4 STRIEDAVÉ OBVODY

Ciele

Po preštudovaní kapitoly by mal byť študent schopný:

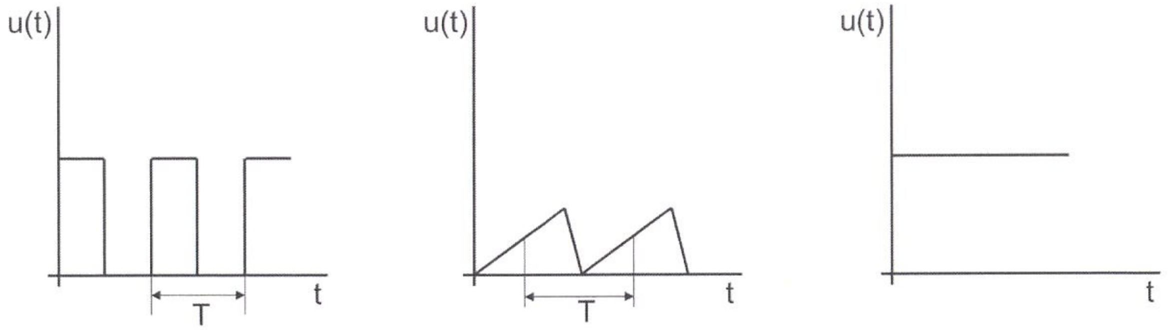
1. Definovať pojmy periodický, striedavý a harmonický priebeh a charakterizovať ich základné parametre
2. Vysvetliť pojem fáza a definovať okamžitú a počiatočnú fázu
3. Uviesť význam efektívnej a strednej hodnoty a ich vzťah k maximálnej hodnote
4. Popísať symbolicko-komplexnú metódu a vysvetliť jej význam pre analýzu v striedavých obvodoch
5. Graficky znázorniť stotožnenie harmonického priebehu s rotujúcim vektorom v Gaussovej rovine
6. Uviesť základné typy pasívnych prvkov používaných v striedavých obvodoch, charakterizovať ich základné vlastnosti a vysvetliť ich chovanie v obvode
7. Definovať základné zákony pre analýzu striedavých elektrických obvodov v symbolicko-komplexnom vyjadrení
8. Pomocou základných zákonov analyzovať jednoduché striedavé elektrické obvody

4.1 Úvod do striedavých veličín a obvodov

Doposiaľ sme sa zaoberali *jednosmernými* elektrickými veličinami, ktorých hodnota bola v čase konštantná. V praxi však majú veľmi veľký význam obvody, v ktorých sa hodnoty elektrických veličín v čase menia. Okamžitá hodnota veličín sa obvykle po nejakom čase opakuje, čo môžeme zapísať:

$$f(t) = f(t + kT)$$

kde k – celé číslo a T – perióda. Takéto priebehy sa nazývajú **periodické** – na Obr. 4.1sú uvedené dva periodické priebehy (a pre porovnanie aj jednosmerný priebeh) napätia.

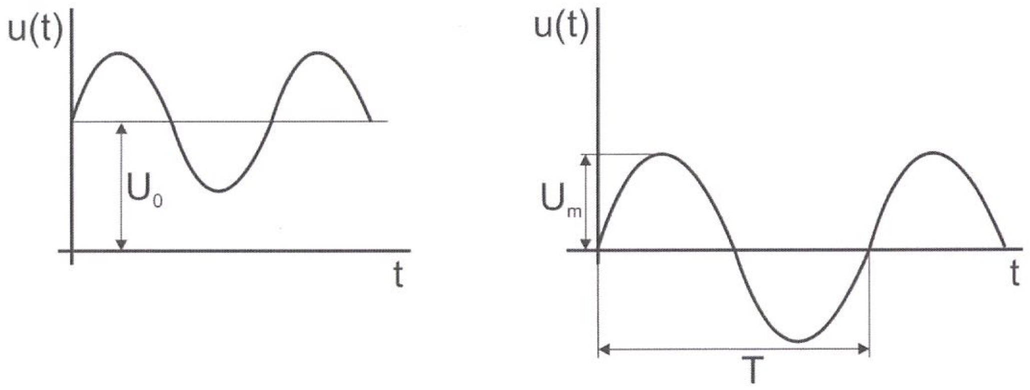


Obr. 4.1Periodické priebehy napätia s vyznačenou periódou (vľavo – obdĺžnikový, v strede – pílovitý) a jednosmerný priebeh napätia (vpravo)

Z uvedeného vyplýva, že **perióda** je doba za ktorú za začne periodický priebeh opakovať. Tento úsek priebehu sa nazýva **cyklus** a počet cyklov za jednotku času nazývame **frekvencia**:

$$\boxed{f = \frac{1}{T}} \tag{4.1}$$

Jednotkou frekvencie je **hertz** [Hz]. Medzi frekvenciou a periódou je teda vzájomne inverzný vzťah – čím väčšia je perióda, tým menšia je frekvencia a naopak. Pre jednosmerné priebehy platí, že frekvencia je nulová a perióda nekonečne veľká.
Špeciálnym prípadom periodických priebehov sú priebehy **kmitavé** resp. **striedavé**. V prípade kmitavých priebehov plochy nad a pod časovou osou nie sú zhodné (Obr. 4.2 vľavo). Striedavé priebehy majú plochu nad a pod časovou osou rovnaké (Obr. 4.2 vpravo). Z Obr. 4.2 vľavo je zrejmé, že z kmitavého priebehu môžeme dostať striedavý priebeh posunutím pozdĺž osi y pričom veľkosť posunutia odpovedá jednosmernej zložke priebehu (na obrázku označené U_0). Priebehy na Obr. 4.2 majú ešte jednu dôležitú vlastnosť – je možné ich popísať pomocou matematickej funkcie *sínus* resp. *kosínus*. Takéto funkcie označujeme ako **harmonické.**



Obr. 4.2 Striedavý priebeh s nenulovou jednosmernou zložkou (kmitavý priebeh – vľavo) a striedavý priebeh s nulovou jednosmernou zložkou s vyznačenou amplitúdou a periódou (vpravo)

