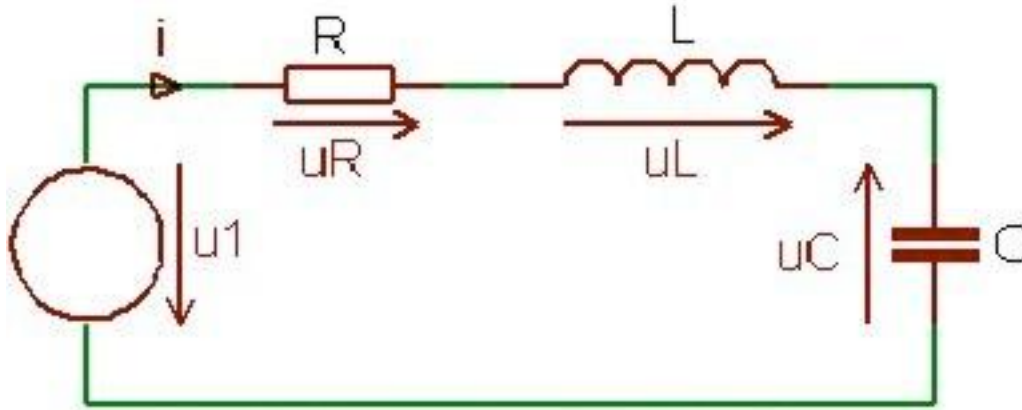


## Analýza rezonančního obvodu

© Ing. Ladislav Kopecký

V tomto článku si mimo jiné odvodíme průběhy napětí na jednotlivých prvcích obvodu a provedeme rozbor činných ztrát, které mají rozhodující vliv na účinnost energetického zařízení, jehož hlavní součástí je rezonanční obvod. Na obr. 1 vidíte rezonanční obvod, připojený na zdroj harmonického napětí, který bude předmětem našeho zkoumání.



Obr. 1

Jak již bylo řečeno, rezonanční obvod je napájen harmonickým napětím, které je možné vyjádřit rovnicí:

$$u_1 = U_A \cdot \sin(\omega t) \quad (1)$$

Z předešlého článku víme, že v rezonanci je impedance obvodu tvořena pouze činnou složkou elektrických ztrát, takže pro průběh proudu protékajícího obvodem platí:

$$i = U_A / R \cdot \sin(\omega t) = I_A \cdot \sin(\omega t) \quad (2)$$

Napětí indukované v cínce je přímo úměrné rychlosti změny magnetického toku v cínce:

$$u_L = \frac{d\phi}{dt} \quad (3)$$

Indukčnost je obecně nelineární funkcí proudu, která je závislá na magnetizační křivce feromagnetika, jež tvoří jádro cívky. U vzduchových cívek je indukčnost konstantní, čili je nezávislá na procházejícím proudu. U indukčních cívek se vzduchovou mezerou lze závislost indukčnosti na proudu často zanedbat. Potom můžeme psát:

$$u_L = L \frac{di}{dt}, \quad (4)$$

neboť  $\phi = L \cdot i$  a  $L = \text{konst.}$

Po dosazení za  $i$  podle (2) a po provedení naznačené derivace dostaneme pro indukované napětí tento vztah:

$$u_L = \omega L \cdot I \cdot \cos(\omega t) = X_L \cdot I \cdot \cos(\omega t), \quad (5)$$

kde  $X_L = \omega L$  je induktivní reaktance.

Velikost náboje na kondenzátoru je dána rovnicí:

