T 08 Striedavý prúd

(Základy elektrotechniky I., strany 219 – 324)

Zostavil: © Peter Wiesenganger

1. ÚVOD

Nutnou podmienkou vzniku striedavého prúdu bolo predchádzajúce vypracovanie teórie elektromagnetizmu, na čom sa zúčastnilo viacero bádateľov. Dvaja najvýznamnejší boli Faraday a Maxwell. Posledne menovaný využil poznatky svojich predchodcov a v rokoch 1862 – 1873 sformuloval 4 základné matematické rovnice elektromagnetizmu, ktoré platia dodnes. Neskoršie bola teória rozšírená o ďalšie 4 vedľajšie rovnice.

Maxvellove rovnice.

1. rovnica – Gaussov zákon sa týka elektrostatickej elektriny a určuje, že intenzita elektrického poľa klesá úmerne s druhou mocninou vzdialenosti od povrchu telesa nabitého elektrinou.
2. rovnica – opisuje tvar a intenzitu magnetického poľa v okolí magnetu. Tvrdí sa, že magnetické siločiary sú uzatvorené slučky, ktoré vždy vedú od severného pólu magnetu k južnému pólu a späť a že magnet je tvorený malými magnetickými doménami. Dôsledkom je to, že ak rozlomíte tyčový magnet, oba kusy budú mať severný a južný pól.
3. rovnica – vyjadruje, že meniaci sa elektrický prúd vytvára magnetické pole.
4. rovnica – Faradayov zákon indukcie vyjadruje, že premenlivé magnetické pole vybudzuje (indukuje) vo vodiči umiestnenom v tomto poli elektrický prúd.

Uvedené rovnice vyjadrujú aj to, že elektrické a magnetické polia sú navzájom zviazané a jedná sa vždy o jediný fyzikálny jav – elektromagnetizmus. Pre indukciu prúdu vo vodiči v magnetickom poli platí Flemingovo pravidlo pravej ruky: Ak dáte palec tak, aby ukazoval smer pohybu vodiča v poli a ukazovák tak aby magnetické siločiary viedli pozdĺž neho a on ukazoval smer siločiar, tak prostredník vychýlený v pravom uhle k ukazováku ukazuje smer prúdu vo vodiči.

Pre svoje uplatnenie v praktickom živote zviedol elektrický striedavý prúd historický boj s elektrickým prúdom jednosmerným. Jednosmerný prúd pre osvetlenie amerických miest preferoval Thomas Alva Edison – vynálezca žiarovky, zatiaľ čo striedavý prúd Nikola Tesla, ktorý nakoniec v tomto boji zvíťazil. Najväčšou výhodou striedavého prúdu bol jeho ekonomickejší rozvod na väčšie vzdialenosti za pomoci transformátorov, ktoré umožnili viesť prúd pod vysokým napätím a následne ho transformovať na nižšie napätia vhodné pre priemysel a domácnosti.

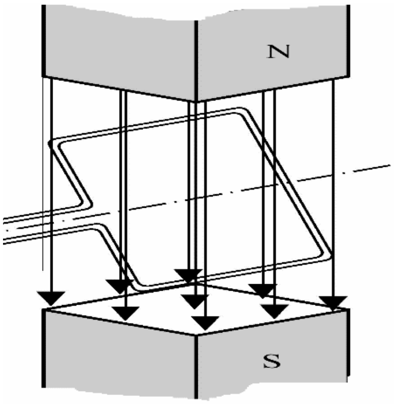
Na záver treba ešte uviesť, že elektromagnetizmus je jednou zo štyroch základných síl vo vesmíre, ktoré vznikli v prvej desaťtisícine sekundy po vzniku vesmíru. Tie štyri základné sily sú:
- gravitácia,
- elektromagnetizmus,
- silná jadrová sila (drží pokope jadrá atómov)
- slabá jadrová sila (rozkladá jadrá atómov).

Poznámka: Slabú jadrovú silu poznáme pod názvom rádioaktivita.

2. DEFINÍCIA, VZNIK A PARAMETRE STRIEDAVÉHO PRÚDU

Definícia striedavého prúdu: Zdroj striedavého prúdu je taký, na výstupných svorkách ktorého sa periodicky strieda kladné a záporné napätie.

Vznik striedavého prúdu: Striedavý prúd vzniká pri otáčavom pohybe drôtovej slučky v magnetickom poli. Deje sa tak v elektrickom stroji, ktorý sa nazýva generátor striedavého prúdu. Tento stroj mení pohybovú energiu na elektrickú. Princíp vzniku striedavého elektrického prúdu znázorňuje obrázok 1.

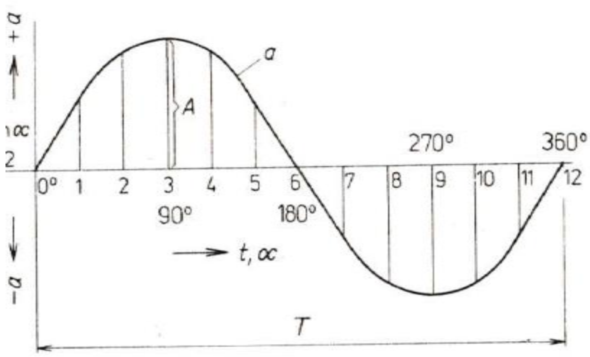


Obr.1

Veľkosť indukovaného napätia v drôtovej slučke je úmerná zmene magnetického toku za časovú jednotku. Toto je obsahom Faradayovho zákona a jeho matematické vyjadrenie je:

$$\mathbf{U_i = \Delta\ \Phi\ /\ \Delta\ t}$$

Keď slučka pretína magnetické siločiary kolmo, indukuje sa najväčší prúd, keď sa pohybuje rovnobežne s nimi neindukuje sa nič. Z nulového stavu prúd postupne narastá, dosiahne vrchol a následne klesá až na nulu. V ďalšom pohybe sa zmení smer pretínania magnetických siločiar, čím sa zmení polarita (smer toku) indukovaného prúdu a prúd opäť narastá od nuly po maximum a zas klesne na nulu. Týmto sa vo vodiči vygenerovala 1 perióda striedavého prúdu so sínusovým priebehom.



Obr.2

Parametre sínusovky striedavého prúdu:

Parametrami striedavého prúdu sú jeho amplitúda a frekvencia. Amplitúda (výška) sínusovky predstavuje veľkosť napätia alebo prúdu a frekvencia kmitočet striedavého prúdu. Pre elektrickú striedavú sieť v SR sú európskou normou stanovené hodnoty: napätie 230 V~ a kmitočet 50 Hz.

Písmenom T označujeme periódu, čo je čas za ktorý sa vytvoria jeden krát všetky možné kladné aj záporné hodnoty elektrického napätia striedavého prúdu. Frekvencia alebo kmitočet je počet periód za 1 sekundu, takže:

$$\mathbf{f = 1/T}$$

Fyzikálnou jednotkou frekvencie je 1 Hertz (1Hz), t.j. 1 kmit za sekundu.

Okrem tejto jednotky sa pre rotačný pohyb používa aj tzv. uhlová rýchlosť ω odvodená z frekvencie podľa vzťahu:

$$\boldsymbol{\omega = 2\Pi \times f}$$

Fyzikálnou jednotkou uhlovej rýchlosti je 1 radián za sekundu.

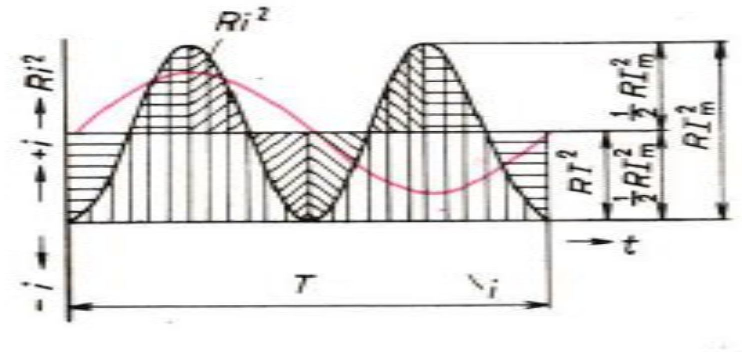
Frekvencie do 20 000 Hz považujeme za nízkofrekvenčné (nf), nad 20 kHz za vysokofrekvenčné (vf).

3. HODNOTY STRIEDAVÉHO PRÚDU A NAPÄTIA

Rozoznávame 4 možné hodnoty prúdu a napätia:

a) okamžitá hodnota: **i, u**
a) maximálna hodnota: **I_m, U_m**
b) efektívna hodnota: **I, U**
c) stredná hodnota: **I_{AV}, U_{AV}**

Efektívna hodnota je pre prax najdôležitejšia, a bežne ju nameriame meracími prístrojmi. Je to taká hodnota, ktorá má rovnaké tepelné účinky ako by mal odpovedajúci jednosmerný prúd rovnakej hodnoty pri premene elektrickej energie na tepelnú. Graficky je to znázornené na obrázku č.3, kde sú plocha sinusovky striedavého prúdu a plocha obdĺžnika jednosmerného prúdu zhodné. To znamená, že ak chceme napr. na variči nechať zovrieť 1 liter vody, tak pri napájaní variča striedavým napätím 230 V voda zovrie za rovnaký čas ako pri napájaní jednosmerným napätím 230 V .