☞ *Používanie harmonických veličín v striedavých obvodov má niekoľko výhod z matematického aj technického hľadiska. Matematickou výhodou je to, že súčet dvoch harmonických funkcií s rovnakou frekvenciou je tiež harmonická funkcia s rovnakou frekvenciou. Rovnako aj derivácia a integrál harmonickej funkcie s určitou frekvenciou je harmonická funkcia s tou istou frekvenciou. Z technického hľadiska je výhodou ľahká výroba elektrického napätia v podobe harmonickej funkcie pomocou najčastejšieho typu elektrického zdroja – alternátora. V sieti má napätie štandardne harmonický priebeh s frekvenciou 50 Hz (t.j. počet cyklov za jednotku času je 50). V niektorých krajinách (napr. USA a Japonsko) sa používa iná sieťová frekvencia, a to 60 Hz.*

Pre charakterizovanie harmonických priebehov už nestačí jedna hodnota ako to bolo u jednosmerných veličín, pretože *okamžitá hodnota* týchto priebehov sa v čase mení. Pre označenie striedavých veličín budeme používať malé písmeno. Všeobecne možno harmonický prúd (podobne aj napätie) napísať pomocou nasledujúcej funkcie:

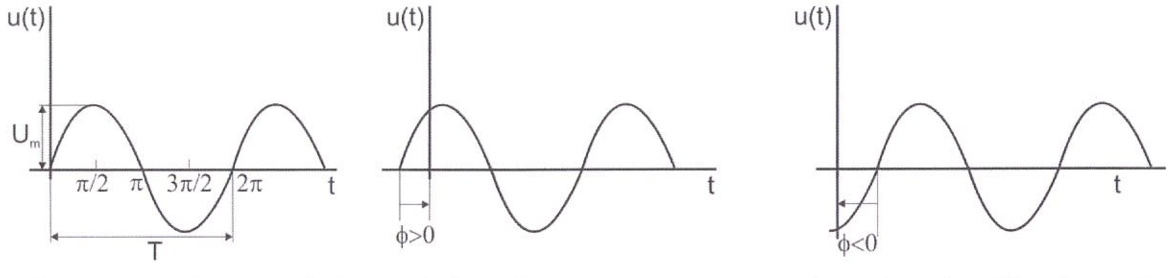
$$\boxed{i(t) = I_m \sin(\omega t + \phi)} \tag{4.2}$$

kde $i(t)$ – okamžitá hodnota prúdu, I_m – amplitúda, ω - uhlová frekvencia, t – čas a ϕ - počiatočná fáza. **Amplitúda** je maximálna hodnota, ktorú harmonický priebeh nadobúda (na

Obr. 4.2 vpravo označená U_m). Vzťah medzi **uhlovou frekvenciou** ω a frekvenciou f má podobu:

$$\boxed{\omega = 2\pi f} \tag{4.3}$$

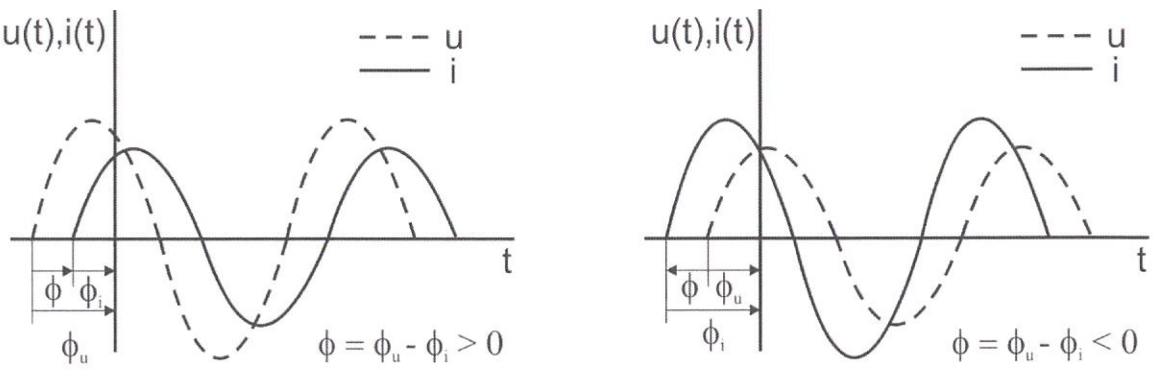
Uhlová frekvencia sa udáva v **radiánoch za sekundu** [rad.s^{-1}]. Veľmi dôležitou skutočnosťou je stotožnenie harmonického priebehu v čase s *uhlom* – celému cyklu (trvajúcemu jednu periódu) je priradený uhol 2π radiánov (t.j. jednej celej kladnej aj zápornej polvlne priebehu odpovedá plných 360°, jednej polvlne potom 180° a pod. – Obr. 4.3 vľavo). Tento uhol sa nazýva **fáza** a rozlišujeme **okamžitú fázu** (člen $(\omega t + \phi)$ vo vzťahu 4.2) a **počiatočnú fázu** (uhol, ktorý má priebeh v čase $t = 0$). Počiatočná fáza môže byť *kladná* aj *záporná* (Obr. 4.3 v strede a vpravo) – znamienko fázy zistíme podľa toho aký smer má orientovaná úsečka z miesta kde priebeh prechádza nulou; ak je to v smere nárastu času, počiatočná fáza je kladná, ak naopak, je počiatočná fáza záporná.



Obr. 4.3 Fáza harmonického priebehu (vľavo) a určenie znamienka počiatočnej fázy (v strede a vpravo)

V striedavých obvodoch nás okrem počiatočnej fázy zaujíma aj rozdiel počiatočných fáz dvoch priebehov (napr. napätia a prúdu), ktorý nazývame **fázový posun**:

$$\boxed{\phi = \phi_u - \phi_i} \tag{4.4}$$



Obr. 4.4 Fázový posun medzi napätím a prúdom (vľavo – napätie predbieha prúd a fázový posun má kladné znamienko, vpravo – prúd predbieha napätie a fázový posun má záporné znamienko)

V prípade, že je fázový posun medzi napätím a prúdom kladný (Obr. 4.4 vľavo), hovoríme, že napätie predbieha prúd, ak je záporný (Obr. 4.4 vpravo), prúd predbieha napätie.

Ak majú dva priebehy fázový posun rovný 0, hovoríme, že sú **vo fáze**. Ak je medzi nimi fázový posun rovný π, hovoríme, že sú **v protifáze**.