$$Q = C \cdot u_C = \int i \cdot dt \quad (6)$$

odkud

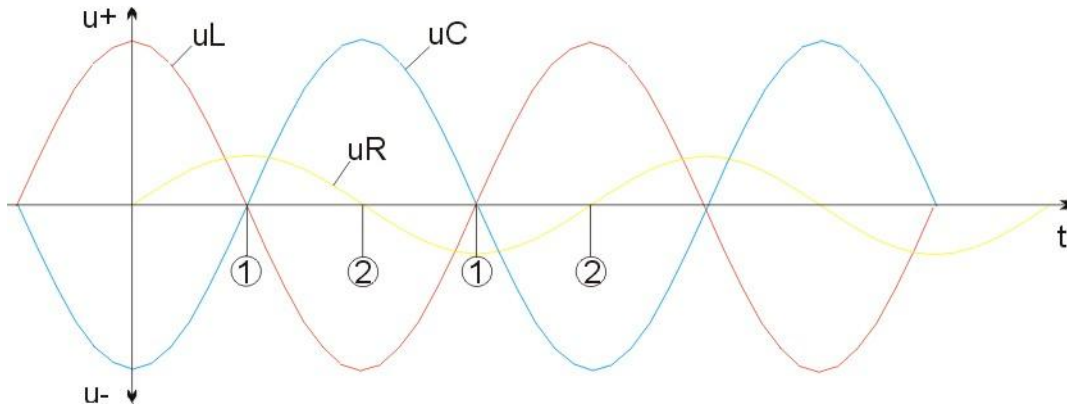
$$u_C = 1/C \int i \cdot dt \quad (7)$$

Opět dosadíme za proud  $i$  podle (2) a po integraci dostaneme:

$$u_C = \frac{1}{\omega C} I \cdot (-\cos(\omega t)) = X_C \cdot I \cdot (-\cos(\omega t)), \quad (8)$$

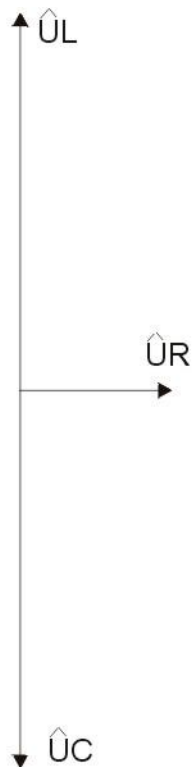
kde  $X_C = 1/(\omega C)$  je kapacitní reaktance.

Nyní již můžeme nakreslit průběhy napětí na jednotlivých prvcích obvodu z obr. 1.

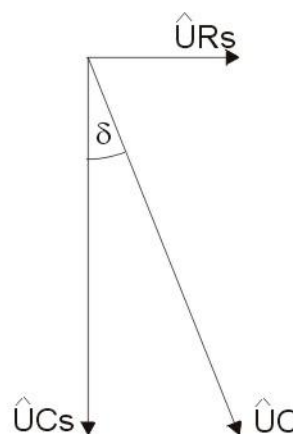


Obr. 2

Z obrázku 2 je patrné, že napětí na cívce (značeno červeně) předbíhá proud procházející obvodem (resp. napětí na odporu - značené žlutě) o  $90^\circ$ . Naproti tomu napětí na kondenzátoru (značeno modře) je za proudem o  $90^\circ$  zpožděno. Takže napětí na cívce a kondenzátoru jsou v protifázi a vzájemně se ruší a zátěž se z hlediska zdroje jeví jako výhradně činná.



Obr. 3



Obr. 5

Mezi cívkou a kondenzátorem dochází k vzájemné výměně energie. V bodech (1) na obr. 2 jsou maxima energie cívky:

$$W_L = \frac{1}{2} L \left( \frac{U_A}{R} \right)^2 = \frac{1}{2} L \cdot I_A^2, \quad (9)$$

kde  $L$  je indukčnost cívky,

$U_A$  je amplituda napětí střídavého napájecího zdroje,

$I_A$  je amplituda proudu procházejícího rezonančním obvodem a

$R$  zastupuje činné ztráty obvodu.

V bodech (2) jsou maxima energie kondenzátoru:

$$W_C = \frac{1}{2} C \cdot U_C^2, \quad (10)$$

kde  $C$  je kapacita kondenzátoru a

$U_C$  je amplituda napětí na kondenzátoru.

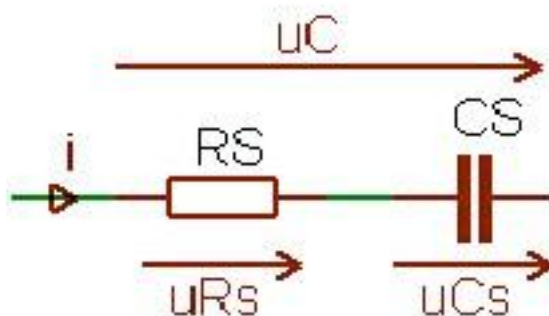
Napájecí zdroj kryje pouze činné ztráty obvodu a energie, kterou si vyměňují kondenzátor s cívkou, může být mnohonásobně větší než jsou tyto ztráty. Kdyby tyto ztráty, zastupované prvkem  $R$ , byly rovny nule, obvod by kmital i bez napájecího zdroje. Stačilo by pouze jednorázově nabít kondenzátor.

