на принуденото трептение ще бъде:

$$(18) q = q_0 e^{-\beta t} \cos \omega' t + \frac{\mathcal{E}_m}{\omega \sqrt{R^2 + (X_L - X_C)^2}} \cos \left(\omega t - \arctan \frac{R}{X_C - X_L} \right),$$

където:

$$\omega' = \sqrt{\omega_0^2 - \beta^2} = \sqrt{\frac{1}{LC} - \frac{R^2}{4L^2}}$$

е кръговата честота на затихващото трептение. Както и при механичните трептения първият член на (18) намалява много бързо и след времето за „синхронизация“ в трептящия кръг имаме само хармонично трептение с честота ω и амплитуда (16), т.е. уравнението на това трептение се дава само от (15). Следователно, от даден момент нататък напрежението в трептящия кръг е:

$$\mathcal{E} = \mathcal{E}_m \cos(\omega t - \pi),$$

а токът:

$$I = -\frac{dq}{dt} = \omega q_m \sin(\omega t - \psi) = I_m \cos\left(\omega t - \psi - \frac{\pi}{2}\right) = I_m \cos\left(\omega t - \pi - \left(\psi - \frac{\pi}{2}\right)\right) = I_m \cos(\omega t - \pi - \varphi),$$

т.е. токът изостава по фаза от напрежението с $\varphi = \psi - \frac{\pi}{2}$. В съответствие с (17):

$$(19) \tan \varphi = \tan\left(\psi - \frac{\pi}{2}\right) = -\frac{1}{\tan \psi} = \frac{\omega L - \frac{1}{\omega C}}{R} = \frac{X_L - X_C}{R}.$$

Максималната стойност (амплитудата) на тока ще бъде:

$$(20) I_m = \omega q_m = \frac{\mathcal{E}_m}{\sqrt{R^2 + \left(\omega L - \frac{1}{\omega C}\right)^2}} = \frac{\mathcal{E}_m}{\sqrt{R^2 + (X_L - X_C)^2}}.$$

И в този случай на принудени трептения се наблюдава явлението резонанс. От (16) и полученото за механичните трептения следва, че при кръгова честота $\omega_r = \sqrt{\omega_0^2 - 2\beta^2} = \sqrt{\frac{1}{LC} - \frac{R^2}{2L^2}}$ рязко се увеличава зарядът на кондензатора, а следователно и напрежението върху него. Затова този резонанс се нарича резонанс на напрежение. От (20) се вижда, че при собствената честота $\omega_0 = \sqrt{\frac{1}{LC}}$ на трептящия кръг, токът в него ще е максимален – тогава имаме резонанс на ток.

Променлив ток

Променлив ток наричаме всеки ток, чиято посока или големина се променя във времето. Електромагнитните трептения, които разгледахме досега, са най-простия случай на протичане на

променлив ток в една електрична верига. Обикновено когато се говори за променлив ток (напр. в бита или промишлеността) се разбира синусоиден ток с постоянна амплитуда, т.е. това е принуденото електромагнитно трептене, което разгледахме.

Ако ЕДН на източника (фиг. 3) се изменя по закона:

$$\mathcal{E} = \mathcal{E}_m \cos \omega t,$$

токът във веригата ще изостава по фаза от напрежението с φ :

$$I = I_m \cos(\omega t - \varphi).$$

Ако индуктивното съпротивление е по-голямо от капацитивното ($X_L > X_C$), от (14) следва, че $\varphi > 0$ и токът действително ще изостава по фаза от напрежението, но ако $X_L < X_C$ ($\varphi < 0$), напрежението ще изостава по фаза от тока. Амплитудата на тока (20) може да се запише като:

$$I_m = \frac{\mathcal{E}_m}{\sqrt{R^2 + (X_L - X_C)^2}} = \frac{\mathcal{E}_m}{Z}$$

$$(21) \quad Z = \sqrt{R^2 + (X_L - X_C)^2}.$$

Величината Z (16) се нарича пълно съпротивление на веригата или импеданс. Съпротивлението R се нарича активно съпротивление, а $X = X_L - X_C$ се нарича реактивно съпротивление. Като използваме (19), можем да определим как се променя фазата на тока спрямо напрежението през активно, индуктивно или капацитивно съпротивление. Когато имаме включено само активно съпротивление R (тогава $L=0$ и $C=\infty$):

$$\tan \varphi = \frac{X_L - X_C}{R} = \frac{\omega L - \frac{1}{\omega C}}{R} = \frac{0}{R} = 0 \Rightarrow \varphi = 0$$

$$I = I_m \cos(\omega t - \varphi) = I_m \cos \omega t$$

$$(22) \quad I_m = \frac{\mathcal{E}_m}{\sqrt{R^2 + (X_L - X_C)^2}} = \frac{\mathcal{E}_m}{R}.$$