4.2 Efektívna a stredná hodnota

Ako bolo uvedené na začiatku kapitoly, okamžitá hodnota striedavých elektrických veličín sa v čase mení. Väčšinou je však výhodné charakterizovať takéto priebehy pomocou jednej hodnoty (tak ako v jednosmerných veličinách). Súvisí to aj s tým, že väčšinou nás viac ako okamžitá hodnota striedavého prúdu zaujímajú jeho tepelné účinky. Preto sa často prúd a napätie v striedavých obvodoch vyjadrujú pomocou tzv. **efektívnej hodnoty** – takej hodnoty jednosmerného prúdu pri ktorom sa vytvorí rovnaké množstvo (Joulovho) tepla ako pri priechode daného striedavého prúdu. Ak si uvedomíme, že pri priechode jednosmerného prúdu s veľkosťou I odporom s hodnotou R vzniká teplo dané vzťahom:

$$\boxed{Q = RI^2t} \qquad (4.5)$$

a pri priechode striedavého prúdu (veľkosť prúdu sa v čase mení, z čoho vyplýva, že sa mení aj toto teplo, a preto musíme integrovať pre celú periódu):

$$\boxed{Q = R\int_0^T i^2 dt} \qquad (4.6)$$

Ak porovnáme tieto dva vzťahy a vyjadríme si veľkosť jednosmerného prúdu I, dostávame *vzťah pre efektívnu hodnotu striedavého prúdu*:

$$\boxed{I = \sqrt{\frac{1}{T}\int_0^T i^2 dt}} \qquad (4.7)$$

Efektívnu hodnotu napätia môžeme vypočítať obdobným spôsobom s nahradením prúdu napätím vo vyššie uvedenom vzťahu. Efektívne hodnoty striedavých veličín budeme označovať veľkým písmenom bez indexu. Okrem samotného vzťahu pre výpočet efektívnej hodnoty, bude pre nás dôležitý vzťah medzi veľkosťou maximálnej hodnoty striedavej veličiny (amplitúdy) a jej efektívnou hodnotou. Ten je možné vyjadriť nasledujúcim spôsobom:

$$\boxed{I = \frac{I_m}{\sqrt{2}} \cong 0{,}707 I_m} \qquad (4.8)$$

Efektívna hodnota je teda približne o 30% menšia ako maximálna hodnota.
Stredná hodnota harmonického signálu je priemerná hodnota za určitý časový interval. Týmto časovým intervalom môže byť *perióda* alebo *polperióda*:

$$\boxed{I_S = \frac{1}{T}\int_0^T i dt \qquad\qquad I_S = \frac{2}{T}\int_0^{T/2} i dt} \qquad (4.9)$$

Dôvodom prečo sa niekedy definuje stredná hodnota cez polperiódu je to, že stredná hodnota striedavých priebehov (tie sú symetrické okolo osi x) za celú periódu je rovná nule. Vzťah medzi maximálnou hodnotou (amplitúdou) a strednou hodnotou by sme získali po dosadení harmonickej funkcie $i(t) = I_m \sin(\omega t + \phi)$ do vzťahu 4.9 a jeho úprave. Podľa toho platí:

$$\boxed{I_S \cong 0{,}637 I_m} \tag{4.10}$$

Stredná hodnota je teda približne 64% z maximálnej hodnoty.

4.3 Symbolicko-komplexná metóda

Striedavé obvody je, podobne ako jednosmerné, nutné analyzovať – teda vypočítať hodnoty neznámych elektrických veličín zo známych. Základným rozdielom je priebeh veličín, ktorých hodnota sa v čase mení v podobe funkcie sínus resp. kosínus (predpokladáme harmonické veličiny). Ak napájame obvod zo striedavého zdroja (a obvod je lineárny) budú mať veličiny v ustálenom stave harmonický priebeh s konštantnou amplitúdou a rovnakou frekvenciou. Pri výpočtoch použitím Ohmovho a Kirchhoffových zákonov by sme teda museli používať harmonické funkcie (formy $i(t) = I_m \sin(\omega t + \phi)$ a $u(t) = U_m \sin(\omega t + \phi)$), pričom riešenie rovníc s funkciami v takomto tvare je relatívne náročné.
Symbolicko-komplexná metóda využíva nahradenie harmonických funkcií čas komplexnými funkciami času vďaka čomu dochádza k *výraznému zjednodušeniu analýzy striedavých obvodov*.
Aby sme mohli využívať symbolicko-komplexnú metódu, je potrebné pripomenúť základné znalosti z komplexných čísel.

Komplexné čísla

Komplexné číslo je číslo, ktoré je možné vyjadriť v tvare

$$\boxed{\bar{z} = a + jb} \tag{4.11}$$

kde a – reálna zložka, b – imaginárna zložka, j – imaginárna jednotka pre ktorú platí $j^2 = -1$. Komplexné čísla (ako aj komplexné funkcie času) budeme označovať vodorovnou čiarou nad symbolom. Tvar uvedený vo vzťahu 4.11 sa nazýva **zložkový**. Z Obr. 4.5 je vidieť, že reálna zložka a a imaginárna zložka b odpovedajú x-ovej a y-ovej súradnici v karteziánskej sústave súradníc. Zo základnej geometrie vieme, že ten istý bod (v našom prípade to isté komplexné číslo $\bar{z}$) sa dá vyjadriť pomocou *polárnych súradníc*. V polárnych súradniciach popisujeme body pomocou ich vzdialenosti od počiatku sústavy súradníc a uhla, ktorý zviera spojnica bodu a počiatku sústavy súradníc s kladnou osou x. Vzdialenosť od počiatku sústavy súradníc v komplexných číslach označujeme $|\bar{z}|$ a nazývame ju **modul**. Uhol budeme označíme gréckym písmenom ϕ a budeme ho nazývať **argument** . Komplexné číslo $\bar{z}$ potom môžeme vyjadriť tiež v nasledujúcom tvare:

$$\boxed{\bar{z} = |\bar{z}| e^{j\phi}} \tag{4.12}$$

Tento tvar komplexného čísla sa nazýva **exponenciálny**. Priechod z jedného tvaru do druhého je možné realizovať využitím jednoduchých geometrických vzťahov vyplývajúcich z Obr. 4.5. Ak máme komplexné číslo vyjadrené v zložkovom tvare, prejdeme na exponenciálny tvar vypočítaním modulu a argumentu. Modul odpovedá prepone pravouhlého trojuholníka, ktorého odvesny odpovedajú reálnej a imaginárnej zložke a tangens argumentu (uhla ϕ) je určený pomerom imaginárnej a reálnej zložky. Preto platí:

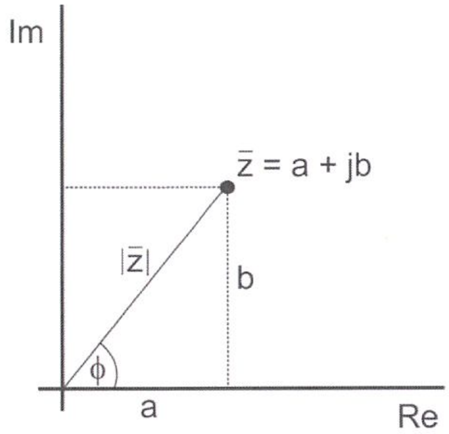
$$\boxed{|\bar{z}| = \sqrt{a^2 + b^2}} \tag{4.13}$$

a

$$\boxed{\phi = arctg\,\frac{b}{a}} \tag{4.14}$$

Prejsť do zložkového tvaru z exponenciálneho môžeme využitím *goniometrického tvaru:*

$$\boxed{\bar{z} = |\bar{z}|e^{j\phi} = |\bar{z}|(\cos\phi + j\sin\phi) = |\bar{z}|\cos\phi + j|\bar{z}|\sin\phi} \tag{4.15}$$



Obr. 4.5 Geometrická interpretácia komplexného čísla v Gaussovej rovine

Základom symbolicko-komplexnej metódy je teda nahradenie vyjadrenia harmonickej funkcie komplexnou funkciou času. Tento vzťah si môžeme vyjadriť nasledovne:

$$\boxed{\begin{array}{ll} u(t) = U_m \sin(\omega t + \phi_u) & \\ \qquad resp. & \Leftrightarrow \quad \bar{u}(t) = U_m[\cos(\omega t + \phi_u) + j\sin(\omega t + \phi_u)] = U_m e^{j(\omega t + \phi_u)} \\ u(t) = U_m \cos(\omega t + \phi_u) & \end{array}} \tag{4.16}$$

Všimnime si tento vzťah bližšie. Vľavo máme pôvodnú harmonickú funkciu vyjadrenú v tvare, ktorý bol uvedený už vo vzťahu 4.2 pre prúd (podobné vysvetlenie a vzťah medzi harmonickou a komplexnou funkciou samozrejme platí aj pre prúd). Harmonickú funkciu môžeme mať vyjadrenú pomocou funkcie sínus alebo kosínus (sú iba navzájom posunuté o 90°). Vpravo už máme komplexnú funkciu času (používame vodorovnú čiaru nad symbolom) v goniometrickom a exponenciálnom tvare (viď časť komplexné čísla uvedenú vyššie). Pôvodná harmonická funkcia v kosínusovom vyjadrení teda tvorí reálnu zložku a harmonická funkcia v sínusovom vyjadrení imaginárnu zložku komplexnej funkcie času. Všetky parametre pôvodného harmonického signálu (amplitúda, uhlová frekvencia, počiatočná fáza) ostali v komplexnom vyjadrení zachované. V exponenciálnom tvare amplitúda (U_m) odpovedá modulu komplexnej funkcie a počiatočná fáza (ϕ_u) odpovedá argumentu. Vyjadrenie vo vzťahu 4.16 vpravo sa nazýva **komplexná okamžitá hodnota** alebo tiež **komplexor harmonickej funkcie**. Toto vyjadrenie je možné ďalej upraviť:

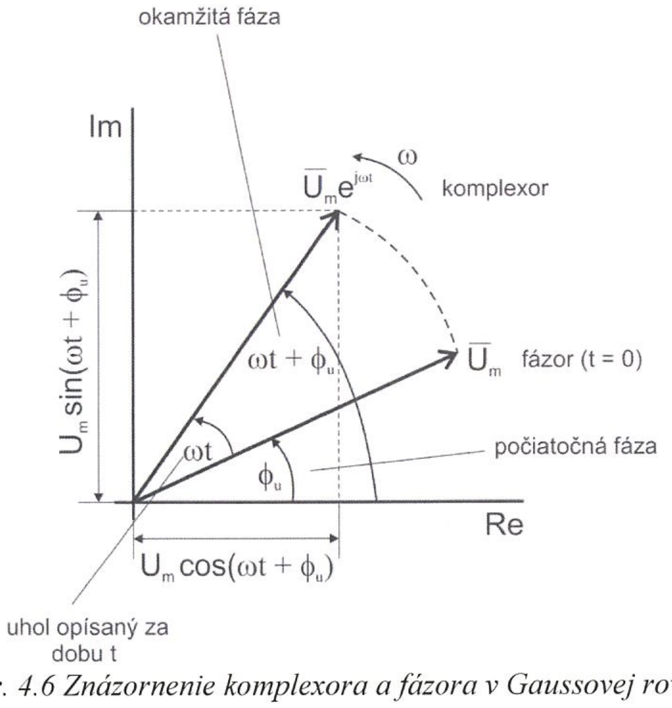
$$\boxed{\begin{aligned} \overline{u}(t) = U_m e^{j(\omega t + \phi_u)} = U_m e^{j\phi_u} e^{j\omega t} = \overline{U}_m e^{j\omega t} \\ kde\, \overline{U}_m = U_m e^{j\phi_u} - \text{fázor} \end{aligned}} \tag{4.17}$$

Vzťah bol upravený podľa pravidiel pre počítanie s mocninami. Z uvedeného vyplýva, že **fázor harmonickej funkcie** nám nesie informáciu o amplitúde a počiatočnej fáze. Niekedy sa fázor označuje aj ako **komplexná amplitúda**. Fázor sa často vyjadruje v mierke efektívnych hodnôt, čo je možné získať z vyjadrenia v mierke amplitúd využitím vzťahu 4.8:

$$\boxed{\overline{U} = \frac{U_m}{\sqrt{2}} e^{j\phi_u} = U e^{j\phi_u}} \tag{4.18}$$