Obr. 3

Výpočet efektívnej hodnoty je odvodený z maximálnej hodnoty a je daný vzťahmi:

$$\mathbf{I = \frac{I_m}{\sqrt{2}} = 0{,}707 \times I_m} \qquad \mathbf{U = \frac{U_m}{\sqrt{2}} = 0{,}707 \times U_m}$$

Ak teda poznáme efektívnu hodnotu zo štítku elektrického spotrebiča alebo ju zmeriame, vieme vypočítať maximálnu hodnotu:

$$\mathbf{I_m = \sqrt{2} \times I} \qquad \mathbf{U_m = \sqrt{2} \times U}$$

Stredná hodnota sa netýka sinusového priebehu prúdu, ale má význam iba pre dvojcestne usmernený striedavý prúd, ktorým obvykle nabíjame akumulátory, t.j. meníme elektrickú energiu na chemickú. Pri dvojcestnom usmernení striedavého prúdu získame za 1 periódu 2 kladné polvlny sínusovky. Ak pretransformujeme plochu týchto 2 polvĺn do obdĺžnika, jeho výška udáva veľkosť strednej hodnoty, ktorá má zhodné chemické účinky ako hodnota jednosmerného prúdu tejže hodnoty.
To znamená, že akumulátor sa nabije za rovnaký čas jednosmerným prúdom aj pulzujúcim prúdom strednej hodnoty. Nabitie akumulátora meriame hodnotou elektrického náboja Q, pričom Q = I_{AV} (A) x t (hodiny). Hodnota I_{AV} a U_{AV} je odvodená z I_m a U_m nasledovne:

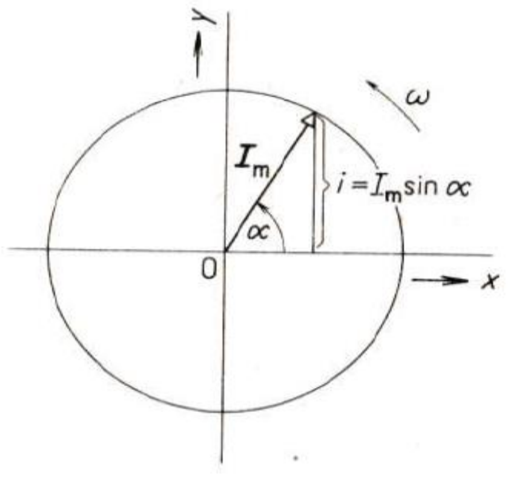
$$\mathbf{I_{AV} = \frac{2}{\Pi} I_m = 0{,}637\, I_m} \qquad \mathbf{U_{AV} = \frac{2}{\Pi} U_m = 0{,}637\, U_m}$$

Príklad: Akumulátor sa nabíja prúdom I = 10 A (efektívna hodnota) ktorý sme dvojcestne usmernili. Doba nabíjania bude 20 hodín. Aká bude hodnota Q?

$$\mathbf{Q = I_{AV} \times t}$$

$I_{AV} = 0{,}637\, I_m = 0{,}637 \times \sqrt{2} \times I = 0{,}637 \times 1{,}41 \times 10 = 9A$
Q = 9 x 20 = 180 Ah

4. ZNÁZORNENIE SINUSOVÝCH VELIČÍN FÁZORMI



Obr. 4

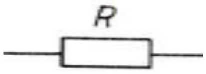
Fázor nám pomocou jediného vektora znázorní sínusovku. Tento vektor je vlastne úsečka umiestnená v súradnej sústave x,y, veľkosť ktorej sa rovná hodnotám I_m alebo U_m. Jej smer je daný uhlom φ voči osi x. V jednej sústave môžeme umiestniť aj viac fázorov, podmienkou je ich zhodná frekvencia.

Poznámka: Fázor je v skutočnosti vektor bez fyzikálnej interpretácie.

5. PASÍVNE PRVKY V OBVODE STRIEDAVÉHO PRÚDU

5.1 REZISTOR

Označenie: **R**



Rezistor je prvok, ktorý kladie prechádzajúcemu prúdu odpor a tým tento prúd znižuje a zároveň vzniká na ňom napätie. Závislosť medzi prúdom, napätím a odporom určuje Ohmov zákon, ktorý platí pre jednosmerný aj striedavý prúd.

$$\mathbf{I\ (A) = U\ (V) / R\ (\Omega)}$$

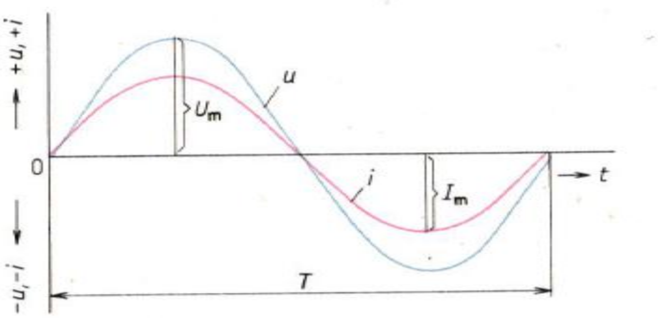
V ďalšom budeme predpokladať, že sa jedná o ideálny rezistor, bez akejkoľvek indukčnosti a kapacity.
Ak umiestnime rezistor do obvodu striedavého prúdu, bude ním prúd prechádzať a vznikne na ňom striedavé napätie. Rezistor bude klásť prúdu odpor podľa jeho hodnoty, ktorá sa udáva v ohmoch – Ω.
Definícia jednotky odporu: rezistor má hodnotu odporu 1Ω, ak pri prechode prúdu 1A vznikne na ňom napätie 1V.
Rezistor sa dá určiť aj hodnotou jeho vodivosti, čo je prevrátená hodnota odporu. Jednotkou vodivosti je 1 Siemens, pričom platí: 1 S = 1 / 1Ω.

Radenie rezistorov:

Pri sériovom radení rezistorov sa hodnoty odporov sčítajú, pri paralelnom radení sa sčítajú ich prevrátené hodnoty, t.j. vodivosti.

$$\mathbf{R_s = R_1 + R_2 + R_3 + \ldots} \qquad \mathbf{\frac{1}{R_P} = \frac{1}{R_1} + \frac{1}{R_2} + \frac{1}{R_3} + \ldots}$$

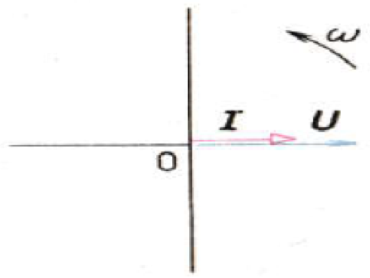
Priebeh striedavého prúdu a napätia na rezistore ukazuje nasledujúci obrázok:



Obr. 5

Fázorový diagram:

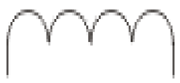
Vidíme, že priebeh prúdu aj napätia sa na rezistore fázovo zhoduje, čomu hovoríme že prúd a napätie sú vo fáze. Fázorové znázornenie je na nasledovnom obrázku:



Obr. 6

Technológia: rezistory sa vyrábajú navinutím odporového vodiča na keramickú kostričku (vinuté), alebo sú lisované z odporovej hmoty (hmotové), resp. vzniknú naparením veľmi tenkého povlaku zlata na keramickú kostričku (naparované).

5.2 CIEVKA

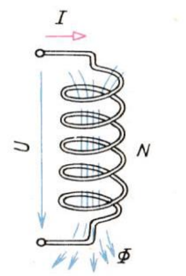
Označenie: **L** 

V ďalšom budeme predpokladať, že sa jedná o cievku s ideálnou indukčnosťou, bez odporu a kapacity.

Cievkou nazývame navinuté závity vodivého drôtu na izolačnú kostričku (plast, keramika, tvrdený papier) a môže byť bez jadra alebo s jadrom z magnetického materiálu (transformátorový plech alebo ferit). Pri prechode striedavého prúdu cez cievku sa v jej okolí vytvorí striedavé magnetické pole s magnetickým tokom Φ, ktorý na základe Faradayovho indukčného zákona vyvolá v cievke indukované elektrické napätie:

$\mathbf{U_i = \Delta\Phi / \Delta t}$ pre 1 závit a $\mathbf{U_i = N \times \Delta\Phi / \Delta t}$ pre N závitov.

Toto indukované napätie pôsobí vždy proti zmene, ktorá ho vyvolala. To znamená, že pri stúpajúcom napätí sínusovky napájacieho napätia ju U_i znižuje a pri klesaní zvyšuje. Takúto vlastnosť cievky nazývame vlastnou indukčnosťou a označujeme ju L. Jednotkou indukčnosti je 1 Henry – 1H. Cievku s magnetickým tokom znázorňuje obrázok:



Obr. 7

Definícia jednotky indukčnosti: Cievka má indukčnosť 1H, ak sa v nej indukuje napätie 1V pri zmene napájacieho prúdu o 1A.

Impedancia cievky:

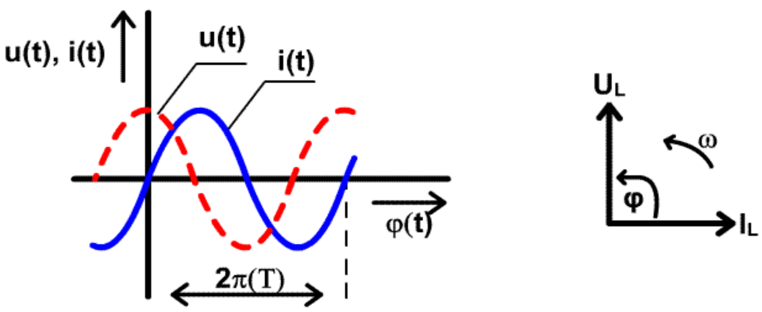
Indukčnosť cievky kladie striedavému prúdu tzv. indukčný odpor, ktorý označujeme X_L a obecne sa nazýva impedancia. Platí:

$\mathbf{X_L = \omega \times L}$ pričom $\mathbf{\omega = 2\Pi \times f}$

Z uvedeného vzťahu je zrejmé, že indukčný odpor cievky sa zvyšuje zvyšovaním frekvencie a hodnotou indukčnosti. Impedancia sa udáva v Ohmoch – Ω.

Fázorový diagram:

Cievka svojou vlastnou indukčnosťou spôsobuje pri striedavom prúde fázový posun prúdu voči napätiu tak, že napätie predbieha prúd o 90^o.