В този случай токът е във фаза с напрежението. Ако във веригата имаме включена само намотка с индуктивност L ($R=0$ и $C=\infty$):

$$\tan \varphi = \frac{X_L - X_C}{R} = \frac{\omega L}{0} = +\infty \Rightarrow \varphi = \frac{\pi}{2}$$

$$I = I_m \cos(\omega t - \varphi) = I_m \cos\left(\omega t - \frac{\pi}{2}\right)$$

$$(23) \quad I_m = \frac{\mathcal{E}_m}{\sqrt{R^2 + (X_L - X_C)^2}} = \frac{\mathcal{E}_m}{X_L} = \frac{\mathcal{E}_m}{\omega L}$$

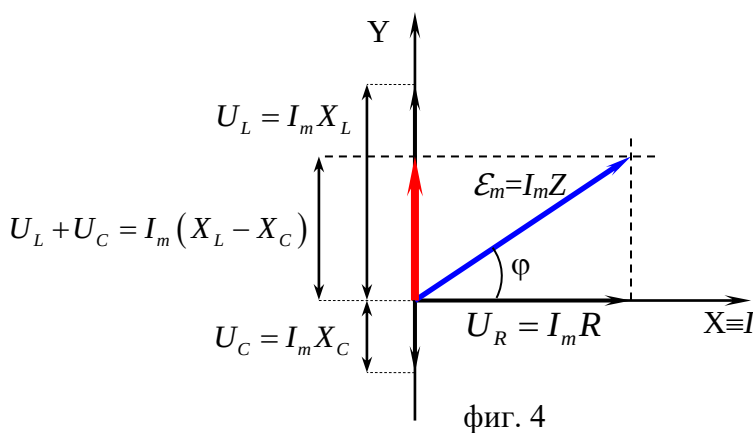
и токът изостава с $\pi/2$ от напрежението. В случая, когато имаме включен само кондензатор с капацитет C ($R=0$ и $L=0$), за фазовата разлика ще получим:

$$\tan \varphi = \frac{X_L - X_C}{R} = \frac{-\frac{1}{\omega C}}{0} = -\infty \Rightarrow \varphi = -\frac{\pi}{2}$$

$$I = I_m \cos(\omega t - \varphi) = I_m \cos\left(\omega t - \left(-\frac{\pi}{2}\right)\right) = I_m \cos\left(\omega t + \frac{\pi}{2}\right)$$

$$(24) \quad I_m = \frac{\mathcal{E}_m}{\sqrt{R^2 + (X_L - X_C)^2}} = \frac{\mathcal{E}_m}{X_C} = \frac{\mathcal{E}_m}{\frac{1}{\omega C}} = \mathcal{E}_m \omega C,$$

откъдето се вижда, че токът избързва с $\pi/2$ от напрежението (съответно напрежението изостава с $\pi/2$ от тока). Когато имаме реална електрическа верига с последователно включени всички елементи (R , L и C), ъгълът φ ще има стойност между $-\pi/2$ и $\pi/2$. В този случай (фиг. 3) падовете на напрежението (амплитудите на съответните напрежения) върху активното съпротивление U_R , индуктивността U_L и капацитета U_C , като имаме предвид (22), (23) и (24) ще бъдат съответно:



$$U_R = I_m R; \quad U_L = I_m X_L; \quad U_C = I_m X_C.$$

Сумата от трите пада на напрежения трябва да ни даде приложеното ЕДН $\mathcal{E}$. Като имаме предвид фазовите отмествания в индуктивността и капацитета (съответно $\pi/2$ и $-\pi/2$), можем да построим и векторната диаграма (фиг. 4) на напреженията.

Отделената мощност във цялата верига P_t трябва да е произведението на тока и напрежението:

$$P_t = I\mathcal{E} = I_m \mathcal{E}_m \cos(\omega t - \varphi) \cos \omega t,$$

а средната мощност P , отделена за един период T ще бъде:

$$P = \frac{I_m \mathcal{E}_m}{2} \cos \varphi = \frac{I_m}{\sqrt{2}} \frac{\mathcal{E}_m}{\sqrt{2}} \cos \varphi = I_{eff} U_{eff} \cos \varphi.$$

U_{eff} и I_{eff} се наричат ефективни стойности съответно на напрежението и тока. Това са стойностите на постоянни напрежение и ток, при които ще се отдели същата активна мощност, както за съответния променлив ток. Множителят $\cos \varphi$ се нарича фактор на мощността и трябва да е близък до 1.