4.4 Grafické zobrazenie komplexorov a fázorov

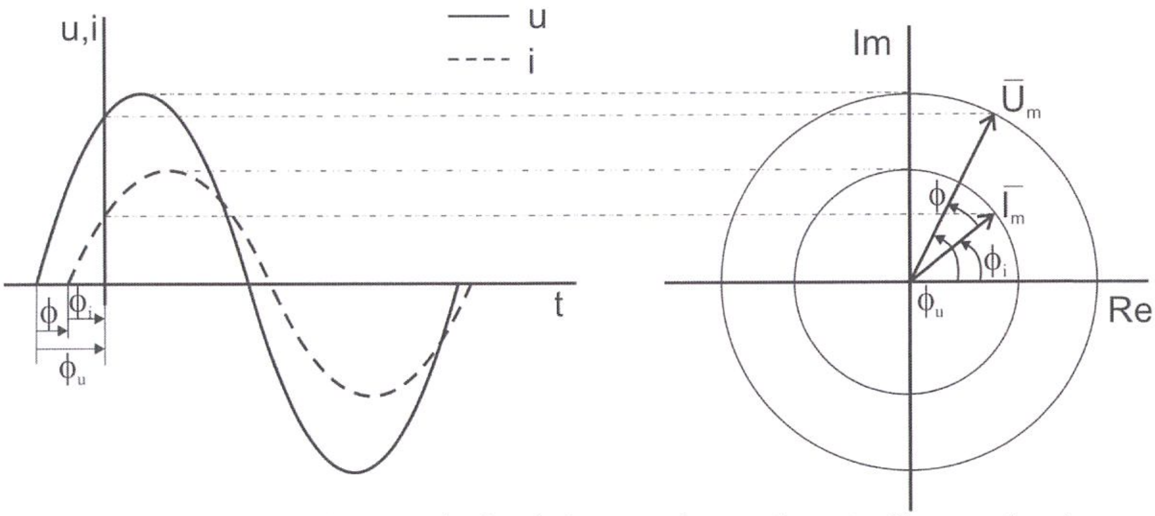
Pri analýze striedavých obvodov sú veľmi dôležité vzťahy medzi jednotlivými striedavými veličinami a porovnanie ich veľkostí (či už amplitúd alebo efektívnych hodnôt) a počiatočných fáz. Pripomeňme, že v úlohách analýzy striedavých obvodov sa predpokladá zhodnosť frekvencie všetkých priebehov čo je v lineárnych striedavých obvodoch pri napájaní z rovnakého striedavého zdroja splnené. Pre zlepšenie prehľadnosti vzťahov medzi striedavými veličinami a uľahčenie analýzy sa používa grafické znázornenie *fázorov* vo *fázorovom diagrame*. Fázor (obsahujúci informáciu o amplitúde resp. efektívnej hodnote a počiatočnej fáze) sa stotožňuje s *orientovanou úsečkou* (t.j vektorom) v Gaussovej rovine (Obr. 4.6).



Obr. 4.6 Znázornenie komplexora a fázora v Gaussovej rovine

Dĺžka tohto vektora odpovedá veľkosti amplitúdy príslušného priebehu resp. jeho efektívnej hodnote. Uhol, ktorý zviera tento vektor s kladnou reálnou osou (osou x) v čase t = 0 odpovedá počiatočnej fáze. Vieme, že uhol (fáza) striedavého priebehu sa v čase mení

(vyjadrené *okamžitou fázou*). Vektor teda opisuje v čase uhol uhlovou rýchlosťou ω a za čas t opíše uhol ωt (z fyziky vieme, že rýchlosť krát čas je dráha, v tomto prípade uhol keďže ide o pohyb rotačný). *Komplexor* (obsahuje člen $e^{j\omega t}$) preto stotožňujeme s rotujúcim vektorom v Gaussovej rovine. Keďže však všetky vektory rotujú rovnakou uhlovou rýchlosťou (pretože uhlová frekvencia všetkých priebehov je rovnaká), stačí nám znázorniť *fázory* jednotlivých priebehov (v čase $t = 0$), kde budú jasne viditeľné amplitúdy (resp. efektívne hodnoty) a počiatočné fázy striedavých priebehov ako aj ich fázové posuny.
Ešte lepšiu predstavu o stotožnení harmonických priebehov s rotujúcimi vektormi v Gaussovej rovine získame prostredníctvom Obr. 4.7. V ľavej časti obrázku sú uvedené priebehy harmonického prúdu a napätia s rovnakou frekvenciou a rôznymi počiatočnými fázami ϕ_i a ϕ_u (fázový posun je daný $\phi = \phi_u - \phi_i$ a je kladný keďže počiatočná fáza napätia je väčšia). V pravej časti môžeme vidieť znázornenie vektorov (fázorov) napätia $\overline{U}_m$ a prúdu $\overline{I}_m$. Vidíme, že dĺžka týchto vektorov odpovedá maximálnym hodnotám oboch priebehov (vyznačené bodkočiarkovanou čiarou). Uhol, ktorý tieto vektory zvierajú s kladnou reálnou osou odpovedá počiatočným fázam ϕ_i a ϕ_u a uhol medzi samotnými vektormi zasa odpovedá fázovému posunu ϕ. Vektory sa v Gaussovej rovine pohybujú uhlovou rýchlosťou ω a celú kružnicu opíšu práve za dobu jednej periódy harmonického priebehu.



Obr. 4.7 Stotožnenie harmonických veličín s rotujúcimi vektormi v Gaussovej rovine

Príklad 4.1

Striedavé napätie má efektívnu hodnotu $U = 50V$, počiatočnú fázu $\phi_u = \pi/8$ rad a frekvenciu $f = 50$ Hz. Striedavý prúd má efektívnu hodnotu $I = 1,2A$, počiatočnú fázu $\phi_i = 3\pi/8$ rad a frekvenciu $f = 50$ Hz. Znázornite priebehy týchto harmonických funkcií a nakreslite fázorový diagram.