Obr. 8

Radenie cievok:

Radenie cievok je obdobné ako u rezistorov, t.j. hodnota indukčností sa pri sériovom radení spočítava, pri paralelnom radení sa spočítavajú prevrátené hodnoty:

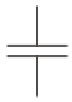
$$\mathbf{L_S = L_1 + L_2 + L_3}$$

$$\mathbf{\frac{1}{L_P} = \frac{1}{L_1} + \frac{1}{L_2} + \frac{1}{L_3} \; .....}$$

Vzájomná indukčnosť:

Ak máme cievku napájanú striedavým prúdom a priblížime k nej inú nenapájanú cievku, tak meniace sa magnetické pole napájanej cievky vyvolá indukované napätie aj v nenapájanej cievke. Tento jav sa nazýva vzájomná indukčnosť a meria sa taktiež jednotkou Henry. Vzájomná indukčnosť dvoch cievok je 1H, ak sa v pasívnej cievke indukuje napätie 1V pri zmene prúdu o 1A v napájanej cievke.

5.3. KONDENZÁTOR

Označenie: **C** 

V ďalšom budeme predpokladať, že sa jedná o ideálny kondenzátor, bez indukčnosti a odporu. Kondenzátorom nazývame 2 vodivé plochy, ktoré sú izolačne oddelené. Ak na takýto prvok priložíme napätie, na ploche priloženej na kladný pól sa začne hromadiť elektrický náboj, hovoríme že kondenzátor sa nabíja. Pri priložení striedavého prúdu sa periodicky strieda nabíjanie oboch plôch a tak sa zdá, ako by striedavý prúd cez kondenzátor prechádzal.
Veľkosť oboch plôch určuje hodnotu kondenzátora, ktorú nazývame kapacita a označujeme C. Jednotkou kapacity je 1 Farad – 1F.

Definícia jednotky kapacity: Kondenzátor má kapacitu 1F, ak pri priloženom napätí 1V pojme náboj o veľkosti 1 Coulombu, pričom 1 Coulomb je množstvo elektrických nábojov prenesených za 1 sekundu prúdom 1A.

Impedancia kondenzátora:

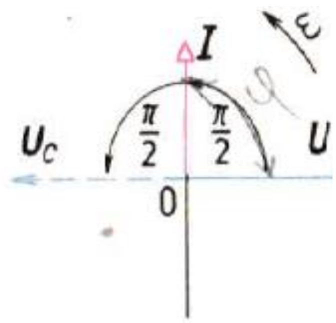
Kondenzátor kladie striedavému prúdu zdanlivý odpor, ktorý označujeme X_C a nazýva sa kapacitný odpor a obecne taktiež impedancia. Platí:

$$X_C = 1 / C \times \omega \qquad \text{pričom} \qquad \omega = 2\Pi \times f$$

Na rozdiel od cievky sa teda impedancia kondenzátora so zvyšovaním frekvencie a zvyšovaním kapacity znižuje.

Fázorový diagram:

Kapacitný odpor posúva fázu medzi napätím a prúdom tak, že prúd predbieha napätie o 90^o, čo znázorňuje nasledovný obrázok:



Obr. 9

Radenie kondenzátorov:

Na rozdiel od rezistorov a cievok sa pri paralelnom radení sčítavajú hodnoty kapacít a pri sériovom radení sa sčítavajú ich prevrátené hodnoty, takže:

$$C_P = C_1 + C_2 + C_3 ....$$

$$\frac{1}{C_S} = \frac{1}{C_1} + \frac{1}{C_2} + \frac{1}{C_3} ....$$

Poznámka: Pri sériovom radení kondenzátorov sa napätie rozdelí na všetky kondenzátory v pomere ich kapacít, pri paralelnom radení je napätie na všetkých kondenzátoroch rovnaké.

Príklad:

Aká je kapacita kondenzátora C v obvode striedavého prúdu, ak:

U = 230 V, f = 50 Hz a I = 1,46 A

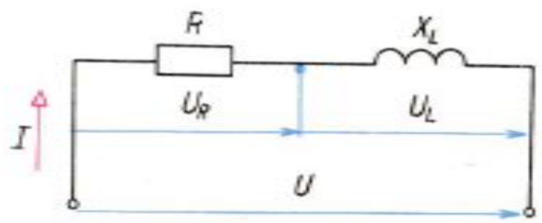
Postup: najprv vypočítame impedanciu kondenzátora X_C z Ohmovho zákona, potom upravíme vzťah pre impedanciu $X_C = 1 / \omega \times C$ na $C = 1 / \omega \times X_C$ a do tohto vzťahu dosadíme dané hodnoty.

$X_C = U / I = 230 / 1,46 = 157\ \Omega$

$C = 1 / 2\Pi \times f \times X_C = 1 / 2 \times 3,14 \times 50 \times 157 = 0,0000202\ F = 20,2\ \mu F$

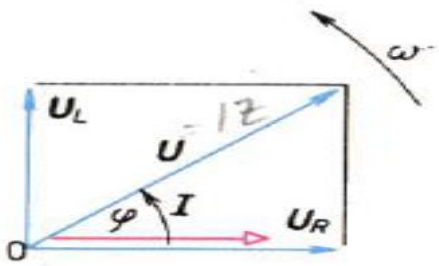
6. <u>ZLOŽENÉ OBVODY STRIEDAVÉHO PRÚDU - SÉRIOVÉ</u>

6.1 REZISTOR A CIEVKA



Obr. 10

Fázorový diagram:



Obr. 11

Fázorový diagram znázorňuje fázor prúdu I, ktorý preteká obidvoma prvkami na osi x, fázor napätia na rezistore U_R, ktorý je s prúdom I vo fáze a fázor napätia na cievke U_L znázornený na osi y, ktorý predbieha fázor prúdu o 90^o. U_R aj U_L sú vektory a výsledné napätie U je ich vektorovým súčtom. Z pravouhlého trojuholníka napätí tvoreného úsečkami U_R, U_L a U vieme pomocou Pytagorovej vety vypočítať U.

$U = \sqrt{U_R^2 + U_L^2}$ a po náhrade U_R za I x R a U_L za I x X_L (Ohmov zákon), dostaneme výsledný vzťah:

$$\mathbf{U = I \times \sqrt{R^2 + X_L^2}}$$

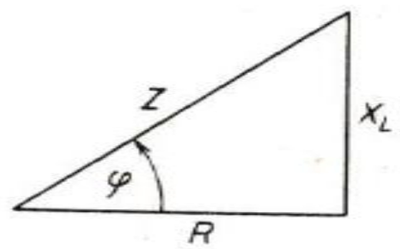
Tento vzťah je vlastne Ohmov zákon v tvare U = I x Z (prúd x impedancia), pričom Z je výraz s odmocninou:

$$\mathbf{Z = \sqrt{R^2 + X_L^2}}$$

Okrem impedancie Z existuje aj jej prevrátená hodnota, ktorú nazývame admitancia a označujeme ju Y. Platí:

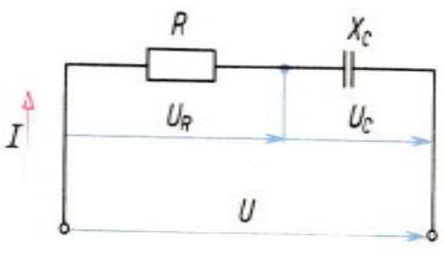
Y = 1 / Z, v tomto prípade $\mathbf{Y = 1 / \sqrt{R^2 + X_L^2}}$

Okrem trojuholníka napätí z fázorového diagramu existuje aj odpovedajúci trojuholník impedancií s rovnakým pomerom strán a uhlom φ:



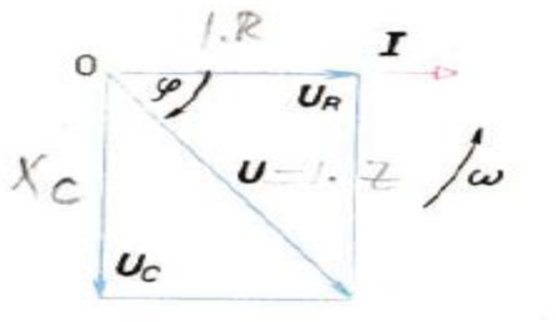
Obr. 12

6.2 REZISTOR A KONDENZÁTOR



Obr. 13

Fázorový diagram:



Obr. 14

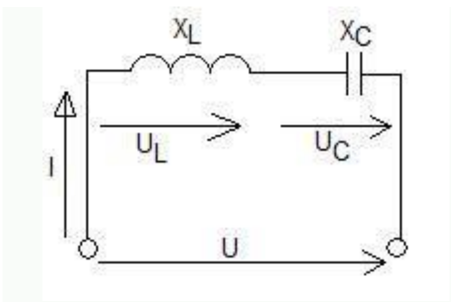
Fázorový diagram zobrazuje fázor prúdu I pretekajúci oboma prvkami na ose x, fázor napätia U_R, ktorý je s fázorom prúdu I vo fáze a fázor napätia na kondenzátore U_C, ktorý je voči prúdu I oneskorený o 90^o. Výsledné napätie U je opäť vektorovým súčtom U_R a U_C. Matematické vyjadrenie U je podľa Pytagorovej vety:

$U = \sqrt{U_R^2 + U_C^2}$ a po náhrade U_R za I x R, resp. U_C za I x X_C dostávame výsledný výraz:

$$\mathbf{U = I \times \sqrt{R^2 + X_C^2}}$$

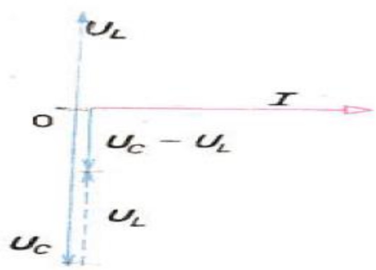
Výraz $\sqrt{\mathbf{R^2 + X_C^2}} = \mathbf{Z}$ a Y je prevrátená hodnota tohto výrazu.