Електромагнитни вълни. Скала на електромагнитните вълни

Когато дефинирахме електромагнитното поле казахме, че то се създава вследствие на преобразуване на енергията на променливо електрично поле в енергия на променливо магнитно поле и обратно. При това преобразуване на енергията интензитетите $\vec{E}$ на електричното и $\vec{H}$ на магнитното поле се променят периодично. Като се използват уравненията на Максвел може да се покаже, че при разпространението на електромагнитното поле в някаква среда, интензитетите $\vec{E}$ и $\vec{H}$ удовлетворяват уравнения от вида:

$$(25) \quad \begin{aligned} \Delta \vec{E} &= \epsilon_0 \mu_0 \epsilon_r \mu_r \frac{\partial^2 \vec{E}}{\partial t^2} \\ \Delta \vec{H} &= \epsilon_0 \mu_0 \epsilon_r \mu_r \frac{\partial^2 \vec{H}}{\partial t^2} \end{aligned}$$

които са диференциални вълнови уравнения. В такъв случай решенията на (25) трябва да описват някаква вълна с фазова скорост:

$$(26) \quad v = \frac{1}{\sqrt{\epsilon_0 \mu_0 \epsilon_r \mu_r}}.$$

Тази вълна Максвел нарича електромагнитна вълна, а за скоростта ѝ във вакуум ($\epsilon_r = \mu_r = 1$) получава:

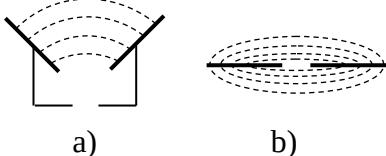
$$(27) \quad v_0 = \frac{1}{\sqrt{\epsilon_0 \mu_0}}.$$

Стойността, получена от (27) – $3 \cdot 10^8$ m/s, е много близка до определената по-рано стойност на скоростта на светлината във вакуум c . Това дава основание на Максвел да направи предположението, че светлината също е електромагнитна вълна и $v_0 \equiv c$. Оказало се също така, че $\sqrt{\epsilon_r \mu_r}$ за прозрачните вещества съвпада с коефициента им на пречупване n . Така скоростта на светлината v в дадено вещество с коефициент на пречупване n ще бъде (21), (22):

$$v = \frac{c}{n}.$$

По-рано показахме, че $\vec{E} \perp \vec{B} \Rightarrow \vec{E} \perp \vec{H}$. Следователно векторите $\vec{E}$ и $\vec{H}$ трептят във взаимно перпендикулярни посоки, а посоката на разпространение на електромагнитната вълна е перпендикулярна и на двата вектора, т.е. електромагнитната вълна е напречна вълна. Основната разлика между електромагнитните и еластичните вълни е, че при електромагнитната вълна се променят периодично интензитетите на електричното и магнитното поле, т.е. характеристики на самата вълна, а не както при еластичната вълна – положенията на частици от средата. Затова електромагнитните вълни могат да се разпространяват и във вакуум, а еластичните не могат.

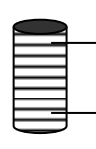
Съществуването на електромагнитни вълни е следствие от уравненията на Максвел за електромагнитното поле. Следователно, ако в дадена област от пространството се създаде променливо електромагнитно поле, то може да служи за източник на електромагнитни вълни. Такова поле се създава във всеки трептящ кръг. Така, провеждайки експерименти с трептящи кръгове през 1888 г., Х. Херц е получил за първи път електромагнитни вълни.



фиг. 5

Излъчвателната способност на един източник на електромагнитни вълни зависи от неговата форма, размери и честота на трептене. За да може да се регистрира излъчването то трябва да има необходимия интензитет (основно на електричното поле). Затова трябва да се увеличи обемът, в който се създава полето. Херц е постигнал това чрез раздалечаване на плочите на кондензатора в трептящия кръг (фиг. 5a) – получил е т.нар. отворен трептящ кръг (фиг. 5b), който впоследствие е наречен вибратор на Херц. Трептенията в системата се поддържат от източник на ЕДН, включен към кондензатора, а искровата междина (разстоянието между двете плочи на кондензатора) служи за увеличаването на потенциалната разлика между плочите.