Harmonické funkcie napätia a prúdu majú podľa vzťahu 4.2 podobu:

$$u(t) = U_m \sin(\omega t + \phi_u) \qquad i(t) = I_m \sin(\omega t + \phi_i)$$

Najprv si určíme amplitúdy (maximálne hodnoty) napätia a prúdu. Vieme, že efektívna hodnota je približne o 30% menšia ako maximálna, a teda platí (vzťah 4.8):

$U_m = \sqrt{2}U = \sqrt{2}.50 \cong 70{,}71V$ $\qquad$ $I_m = \sqrt{2}I = \sqrt{2}.1{,}2 \cong 1{,}7A$

Vypočítame si uhlovú frekvenciu ω:

$$\omega = 2\pi f = 2\pi 50 \cong 314 rad.s^{-1}$$

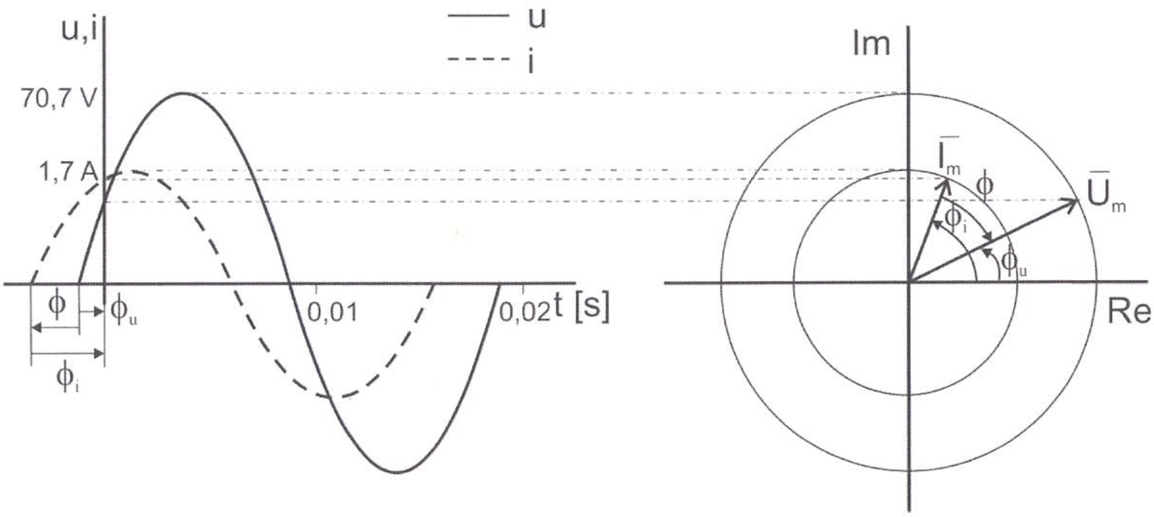
Počiatočné fázy oboch veličín si vyjadríme v stupňoch:

$$\phi_u = \frac{\pi}{8} = \frac{180^o}{8} = 22{,}5^o \qquad \phi_i = \frac{3\pi}{8} = \frac{3.180^o}{8} = 67{,}5^o$$

Výsledné vyjadrenie harmonických funkcií má tvar:

$$u(t) = 70{,}7\sin(314t + 22{,}5^o) \qquad i(t) = 1{,}7\sin(314t + 67{,}5^o)$$

Znázornenie priebehov spolu s ich stotožnením s vektormi v Gaussovej rovine vyzerá nasledovne:



Všimnime si, že pre prúdy a napätia používame inú mierku čo súvisí s obyčajne rádovo odlišnými hodnotami. Fázový posun je v tomto prípade záporný, pretože prúd predbieha napätie – má väčšiu počiatočnú fázu ako napätie.

4.5 Popis elektrických obvodov pomocou komplexných čísel

V jednosmerných obvodoch sa vyskytoval jediný typ pasívneho prvku – rezistor, ktorého charakteristickým parametrom bol elektrický odpor R. V striedavých obvodoch sa vyskytujú aj ďalšie dva pasívne prvky – cievka a kondenzátor, ktorých charakteristickými parametrami sú indukčnosť L a kapacita C. Funkciu týchto prvkov v striedavých obvodoch možno vyjadriť takto:

Rezistor je obvodový prvok v ktorom dochádza k premene elektrickej energie na teplo.

Kondezátor je obvodových prvok v ktorom sa využívajú elektrické silové účinky elektromagnetického poľa.

Cievka je obvodový prvok v ktorom sa využívajú magnetické silové účinky elektromagnetického poľa.

Veľmi dôležité je vyjadrenie vzťahu medzi napätím a prúdom u týchto prvkov v striedavých obvodoch. Z jednosmerných obvodov vieme, že vzťah medzi napätím a prúdom je vyjadrený v Ohmovom zákone. Ak budeme uvažovať harmonické veličiny, pre vzťah medzi prúdom a napätím bude platiť:

I. Rezistor

$$\text{Ohmov zákon: } i = \frac{u}{R} = \frac{U_m \sin \omega t}{R} = \left(\frac{U_m}{R}\right) \sin \omega t = I_m \sin \omega t$$

Ak použijeme komplexné vyjadrenie pre harmonické funkcie dostaneme:

$$\bar{i} = \frac{\bar{u}}{R} = \frac{U_m e^{j\omega t}}{R} = \left(\frac{U_m}{R}\right) e^{j\omega t} = I_m e^{j\omega t}$$

Ak si vyjadríme vzťah v efektívnych hodnotách a použijeme len fázory (bez člena $e^{j\omega t}$) dostávame:

$$\boxed{\bar{I} = \frac{\bar{U}}{R}} \tag{4.19}$$

Fázový posun medzi napätím a prúdom pri rezistore je nulový.

II. Kondenzátor

Veľkosť prúdu kondenzátorom je priamo úmerná kapacite C kondenzátora a rýchlosti zmeny napätia v čase (teda časovej derivácii napätia):

$$\boxed{i = C\frac{du}{dt}} \tag{4.20}$$

Ak dosadíme do vzťahu 4.20 harmonické napätie $u = U_m \sin \omega t$, dostávame:

$$i = C\frac{d(U_m \sin \omega t)}{dt} = \omega C U_m \cos \omega t = \omega C U_m \left(\sin \omega t + \frac{\pi}{2}\right)$$

Fázový posun medzi napätím a prúdom pri kondenzátore je rovný -90 stupňov.