6.3 CIEVKA A KONDENZÁTOR



Obr. 15

Fázorový diagram:



Obr. 16

Fázorový diagram zobrazuje fázor prúdu I, ktorý preteká obomi prvkami na osi x, fázor napätia U_L na osi y smerom hore (predbieha prúd o 90^o) a fázor napätia U_C na osi y smerom dole (oneskoruje sa za prúdom o 90^o). Pri takomto rozložení fázorov U_L a U_C vidíme, že fázory sú vektorovo orientované proti sebe a môže nastať stav, že $U_L > U_C$, alebo $U_L < U_C$. Vektorový súčet, t.j. výsledné napätie U získame ich rozdielom, pričom odpočítame menší fázor od väčšieho. Výsledkom bude rozdiel znázornený fázorom U smerom hore na osi y (ak bolo $U_L > U_C$) alebo smerom dole na osi y (ak bolo $U_L < U_C$).

Príklad:

Máme sériovo zapojenú cievku a kondenzátor, chceme vedieť, aké budú na nich napätia.
L = 12,7 mH, C = 200 μF, I = 5 A, f = 50 Hz

Riešenie:

Najprv si vypočítame hodnoty impedancií L a C:

$X_L = 2\Pi \times f \times L = 2 \times 3{,}14 \times 50 \times 0{,}0127 = 4\ \Omega$

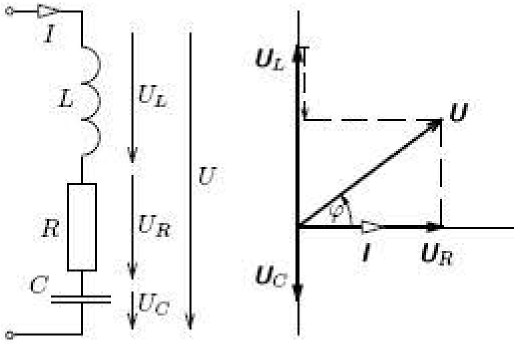
$X_C = 1 / 2\Pi \times f \times C = 1 / 2 \times 3{,}14 \times 50 \times 200 \times 10^{-6} = 16\ \Omega$

Z Ohmovho zákona počítame napätia:

$\mathbf{U_L} = I \times X_L = 5 \times 4 = \mathbf{20\ V}$ $\mathbf{U_C} = I \times X_C = 5 \times 16 = \mathbf{80\ V}$ $\mathbf{U} = 80 - 20 = \mathbf{60\ V}$

6.4 REZISTOR, CIEVKA A KONDENZÁTOR

Schéma a fázorový diagram:



Obr. 17

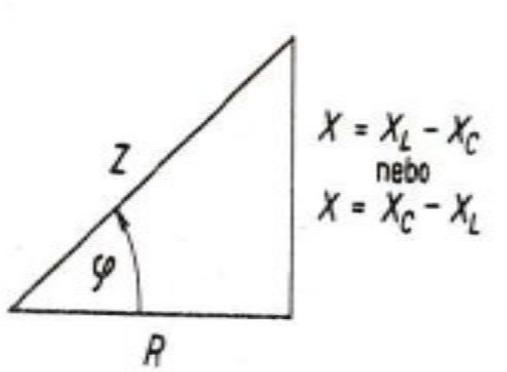
Na osi x je zobrazený fázor prúdu I, pretekajúci cez všetky tri prvky spolu s fázorom U_R (U_R a I sú vo fáze). Na osi y sú vynesené podobne ako v minulom prípade fázory U_L a U_C, pričom opäť môžu nastať prípady, že $U_L > U_C$, alebo $U_L < U_C$. Na obrázku č. 18 sme zvolili $U_L > U_C$ a potom pomocou Pytagorovej vety vypočítame výsledné napätie U:

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

Výraz $\mathbf{\sqrt{R^2 + (X_L - X_C)^2} = Z}$, jeho prevrátená hodnota je Y.

V prípade, ak je $U_C > U_L$, potom $\mathbf{U = I \times \sqrt{R^2 + (X_C - X_L)^2}}$ a výraz s odmocninou sa rovná Z.

Aj pri tejto sériovej kombinácii existuje okrem trojuholníka napätí aj trojuholník impedancií:



Obr. 18

Príklad:

Určite napätia na prvkoch sériovej kombinácie a výsledné napätie U, ak:
R = 14,5 Ω, L = 0,2 H, C = 150 mF, I = 5 A a f = 50 Hz

Riešenie:

Najprv vypočítame impedancie X_L a X_C:

$X_L = 2\Pi \text{ x } f \text{ x } L = 2 \text{ x } 3{,}14 \text{ x } 50 \text{ x } 0{,}2 = 62{,}8\ \Omega$

$X_C = 1 / 2\Pi \text{ x } f \text{ x } C = 1 / 2 \text{ x } 3{,}14 \text{ x } 50 \text{ x } 150 \text{ x } 10^{-6} = 21{,}2\ \Omega$

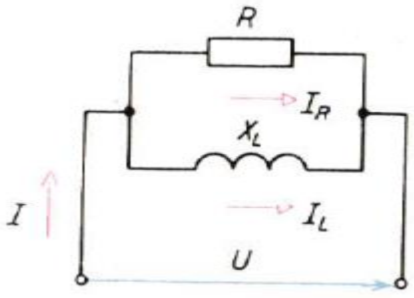
Ďalej použijeme Ohmov zákon:

$\mathbf{U_R} = I \text{ x } R = 5 \text{ x } 14{,}5 = \mathbf{72{,}5\ V}$
$\mathbf{U_L} = I \text{ x } X_L = 5 \text{ x } 62{,}8 = \mathbf{314\ V}$
$\mathbf{U_C} = I \text{ x } X_C = 5 \text{ x } 21{,}2 = \mathbf{106\ V}$

$\mathbf{U} = \sqrt{}\ U_R^2 + (U_L - U_C)^2 = \sqrt{}\ 72{,}5^2 + (314 - 106)^2 = \sqrt{}\ 48\,520 = \mathbf{220\ V}$

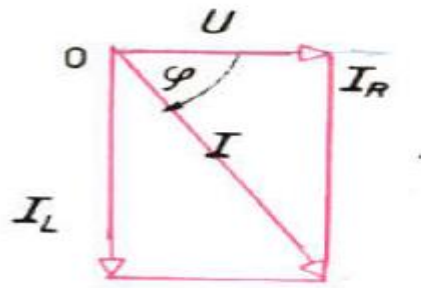
7. ZLOŽENÉ OBVODY STRIEDAVÉHO PRÚDU - PARALELNÉ

7.1. REZISTOR A CIEVKA



Obr. 19

Fázorový diagram



Obr. 20

Pri paralelnom zapojení prvkov je na oboch rovnaké napätie U, jeho fázor umiestnime vo fázorovom diagrame na os x. Na osi x sa bude nachádzať aj fázor prúdu I_R, ktorý je s napätím U vo fáze. Fázor prúdu I_L bude znázornený na osi y smerom dole, bude teda o 90^o voči fázoru napätia oneskorený. Po vektorovom sčítaní fázorov prúdov dostávame fázor celkového prúdu I a tým sme získali aj pravouhlý trojuholník prúdov. Pre výpočet celkového prúdu I použijeme Pytagorovu vetu:

$I = \sqrt{} \, I_R^2 + I_L^2$ a nahradením $I_R = U / R$ a $I_L = U / X_L$ dostávame $I = \sqrt{} \, (U^2 / R^2 + U^2 / X_L^2)$

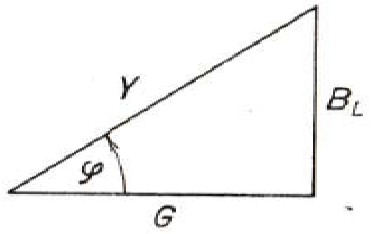
a následne: $\mathbf{I = U \times \sqrt{} \, 1 / R^2 + 1 / X_L^2}$

Ak v Ohmovom zákone $I = U / Z$ nahradíme $1 / Z$ za Y, tak dostaneme tvar: $I = U \times Y$. To znamená, že výraz $\sqrt{} \, 1 / R^2 + 1 / X_L^2 = Y$. Po dosadení $\omega \times L$ miesto X_L a po úprave na spoločného menovateľa dostávame:

$$\mathbf{Y = \frac{\sqrt{(R^2 + \omega^2 L^2)}}{R \omega L}}$$

Z je prevrátenou hodnotou tohto výrazu.

Okrem trojuholníka prúdov existuje aj trojuholník vodivostí so stranami Y - admitancia, G - vodivosť a B_L – susceptancia (jalová indukčná vodivosť), ktorá je prevrátenou hodnotou X_L.



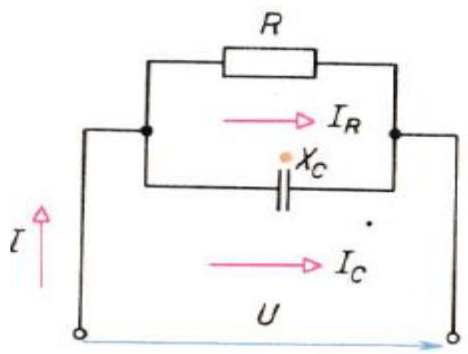
Obr. 21

Z trojuholníka vodivostí si vieme odvodiť:

cos φ = G / Y a keďže G = 1 / R a Y = 1 / Z, tak platí aj to, že **cos φ = Z / R**

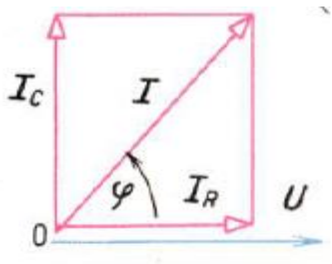
sin φ = B_L / Y a keďže B_L = 1 / ω x L a Y = 1 / Z, tak platí aj **sin φ = Z / ω x L**

7.2 REZISTOR A KONDENZÁTOR



Obr. 22

Fázorový diagram



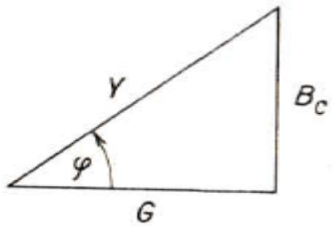
Obr. 23

Napätie je aj v tomto prípade rovnaké na oboch prvkoch a jeho fázor U je umiestnený na osi x. Na osi x je aj fázor prúdu I_R, ktorý je s napätím vo fáze. Prúd I_C predbieha napätie o 90° a jeho fázor je teda umiestnený na osi y smerom hore. Po vektorovom sčítaní získame pravouhlý trojuholník prúdov a pomocou Pytagorovej vety vypočítame celkový prúd I:

I = $\sqrt{}\ I_R^2 + I_C^2 = \sqrt{}\ U^2 / R^2 + U^2 \times \omega^2 C^2 =$ **U x √ 1 / R² + ω² C²**

Výraz **√ 1 / R² + ω² C² = Y** a jeho prevrátená hodnota je Z.