Na obr. 3 je nakreslen fázorový diagram obvodu.

Prvek  $R$ , jak již víme, zastupuje všechny činné ztráty LC obvodu: vnitřní odpor zdroje  $R_i$ , odpor vinutí  $R_v$ , ztráty v železe  $R_{Fe}$  a sériový ztrátový odpor kondenzátoru  $R_s$ .

### Určení ztrátového odporu kondenzátoru

Pro kondenzátor můžeme použít zjednodušené náhradní schéma, které najdete na obr. 4.



Obr. 4

U ideálního kondenzátoru je sériový odpor  $R_s$  roven nule a napětí na kondenzátoru  $C$  je fázově posunuto proti proudu přesně o  $90^\circ$ . U skutečného kondenzátoru je tento úhel menší o tzv. ztrátový úhel  $\delta$ . Pro jeho odvození použijeme fázorový diagram, který najdete na obr. 5.

$$\operatorname{tg} \delta = \frac{U_{R_s}}{U_{C_s}} = \frac{I R_s}{I X_{C_s}} = \omega R_s \cdot C_s \quad (11)$$

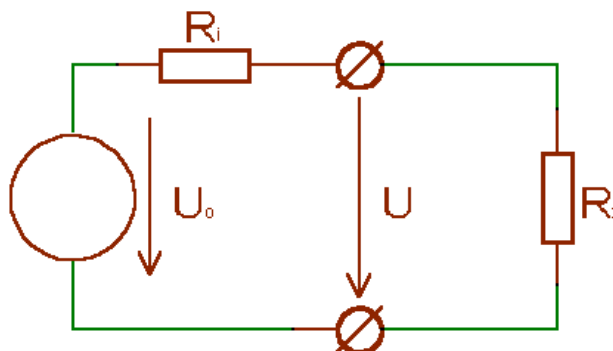
Ze vztahu (9) je zřejmé, že ztrátový úhel  $\delta$  je kmitočtově závislý. Při navrhování vysokofrekvenčních rezonančních obvodů bychom s tím měli počítat a používat kondenzátory s kvalitním dielektrikem, které má nízké ztráty.

Velikost úhlu  $\delta$  můžeme snadno zjistit pomocí dvoukanálového osciloskopu. Jedním kanálem zobrazujeme úbytek napětí na předřazeném odporu, druhým pak napětí na kondenzátoru. Na stínítku osciloskopu odečteme skutečný fázový posun těchto dvou napětí a rozdíl mezi fázovým posunem  $90^\circ$  a skutečným posunem je ztrátový úhel  $\delta$ . Sériový ztrátový odpor vypočítáme podle vzorce:

$$R_s = \frac{\operatorname{tg} \delta}{\omega \cdot C_s} \quad (12)$$

### Určení vnitřního odporu zdroje

Ideální zdroj napětí má nulový vnitřní odpor. Každý reálný zdroj napětí můžeme popsat pomocí náhradního obvodu složeného z ideálního zdroje napětí  $U_0$  a vnitřního odporu  $R_i$ .



Obr. 5

Vnitřní odpor zdroje  $R_i$  určíme následujícím postupem: Pomocí voltmetru s vysokým vnitřním odporem (např. digitálním multimetrem) změříme napětí nezatíženého zdroje  $U_0$ . Potom zdroj zatížíme odporem  $R_z$  o známé velikosti a opět změříme napětí na svorkách zdroje  $U$ . Platí:

$$U = U_0 \frac{R_z}{R_i + R_z}$$

Odkud

$$R_i = R_z \frac{U_0 - U}{U} \quad (13)$$

Celkové činné ztráty sériového rezonančního obvodu určíme experimentální metodou, která byla popsána v článku "Rezonanční obvod jako zdroj volné energie".