Z uvedeného vyplýva, že prúd pri kondenzátore predbieha napätie o 90 stupňov – preto je znamienko fázového posunu mínus.
Ak použijeme komplexné vyjadrenie harmonických veličín, dostávame:

$$\bar{i} = C\frac{dU_m e^{j\omega t}}{dt} = j\omega C U_m e^{j\omega t} = j\omega C\bar{u}$$

$$\bar{u} = \frac{\bar{i}}{j\omega C}$$

Všimnime si, že v poslednom vzťahu člen $1/j\omega C$ formálne odpovedá odporu v Ohmovom zákone. Člen $1/\omega C$ sa nazýva **kapacitná reaktancia** (kapacitancia) a označuje sa X_C . Jednotkou kapacitnej reaktancie je **ohm** [Ω]. Prevrátená hodnota kapacitnej reaktancie sa nazýva **kapacitná susceptancia** a označuje sa B_C. Jednotkou kapacitnej susceptancie je **siemens** [S]. Ak použijeme vyjadrenie fázorov v efektívnych hodnotách, pre kondenzátor platí:

$$\boxed{\bar{U} = -jX_C\bar{I}} \tag{4.21}$$

III. Cievka

Veľkosť napätia na cievke je priamo úmerná indukčnosti cievky L a rýchlosti zmeny prúdu v čase (teda časovej derivácii prúdu):

$$\boxed{u = L\frac{di}{dt}} \tag{4.22}$$

Ak dosadíme do vzťahu 4.22 harmonický prúd $i = I_m \sin\omega t$, dostávame:

$$u = L\frac{d(I_m \sin\omega t)}{dt} = \omega L I_m \cos\omega t = \omega L I_m\left(\sin\omega t + \frac{\pi}{2}\right)$$

Fázový posun medzi napätím a prúdom pri kondenzátore je rovný +90 stupňov.

Z uvedeného vyplýva, že napätie na cievke predbieha prúd o 90 stupňov – preto je znamienko fázového posunu plus.
Ak použijeme komplexné vyjadrenie harmonických veličín, dostávame:

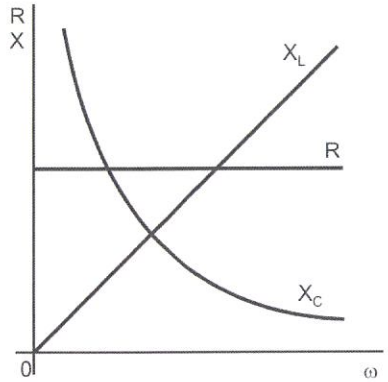
$$\bar{u} = L\frac{dI_m e^{j\omega t}}{dt} = j\omega L I_m e^{j\omega t} = j\omega L\bar{i}$$

$$\bar{u} = j\omega L\bar{i}$$

Všimnime si, že v poslednom vzťahu člen $j\omega L$ formálne odpovedá odporu v Ohmovom zákone. Člen ωL sa nazýva **indukčná reaktancia** (induktancia) a označuje sa X_L . Jednotkou indukčnej reaktancie je **ohm** [Ω]. Prevrátená hodnota indukčnej reaktancie sa nazýva **indukčná susceptancia** a označuje sa B_L. Jednotkou indukčnej susceptancie je **siemens** [S]. Ak použijeme vyjadrenie fázorov v efektívnych hodnotách, pre cievku platí:

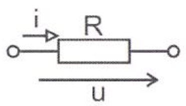
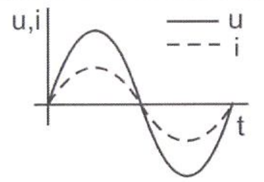
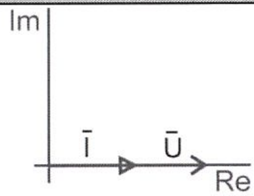
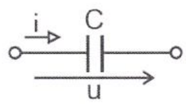
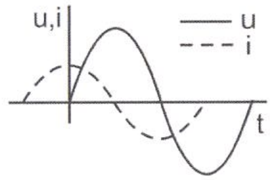
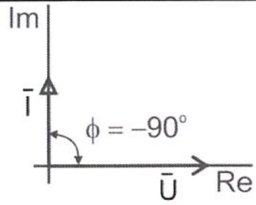
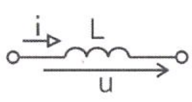
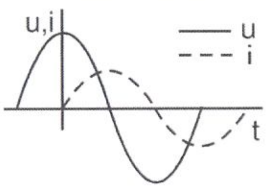
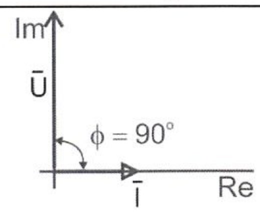
$$\boxed{\bar{U} = jX_L\bar{I}} \tag{4.23}$$

☞ *Podľa vzťahov, ktoré sme odvodili vyššie vyplýva, že kým odpor rezistora R nezávisí* *od frekvencie, kapacitná reaktancia kondenzátora X_C a indukčná reaktancia cievky X_L sú frekvenčne závislé. Závislosť induktancie cievky na frekvencii je lineárna a jej hodnota s rastúcou frekvenciou rastie (viď obrázok). Závislosť kapacitancie kondenzátora na frekvencii je naopak nelineárna a jej hodnota s frekvenciou klesá. Z uvedeného zároveň vyplýva, že kondenzátor predstavuje v jednosmernom obvode (frekvencia jednosmerných veličín je nulová) rozpojený obvod (nekonečne veľký odpor) a cievka predstavuje skrat (nulový odpor).*



V Tab. 4.1 máme zhrnuté vlastnosti troch základných pasívnych prvkov vrátane vyznačenia značiek, ktoré budeme používať v schémach striedavých elektrických obvodov.

Tab. 4.1 RLC prvky v striedavých obvodoch a vzťahy medzi napätím a prúdom pre tieto prvky

Prvok	Značka	Priebehy	Fázorový diagram
Rezistor			
Kondenzátor			
Cievka			

4.6 Základné zákony pre analýzu striedavých obvodov

Základné zákony pre analýzu striedavých obvodov s harmonickými veličinami predstavujú, podobne ako v jednosmerných obvodoch, Ohmov zákon a Kirchhoffove zákony, ktoré môžeme napísať vo forme fázorov. Kirchhoffove zákony pre okamžité hodnoty prúdov a napätí ako aj pre fázory prúdov a napätí sú zhrnuté v Tab. 4.2.