Okrem trojuholníka prúdov existuje aj trojuholník vodivostí so stranou B_C, čo je opäť susceptancia (jalová kapacitná vodivosť), a predstavuje prevrátenú hodnotu X_C.



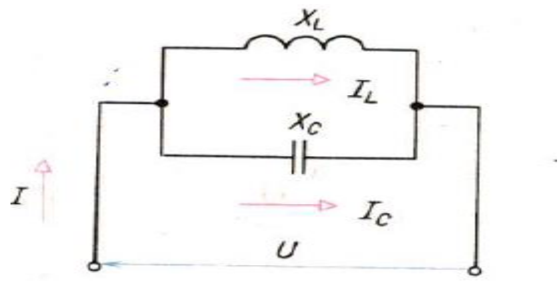
Obr. 24

Z trojuholníka vodivostí si vieme odvodiť:

$\cos \varphi = G / Y$ a po dosadení $G = 1 / R$ a $Y = 1 / Z$ platí aj **$\cos \varphi = Z / R$**

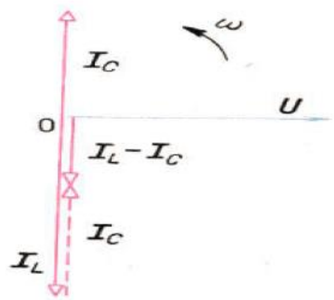
$\sin \varphi = B_C / Y$ a po dosadení $B_C = \omega \times C$ a $Y = 1 / Z$ platí aj **$\cos \varphi = Z \times \omega \times C$**

7.3 CIEVKA A KONDENZÁTOR



Obr. 25

Fázorový diagram



Obr. 26

Napätie U je na oboch prvkoch rovnaké a jeho fázor je znázornený na osi x. Fázor prúdu I_L je umiestnený na osi y smerom dole (oneskoruje sa voči napätiu o 90^o) a fázor prúdu I_C je smerovaný na osi y smerom hore (predbieha napätie o 90^o). Sú dve možnosti, alebo je $I_L > I_C$, alebo je $I_L < I_C$. Keďže sú fázory opačne smerované, výsledný fázor I získame odpočítaním menšieho fázoru od väčšieho. Ak si zvolíme, že $I_L > I_C$, potom:

$$I = \frac{U}{\omega L} - U\omega C = U\left(\frac{1}{\omega L} - \omega C\right) = \mathbf{U\left(\frac{1 - \omega^2 LC}{\omega L}\right)}$$

Z Ohmovho zákona je jasné, že výraz v zátvorke sa rovná B_L (jalová indukčná vodivosť, čiže susceptancia). Jej prevrátená hodnota sa rovná X_L. Ak je $I_L < I_C$, potom $I = U\omega C - U / \omega L$ a po úprave:

$$\mathbf{I = U\left(\frac{\omega^2 LC - 1}{\omega L}\right)}$$

Výraz v zátvorke sa rovná B_C (jalová kapacitná vodivosť, susceptancia).

Príklad:

Ak máme L = 3 H, C = 20 μF, U = 230 V a f = 50 Hz, chceme vedieť aký je prúd I.

Riešenie:

Najprv vypočítame X_L a X_C a následne použijeme Ohmov zákon:

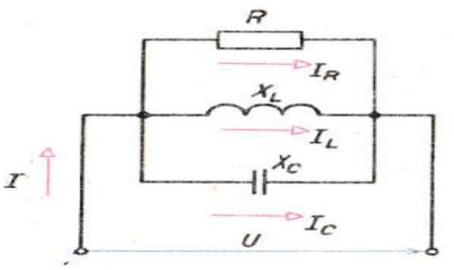
$X_L = \omega \times L = 2 \times 3{,}14 \times 50 \times 3 = 942\ \Omega$

$X_C = 1 / \omega \times C = 1 / 2 \times 3{,}14 \times 50 \times 20 \times 10^{-6} = 159{,}2\ \Omega$

$I_L = U / X_L = 230 / 942 = 0{,}24$ A $\qquad$ $I_C = U / X_C = 230 / 159{,}2 = 1{,}44$ A

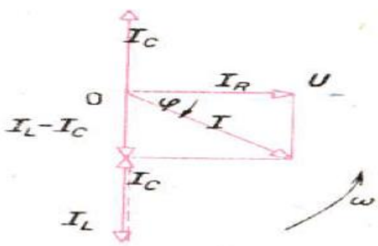
$I = I_C - I_L = 1{,}44 - 0{,}24 = 1{,}2$ A

7.4 REZISTOR, CIEVKA A KONDENZÁTOR



Obr. 27

Fázorový diagram



Obr. 28

Napätie U je na všetkých troch prvkoch rovnaké a jeho fázor je znázornený na osi x. Taktiež je na osi x umiestnený aj fázor prúdu cez rezistor I_R, ktorý je s napätím vo fáze. Fázor prúdu I_L je umiestnený na osi y smerom dole (oneskoruje sa voči napätiu o 90°) a fázor prúdu I_C je smerovaný na osi y smerom hore (predbieha napätie o 90°). Sú dve možnosti, alebo je $I_L > I_C$, alebo je $I_L < I_C$. Ak si zvolíme $I_L > I_C$, potom výsledný prúd I opäť vypočítame pomocou Pytagorovej vety:

$$\mathbf{I} = \sqrt{I_R^2 + (I_L - I_C)^2} = U \text{ x } \sqrt{1 / R^2 + (1 / X_L - 1 / X_C)^2} = \mathbf{U \text{ x } \sqrt{G^2 + (B_L - B_C)^2}}$$

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

$$\mathbf{\cos \varphi = I_R / I} = (U / R) / (U / Z) = \mathbf{G / Y = Z / R}$$

Príklad:

Máme zadané: $R = 44\ \Omega$, $L = 0{,}7$ H, $C = 50\ \mu F$, $U = 230$ V, $f = 50$ Hz a máme vypočítať hodnoty I_R, I_L, I_C, I, Z, Y a cos φ.

Riešenie:

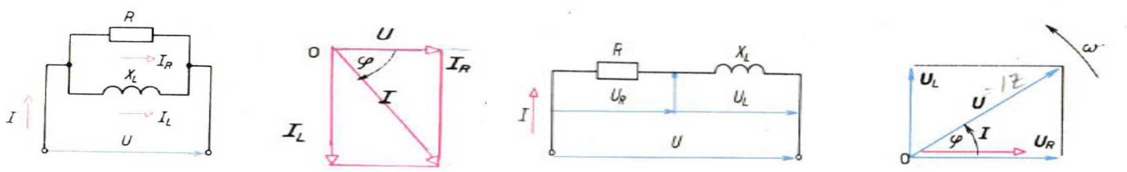
$I_R = U / R = 230 / 44 = 5{,}2$ A
$I_L = U / \omega \text{ x } L = 230 / 2 \text{ x } 3{,}14 \text{ x } 50 \text{ x } 0{,}7 = 1$ A
$I_C = U \text{ x } \omega \text{ x } C = 230 \text{ x } 2 \text{ x } 3{,}14 \text{ x } 50 \text{ x } 50 \text{ x } 10^{-6} = 3{,}61$ A

$I = \sqrt{I_R^2 + (I_C - I_L)^2} = \sqrt{5{,}2^2 + (3{,}61 - 1)^2} = \sqrt{32} = 5{,}6$ A

$Z = U / I = 230 / 5{,}6 = 41\ \Omega$
$Y = 1 / Z = 0{,}024$ S
$\cos \varphi = Z / R = 41 / 44 = 0{,}9318$

8. DUÁLNE OBVODY STRIEDAVÉHO PRÚDU

Duálne obvody striedavého prúdu sú obvody, ktoré môžeme v schéme nejakého zariadenia napájaného striedavým prúdom navzájom zameniť, bez toho aby sa zmenila činnosť a technické parametre zariadenia. To znamená, že duálne obvody musia mať zhodnú impedanciu Z a fázový uhol φ. Podmienkou náhrady duálnym obvodom je aj požiadavka zhodnej frekvencie. Typickým prípadom duálnych obvodov je náhrada paralelnej kombinácie R a L za sériovú kombináciu.



Obr. 29

Pre prepočet prvkov L a R paralelného obvodu na sériový sú vzťahy nasledovné:

$$\mathbf{R_S = R_P \times X_{LP}^2 / (R_P^2 + X_{LP}^2)} \quad \text{a} \quad \mathbf{X_S = R_P^2 \times X_{LP} / (R_P^2 + X_{LP}^2)}$$

Pre prepočet prvkov L a R zo sériového obvodu na paralelný platia nasledovné vzťahy:

$$\mathbf{R_P = (R_S^2 + X_{LS}^2) / R_S} \quad \text{a} \quad \mathbf{X_P = (R_S^2 + X_{LS}^2) / X_{LS}}$$

Príklad:

Máme sériový obvod s prvkami: $R_S = 30\ \Omega$ a $L_S = 100$ mH, úlohou je nahradiť ho duálnym paralelným obvodom, ak f = 100 Hz a U = 100 V.

Riešenie:

Najprv vypočítame impedanciu X_{LS} a následne počítame R_P a X_P podľa hore uvedených vzťahov.