За възбуждане на електромагнитни вълни вибраторът на Херц се включва към бобина–индуктор (фиг. 6). Когато напрежението в искровата междина достигне до пробивната си стойност, възниква искра, която затваря веригата. Така възникват свободни затихващи електромагнитни трептения, които пораждат електромагнитни вълни. Оказало се, че дължината на получената вълна е около два пъти по-голяма от дължината на вибратора. Използвайки различни вибратори, Херц е получил електромагнитни вълни с дължина на вълната от 60 cm до 10 m.



Херц постигнал значително увеличаване на интензитета на получената вълна чрез параболлично огледало. Използвайки тези вълни с достатъчно голям интензитет, той е наблюдавал явленията отражение и пречупване на електромагнитни вълни, които се подчинявали на същите закони, както и светлинните вълни.

Получаването на електромагнитни вълни е в основата на съвременните комуникации. Още в края на 19 в. учени от различни страни достигнали до принципа на радиопредаването, изобретен е телеграфът, а с конструирането на електронните лампи през 20-те години на 20 в. е даден мощен тласък в развитието на радиото, а след това и на телевизията.

Комуникации ...

Електромагнитните вълни имат твърде широк диапазон от честоти. Обикновено те се класифицират по дължината на вълната и се разделят на няколко области:

- Диапазон на дългите радиовълни ($10^4 \div 10^2$ m); използва се най-много за радиовръзки. Основният недостатък на разглежданите радиовълни се дължи на факта, че йоносферата (въздушният слой с повишена концентрация на заредени частици, който има височина **100÷300 km** над земната повърхност) ги поглъща. По тази причина те не са ефективни за радиовръзка на големи разстояния. Използват се повече за радиовръзки в подводния флот.
- Диапазон на средните и късите радиовълни ($10^2 \div 10$ m); използва се основно за радиосъобщения. За разлика от дългите вълни тези вълни се отразяват от йоносферата. Вследствие на многократно отражение от нея те могат да обходят земното кълбо и да осигурят далечна радиовръзка.
- Метров диапазон ($10 \div 1$ m); използва се за телевизия и радиолокация. В телевизията е необходимо да се предават на големи разстояния не само звукови сигнали, но и изображения. Всяко изображение посредством фотоелектронен преобразувател се превръща в редица от електрични сигнали. Вълните от този диапазон се разпространяват добре през йоносферата и не се връщат към повърхността на Земята. Поради това, за да се увеличи разстоянието на телевизионните предавания, излъчвателите на телевизионните станции трябва да се поставят на много високи места (телевизионни кули). В днешно време на специално избрани околоземни орбити се изпращат спътници, които постоянно се намират над определени райони и служат за ретранслация на телевизионните предавания.
- Сантиметров диапазон ($1 \div 10^{-2}$ m); използват се в авиацията за точна и близка радиолокация. Вълните от сантиметровия диапазон се поглъщат силно от веществото, поради което са удобни за изучаване на неговите свойства.
- Милиметров (микровълнов) диапазон ($10^{-2} \div 10^{-3}$ m); използва се за точна радиолокация и за научни цели. При изучаване поглъщането на микровълните от многоатомните молекули се получава информация за строежа им. С помощта на този метод неотдавна е открито, че в Космоса съществуват не само прости молекули като амоняк, водород и др., но и молекули на сложни съединения – аминокиселини. Общият брой на откритите сложни молекули достига около **200**.
- Инфрачервен диапазон ($10^{-3} \div 10^{-6}$ m); използва се при изучаване вътрешната структура на веществата – определяне вида на взаимодействието между молекулите, характера на движението на ядрата в атомите и др.
- Видима светлина ($7.5 \times 10^{-7} \div 4 \times 10^{-7}$ m); – електромагнитните вълни, които се възприемат от зрителния орган на човека, и включва цялата информация, която той получава за заобикалящия го свят.

- Ултравиолетов диапазон ($4 \times 10^{-7} \div 10^{-7} \text{ m}$); тези вълни имат способността да въздействат много силно на веществото. Поради силното си взаимодействие с веществото ултравиолетовото излъчване на Слънцето се поглъща почти напълно (99%) от атмосферата и по този начин се предпазва Земята.
- Диапазон на рентгеновите лъчи и гама-лъчите ($\lambda < 10^{-7} \text{ m}$); рентгеновото излъчване се използва в медицината за рентгенова диагностика, а в техниката за откриване на различни дефекти в материалите (рентгенова дефектоскопия). Гама-лъчите поради голямата си проникваща способност ($f > 10^{20} \text{ Hz}$) намират приложение за изследване структурата на ядрата.