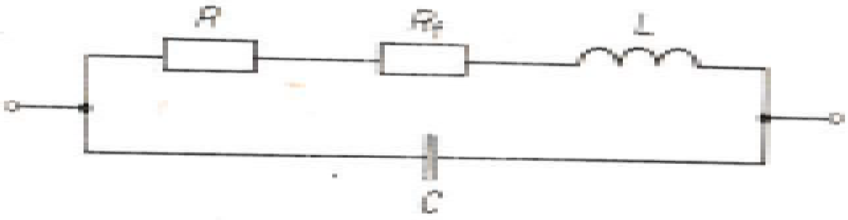
$X_{LS} = 2 \times 3{,}14 \times 100 \times 0{,}1 = 62{,}8\ \Omega$

$R_P = (R_S^2 + X_{LS}^2) / R_S = (30^2 + 62{,}8^2) / 30 = 161{,}46\ \Omega$

$X_P = (R_S^2 + X_{LS}^2) / X_{LS} = (30^2 + 62{,}8^2) / 62{,}8 = 77{,}13\ \Omega$

9. NÁHRADNÁ SCHÉMA PRVKOV R, L, C

9.1 REZISTOR



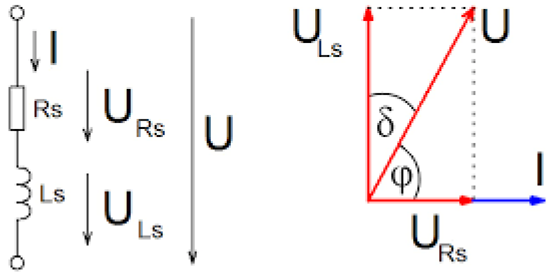
Obr. 30

Náhradná schéma reálneho rezistora má okrem ideálneho odporu R naviac vlastnú indukčnosť L, kapacitu C a odpor R_f.

Vlastná indukčnosť vzniká pri vinutí rezistora odporovým vodičom, alebo pri dostavovaní hodnoty rezistora rytím špirály v naparenej vrstve, kapacitu tvoria dve plochy čiel rezistora, respektíve vzájomná kapacita závitov odporového vodiča. Odpor R_f je spôsobený tzv. povrchovým javom (skin efektom). Pri nízkych frekvenciách preteká elektrický prúd cez celý prierez vodiča a aj po jeho celom povrchu. Pri zvyšovaní frekvencie elektróny tvoriace elektrický prúd silnejšie kmitajú a navzájom sa viac ovplyvňujú. Keďže elektróny sú záporné, zvýšené ovplyvňovanie sa prejaví ich vzájomnou odpudivosťou, ktorá nakoniec spôsobí, že sa vytesnia na povrch vodiča a tečú len po jeho povrchu. Toto spôsobí zvýšenie odporu rezistora, ktoré je úmerné výške frekvencie striedavého prúdu. Pri frekvencii 50 Hz je R_f zanedbateľný.

9.2 CIEVKA

Náhradná schéma a fázorový diagram:



Obr. 31

Reálna cievka má okrem ideálnej vlastnej indukčnosti L ešte sériovo priradený odpor vinutia R a tiež kapacitu C, ktorá je k tejto kombinácii priradená paralelne. Táto kapacita je sústavou sériovo radených kapacít medzi závitmi a má zanedbateľnú hodnotu. Odpor R je daný odporom vodiča cievky, kde sa prejavuje aj jeho povrchový jav. Kapacia C sa zanedbáva a posudzuje sa len kombinácia L a R, pričom odpor R môže byť pripojený k cievke sériovo alebo paralelne. Hodnota je v oboch prípadoch rovnaká, jedná sa o duálne obvody.

Pre posudzovanie kvality cievky je dôležitý uhol δ, ktorý je doplnkom uhlu φ do 90°. Tento uhol sa nazýva stratový uhol a jeho tg δ sa nazýva stratový činiteľ cievky.

Pre sériovú kombináciu je $\mathbf{tg\,\delta} = U_R / U_L = I \text{ x } R_S / I \text{ x } X_{LS} = \mathbf{R_S / \omega \text{ x } L_S}$

Pre paralelnú kombináciu je $\mathbf{tg\,\delta} = I_R / I_L = \mathbf{\omega \text{ x } L_P / R_P}$

Prevrátenou hodnotou oboch tg δ je Q označované ako kvalita cievky a platí:

$$\mathbf{Q = \omega \text{ x } L_S / R_S = R_P / \omega \text{ x } L_P}$$

Príklad 1:

Aké je Q cievky pri L = 2 mH, f = 500 Hz a pri paralelnej kombinácii odporu R = 150 Ω ?

Riešenie:

$X_P = \omega \text{ x } L_P = 2 \text{ x } 3{,}14 \text{ x } 500 \text{ x } 0{,}002 = 6{,}28\ \Omega$

$Q = R_P / X_P = 150 / 6{,}28 = 23{,}9$

Príklad 2:

Aká je indukčnosť cievky L pri f = 50 Hz a Q = 40, ak je paralelný stratový odpor = 150 Ω ?

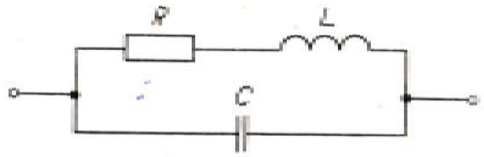
Riešenie:

$Q = R_P / X_P$ z čoho $X_P = R_P / Q = 50 / 40 = 1{,}25\ \Omega$

$X_P = \omega \text{ x } L$ z čoho $L = X_P / \omega = 1{,}25 / 2 \text{ x } 3{,}14 \text{ x } 50 = 0{,}004 \text{ H} = 4 \text{ mH}$

9.3 Kondenzátor

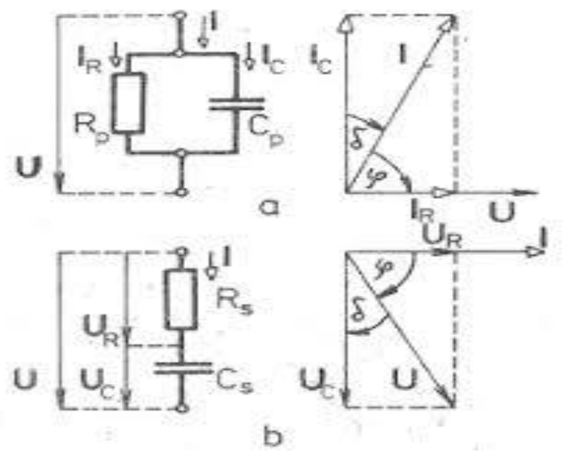
Náhradná schéma:



Obr. 32

Reálny kondenzátor má okrem ideálnej kapacity C pripojenú sériovú kombináciu indukčnosti L a odporu R. Indukčnosť tvoria zrolované zvitky vodivých polepov kondenzátora (oddelených izolačným polepom) a indukčnosť prívodov, odpor R sa skladá z R_{IZ} – izolačný odpor, R_f – odpor spôsobený povrchovým javom a R_d – odpor strát v dielektriku. Pretože indukčnosť nadobúda malé hodnoty, je obvykle zanedbávaná a náhradná schéma sa zmenší na paralelnú alebo sériovú kombináciu kapacity a odporu, ide o duálne obvody.

Zjednodušené náhradné schémy a fázorové diagramy:



Obr. 33

Rovnako ako u cievky aj tu máme stratový uhol δ, ako doplnok uhlu φ do 90° a tg δ – stratový činiteľ kapacity, pre príslušné typy kondenzátorov uvádzaný v katalógoch súčiastok.

V sériovej kombinácii je **$\mathrm{tg}\,\delta = U_R / U_C$** a po náhrade U za R_S x I a U_C za X_C x I = **$\omega R_S C_S$**

V paralelnej kombinácii je **$\mathrm{tg}\,\delta = I_R / I_C$** a po obdobnej náhrade = **$1 / \omega \times R_P \times C_P$**

Príklad:

Aký je stratový odpor R a impedancia X_C pre sériové zapojenie, ak tg δ = 0,015, C = 31,8 μF a f = 50 Hz ?

Riešenie:

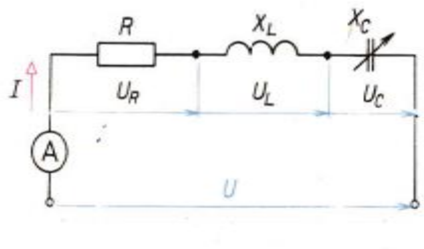
$\mathrm{tg}\,\delta = \omega \times R \times C$, z toho $R = \mathrm{tg}\,\delta / \omega \times C = 0{,}015 / (2 \times 3{,}14 \times 50 \times 31{,}8 \times 10^{-6}) = 1{,}5\ \Omega$

$X_C = 1 / \omega \times C = 1 / (2 \times 3{,}14 \times 50 \times 31{,}8 \times 10^{-6}) = 100\ \Omega$

10. REZONANCIA

Rezonancia môže nastať v obvodoch striedavého prúdu, ak obsahujú odpor, indukčnosť a kapacitu pri určitej frekvencii. Je to stav, keď sa kondenzátor periodicky vybíja a nabíja prúdom z cievky. V takomto stave obvodu je $X_C = X_L$ a zdroj napätia obvodu je zaťažený iba reálnym odporom R. Napätie a prúd sú vo fáze.

10.1 Sériová rezonancia

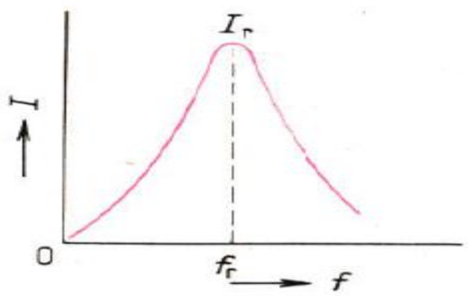


Obr. 34

Obvod obsahuje rezistor, cievku a premennú kapacitu. Môže nastať prípad, že $X_C > X_L$, alebo opačná možnosť. Budeme uvažovať $X_C > X_L$ a potom vieme vyjadriť celkovú impedanciu:

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

Ak budeme zvyšovať kapacitu, bude sa X_C zmenšovať a tým sa bude zmenšovať aj hodnota výrazu $X_C - X_L$. Pri dosiahnutí stavu keď $X_C = X_L$ sa ich impedancie vynulujú a ostala len hodnota rezistora R, čo je najmenšia možná hodnota impedancie v obvode. Takémuto stavu obvodu hovoríme sériová rezonancia. Pri rezonancii teda prechádza podľa ohmovho zákona najväčší prúd, ktorý je vo fáze s napätím zdroja. Priebeh veľkosti prúdu v okolí bodu rezonancie (rezonančnú krivku prúdu) ukazuje nasledovný obrázok:



Obr. 35

Vidíme, že ak po dosiahnutí rezonancie ďalej zvyšujeme hodnotu kapacity, tak $X_L > X_C$ a rozdiel impedancií sa bude zvyšovať, čím bude následne klesať hodnota prúdu.
Sériovú rezonanciu sme v tomto prípade dosiahli zmenou kapacity, ale tak isto ju môžeme dosiahnuť aj zmenou indukčnosti, resp. pri nemennej hodnote indukčnosti a kapacity zmenou frekvencie napájacieho napätia. Vzťah medzi hodnotami indukčnosti, kapacity a rezonančnou

frekvenciou udáva Thompsonov vzorec odvodený z rovnosti impedancií indukčnosti a kapacity pri rezonancii.

$\omega_r L = 1 / \omega_r C$ ... po úprave $\boldsymbol{\omega_r = 1 / \sqrt{L C}}$ ... a po dosadení $\omega = 2\Pi f$

$$\mathbf{f_r = \frac{1}{2\Pi \sqrt{L C}}}$$

Príklad:

Vypočítajte f_r, U_L a U_C v obvode kde R = 14,5 Ω, L = 0,2 H, C = 150 μF a U = 230 V.

Riešenie:

$f_r = 1 / 2 \times 3{,}14 \times \sqrt{0{,}2 \times 150 \times 10^{-6}} = 29$ Hz

$I_r = U / R = 230 / 14{,}5 = 15{,}8$ A

$U_r = R \times I_r = 14{,}5 \times 15{,}8 = 230$ V

$X_L = 2\Pi f \times L = 6{,}28 \times 29 \times 0{,}2 = 36{,}5\ \Omega$

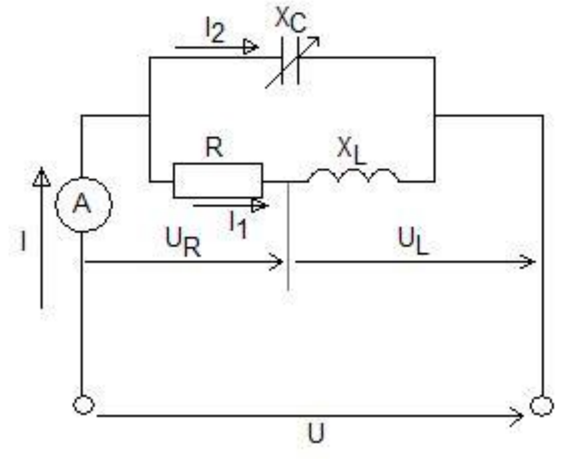
$X_C = 1 / 2\Pi f \times C = 1 / 6{,}28 \times 29 \times 150 \times 10^{-6} = 36{,}5\ \Omega$

$U_L = U_C = X_C \times I_r = X_L \times I_r = 36{,}5 \times 15{,}8 = 576$ V !!!

Záver:

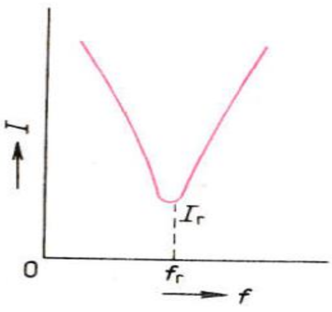
Pri sériovej rezonancii sa impedancie X_L a X_C rovnajú a na prvkoch L a C sa objaví napätie značne prevyšujúce napätie napájacieho zdroja. Z uvedeného dôvodu sa sériovej rezonancii hovorí aj napäťová rezonancia.

10.2 Paralelná rezonancia



Obr. 36

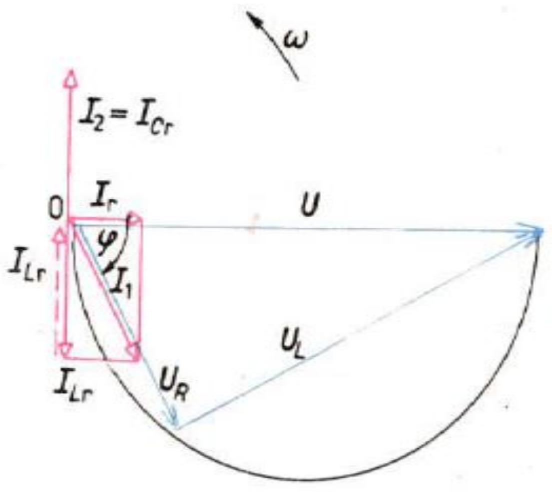
Pri paralelnej rezonancii jednoduchej paralelnej kombinácie L a C platí rovnako ako pri sériovej rezonancii, že pri rezonancii sa impedancie L a C rovnajú. Keďže napätie je na oboch prvkoch rovnaké, rovnaké budú aj prúdy cez tieto prvky. Vieme, že fázovo sú tieto prúdy I_L a I_C orientované proti sebe a tak bude výsledný prúd I = 0. Pri reálnom paralelnom obvode z obrázku 36 však berieme do úvahy aj reálny odpor závitov cievky a tento odpor spôsobí, že skutočný výsledný prúd I nebude nulový, ale bude minimálny. Frekvenčnú krivku prúdu reálneho paralelného obvodu ukazuje nasledovný obrázok:



Obr. 37

Podobne ako pri sériovej rezonancii dostávame paralelnú rezonanciu zmenou indukčnosti alebo kapacity, resp. zmenou frekvencie napájacieho zdroja.

Fázorový diagram



Obr. 37

Vidíme, že prúd I_1 pretekajúci cez R a L je fázovo posunutý o uhol φ voči napájaciemu napätiu. Tento prúd si rozložíme na zložku I_R a I_{Lr}. Rezonancia nastane, ak $I_{Lr} = I_{Cr}$.

$\mathbf{I_{Lr}} = \sin\varphi \times I_1 = X_L / Z_1 \times U / Z_1 = UX_L / Z_1^2$ (sin φ sme vyjadrili z trojuholníka impedancií a I_1 z ohmovho zákona).

$\mathbf{I_{Cr}} = U \times \omega \times C$

Rovnicu $UX_L / Z_1^2 = U\omega_r C$ upravíme a dostávame výsledok:

$\omega_r = \sqrt{1 / LC - R^2 / L^2}$ a po dosadení $\omega = 2\Pi f$:

$$\mathbf{f_r = \frac{1}{2\Pi} \sqrt{(1 / LC - R^2 / L^2)}}$$

V prípade ak je R zanedbateľný výraz R^2 / L^2 vypadne a dostávame známy Thompsonov vzorec:

$$\mathbf{f_r = \frac{1}{2\Pi \sqrt{L\,C}}}$$

Ďalej platí: $\mathbf{I_R = U / Z_R}$ a $\mathbf{Z_R = L / CR}$

Príklad:

Určte fr, Z_r a I_r, ak $R = 40\ \Omega$, $L = 0{,}6$ H, $C = 50\ \mu F$, $U = 230$ V a $f = 50$ Hz

Riešenie:

$f_r = 1 / 2\Pi \sqrt{1 / LC - R^2 / L^2} = 1 / 2\Pi \sqrt{1 / 0{,}6 \times 50 \times 10^{-6} - 40^2 / 0{,}6^2} = 27{,}6$ Hz

$Z_r = L / CR = 0{,}6 / 50 \times 10^{-6} \times 40 = 300\ \Omega$

$I_r = U / Z_r = 230 / 300 = 0{,}76$ A

Poznámka k rezonancii:

Rezonancia existuje aj v oblasti mechaniky, do rezonancie sa môže dostať napríklad most. Most sa dostane do rezonancie vtedy, keď sa na jeho nosnú časť pôsobí opakovanými tlakovými impulzmi v rytme jeho rezonančnej frekvencie. Postupne sa rozkmitáva so zvyšujúcou sa intenzitou a mohlo by dôjsť aj k jeho zničeniu. Preto sa a pred uvedením do prevádzky skúškami zisťuje jeho rezonančná frekvencia, ktorá samozrejme musí byť mimo možnej oblasti frekvencií generovaných v reálnej prevádzke.

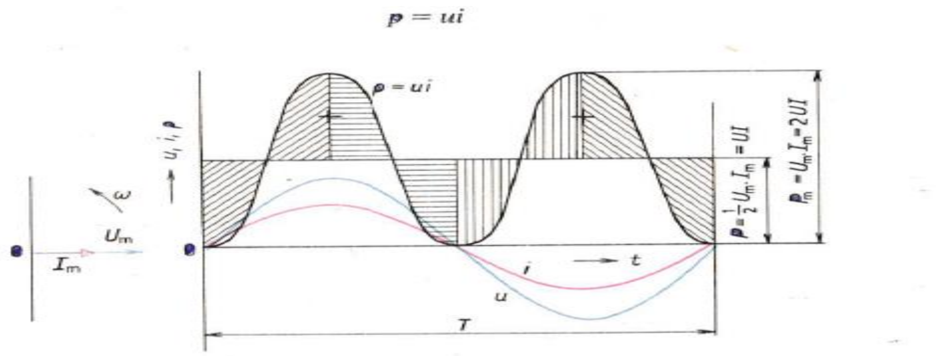
11. VÝKON A PRÁCA V OBVODE STRIEDAVÉHO PRÚDU

11.1 Výkon v obvode striedavého prúdu

Okamžitý výkon je súčin okamžitých hodnôt U a I, takže platí:

$$P = U \times I$$

Priebeh výkonu pre prípad, že U a I sú vo fáze ukazuje obrázok:



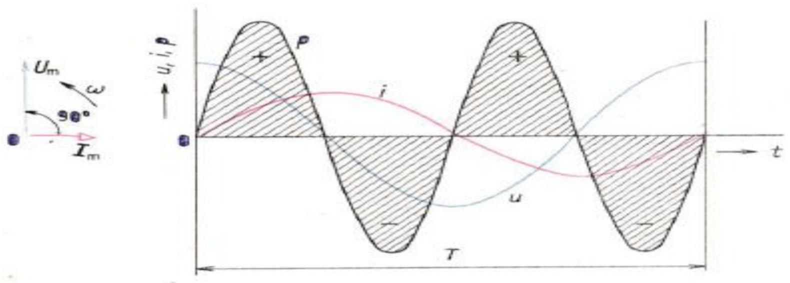
Obr. 38

Obrázok ukazuje, že krivka výkonu je kladná aj pri záporných polvlnách U a I a má voči nim dvojnásobnú frekvenciu. Ak zameníme plochy kriviek za plošne zhodný obdĺžnik so základňou T, dostaneme úroveň výkonu P. Vidíme, že horná strana obdĺžnika dosahuje presne polovicu výšky krivky a teda platí:

$P = 0{,}5 \times U_m \times I_m$ a ak zameníme U_m za $\sqrt{2} \times U$ a I_m za $\sqrt{2} \times I$, dostaneme **P = U x I**

Záver: ak je U a I vo fáze, výkon sa rovná súčinu ich efektívnych hodnôt.

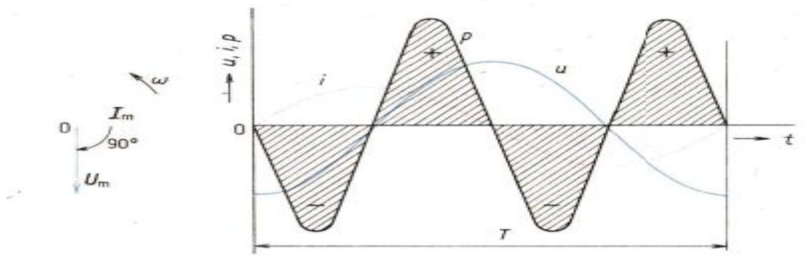
Ďalší obrázok znázorňuje stav, keď napätie predbieha prúd o 90^o, jedná sa o záťaž ideálnou indukčnosťou.



Obr. 39

V takomto prípade prechádza krivka výkonu symetricky nad aj pod nulovú úroveň a stredná hodnota výkonu = 0. V cievke sa totiž v prvej štvrtine periódy vytvorí magnetické pole a práca prúdu sa mení na energiu magnetického poľa. Počas druhej štvrtiny periódy magnetické pole zaniká a jeho energia sa elektromagnetickou indukciou mení na elektrickú a vracia sa do zdroja.

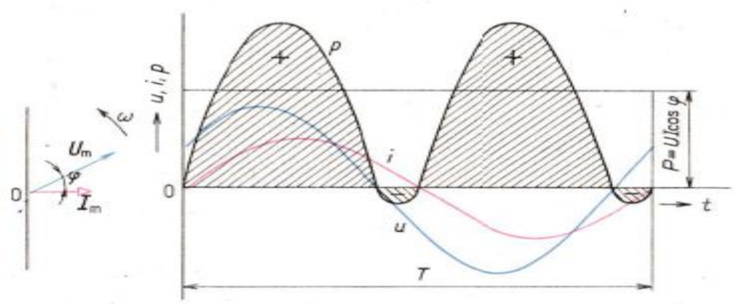
Na ďalšom obrázku je znázornený stav priebeh okamžitého výkonu v obvode s ideálnou kapacitou a teda prúd predbieha napätie o 90^o.



Obr. 40

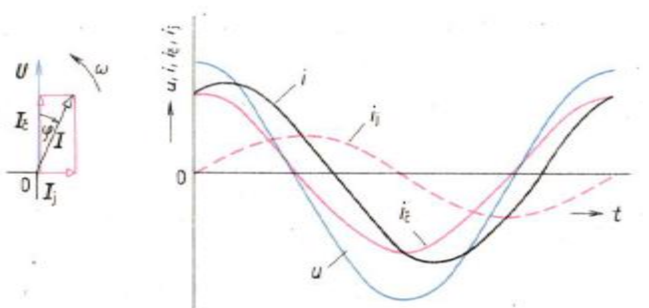
Situácia je obdobná ako v minulom prípade, krivka okamžitého výkonu je symetricky umiestnená nad a pod nulovou úrovňou a stredná hodnota výkonu sa = 0. Behom prvej štvrtiny periódy sa kondenzátor nabíja a vytvára sa v ňom elektrické pole. Práca elektrického prúdu sa teda mení na energiu elektrického poľa. Počas druhej štvrtiny periódy sa kondenzátor vybíja, elektrické pole zaniká a jeho energia sa mení na elektrickú energiu, ktorá sa vracia do zdroja.

Na obrázku 41 je znázornený priebeh okamžitého výkonu v obvode, ktorý má indukčný charakter a obsahuje aj odpor R.



Obr. 41

Fázorový diagram ukazuje fázor U_m fázovo predbiehajúci prúd o uhol φ. V takomto obvode sa odoberá zo zdroja energia a mení sa na užitočnú prácu v spotrebiči, ale časť energie sa v cievke mení na magnetické pole. Zmenšovaním prúdu toto pole slabne a jeho energia sa vracia späť do zdroja. Výkon v takomto prípade určíme tak, že fázor prúdu I rozložíme na 2 zložky. Jedna zložka bude vo fáze s napätím U a je to činný prúd $I_\varepsilon = I \times \cos \varphi$, druhá zložka je kolmá na napätie a jedná sa o jalový prúd $I_j = I \times \sin \varphi$. Priebeh prúdov a rozklad prúdu I ukazuje nasledovný obrázok:



Obr.42

Elektrickú prácu vykonáva iba činný prúd I_ε a preto pre výkon platí:

$$P = U \times I \times \cos \varphi$$

Jednotkou výkonu je 1 Watt (1W) a vyššie jednotky sú 1 kW, 1 MW. Činný výkon teda závisí od veľkosti uhla φ, jeho cosínus sa nazýva **účinník**.

Jalový prúd prácu nekoná, ale veľkosť jalového výkonu vieme určiť zo vzťahu:

$$Q = U \times I \times \sin \varphi$$

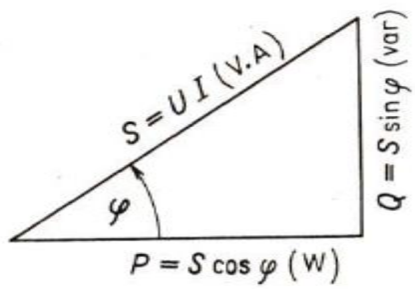
Jednotkou jalového výkonu ja 1 VAR, vyššie jednotky sú kVAR, MVAR.

Vo vzťahoch pre činný aj jalový výkon sa nachádza súčin U x I. Je to tzv. zdanlivý výkon a označuje sa písmenom S.

$$S = U \times I$$

Zdanlivý výkon sa používa na dimenzovanie elektrických strojov a rozvodných sietí a počíta sa z údajov voltmetra a ampérmetra. Jeho jednotkou je 1 VA, vyššie jednotky sú kVA, MVA.

Na základe hore uvedených skutočností vieme zostrojiť trojuholník výkonov striedavého prúdu tak, že trojuholník prúdov (rozklad prúdu I) vynásobíme napätím U:



Obr. 43

Je zrejmé, že platia nasledovné vzťahy:

$$P = S \times \cos \varphi = U \times I_{\varepsilon} \qquad Q = S \times \sin \varphi = U \times I_j \qquad S = \sqrt{P^2 + Q^2} = U \times I$$

$$\cos \varphi = P / S \qquad \sin \varphi = Q / S \qquad \mathrm{tg}\, \varphi = Q / P$$

Z trojuholníka je zrejmé, že ak sa uhol φ = 0, a teda účinník cos φ = 1, tak sú činný výkon a zdanlivý výkon zhodné.

Výkon elektrických strojov sa používa aj na určovanie ich účinnosti η podľa vzťahu:

$$\eta = P_2 / P_1$$

pričom P_1 je vstupný výkon čiže príkon a P_2 je výkon elektrického stroja.

11.2 Práca v obvode striedavého prúdu

Elektrická práca je činný výkon vynásobený časom:

$$\mathbf{W = P \times t = U \times I \times \cos\varphi \times t}$$

Elektrická práca sa meria elektromerom a jej jednotkou je 1 Joule – 1 J, pričom 1 J = 1 Ws (1 W x sekunda). Vyššou jednotkou je Wh (Watthodina), resp. kWh (kilowatthodina).

Príklad:

Máme jednofázový elektromotor s výkonom 300 W, jeho účinnosť je 85 % a účinník (cos φ) = 0,75. Motor je pripojený na napätie 230 V, frekvencia je 50 Hz. Máme vypočítať činný, zdanlivý a jalový výkon.

Riešenie:

Činný výkon vypočítame zo vzťahu pre účinnosť: $P_1 = P / \eta = 300 / 0{,}85 = 353$ W

Pre ďalšie výpočty potrebujeme určiť prúd I odoberaný zo zdroja a z tabuliek určiť sin φ:

Ak $P_1 = U \times I \times \cos\varphi$, tak $I = P_1 / U \times \cos\varphi = 353 / 230 \times 0{,}75 = 2{,}04$ A

V tabuľkách nájdeme, že $\sin\varphi = 0{,}661$

Zdanlivý výkon $S_1 = U \times I = 230 \times 2{,}04 = 469{,}2$ VA

Jalový výkon $Q_1 = S_1 \times \sin\varphi = 469{,}2 \times 0{,}661 = 310$ VAR