Tab. 4.2 Kirchhoffove zákony v harmonickom a symbolicko-komplexnom tvare

I. KZ pre okamžité hodnoty	*I. KZ pre fázory*	*II. KZ pre okamžité hodnoty*	*II. KZ pre fázory*
$\sum \pm i = 0$ v uzle	$\sum \pm \bar{I} = 0$ v uzle	$\sum \pm u = 0$ v slučke	$\sum \pm \bar{U} = 0$ v slučke

Z Tab. 4.2 vyplýva, že súčet fázorov prúdu v uzle sa rovná nule (I. KZ) a súčet fázorov napätí v slučke sa rovná nule (II. KZ). Pri analýze je potrebné tiež vyhodnotiť orientáciu príslušných veličín podľa čoho určíme znamienko prúdu resp. napätia.
Ohmov zákon bol uvedený pre všetky tri pasívne prvky vo vzťahoch 4.19, 4.21 a 4.23. Pre prehľadnosť si ich uvedieme v tabuľke (Tab. 4.3) s vyjadrením prúdu aj napätia.

Tab. 4.3 Ohmov zákon pre pasívne prvky v symbolicko-komplexnom tvare

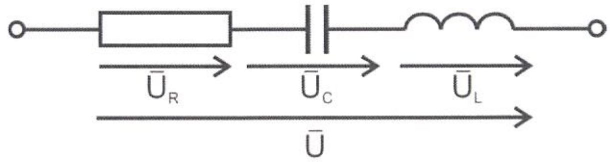
Prvok	**Ohmov zákon pre napätie**	**Ohmov zákon pre prúd**
Rezistor	$\bar{U}_R = R\bar{I}_R$	$\bar{I}_R = G\bar{U}_R$
Kondenzátor	$\bar{U}_C = \left(\frac{1}{j\omega C}\right)\bar{I}_C$	$\bar{I}_C = j\omega C\bar{U}_C$
Cievka	$\bar{U}_L = j\omega L\bar{I}_L$	$\bar{I}_L = \left(\frac{1}{j\omega L}\right)\bar{U}_L$

Ak budeme uvažovať sériový RLC obvod (teda obvod tvorený sériovým zapojením všetkých troch pasívnych prvkov – Obr. 4.8), pre fázory napätí podľa II. KZ platí:

$$\boxed{\bar{U}_R + \bar{U}_C + \bar{U}_L = \bar{U}} \tag{4.24}$$

Ak si prepíšeme fázory úbytkov napätí na jednotlivých pasívnych prvkov podľa Tab. 4.3 dostávame:

$$\boxed{\bar{U} = R\bar{I} + (1/j\omega C)\bar{I} + j\omega L\bar{I} = \bar{Z}\bar{I}} \tag{4.25}$$



Obr. 4.8 Sériový RLC obvod

Vzťah

$$\boxed{\bar{U} = \bar{Z}\bar{I}} \tag{4.26}$$

je zovšeobecnený Ohmov zákon v symbolicko-komplexnom tvare. Vo vzťahu 4.26 $\overline{Z}$ sa nazýva **impendancia** (komplexný odpor). Jednotkou impedancie je **ohm** [Ω]. Je dôležité si uvedomiť, že impedancia je komplexným číslom avšak nie je *fázorom* – nepredstavuje harmonickú funkciu tak ako fázor prúdu alebo napätia. Vo vzťahu 4.25 je impedancia tvorená:

$$\boxed{\overline{Z} = R + j\left(\omega L - \frac{1}{\omega C}\right)} \tag{4.27}$$

Reálna zložka impedancie je vo všeobecnosti tvorená elektrickým odporom rezistorov a nazýva sa **rezistancia**. Imaginárna zložka impedancie je vo všeobecnosti tvorená reaktanciami kondenzátorov a cievok (celý výraz v zátvorke vzťahu 4.27, ktorý môžeme ako celok označiť X). Impedancia – tak ako každé komplexné číslo – má *modul* a *argument* (pripomeňme si, že modul je vzdialenosť komplexného čísla od počiatku Gaussovej roviny a argument je uhol, ktorý zviera spojnica počiatku a tohto bodu s kladnou časťou osi x), ktoré môžeme vyjadriť takto:

$$\boxed{\overline{Z} = \sqrt{R^2 + X^2}\, e^{j arctg(X/R)} = \left|\overline{Z}\right| e^{j\phi}} \tag{4.28}$$

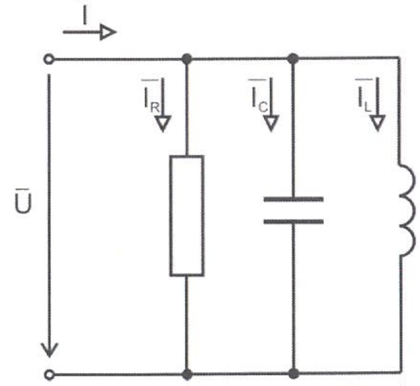
Modul v tomto prípade odpovedá veľkosti impedancie $\overline{Z}$ a argument odpovedá fázovému posunu medzi napätím a prúdom $\phi = \phi_u - \phi_i$. Podľa *znamienka fázového posunu* rozlišujeme charakter záťaže – ak má fázový posun *kladné* znamienko, záťaž má **odporovo-indukčný charakter**, ak má fázový posun *záporné* znamienko, záťaž má **odporovo-kapacitný charakter**.

Uvažujme paralelný RLC obvod (teda obvod tvorený paralelným zapojením všetkých troch pasívnych prvkov – Obr. 4.9), pre fázory prúdov potom podľa I. KZ platí:

$$\boxed{\overline{I}_R + \overline{I}_C + \overline{I}_L = \overline{I}} \tag{4.29}$$

Ak opäť použijeme Tab. 4.3 a prepíšeme si fázory prúdov pomocou Ohmovho zákona, dostávame:

$$\boxed{\overline{I} = G\overline{U} + j\omega C\overline{U} + (1/j\omega L)\overline{U}} \tag{4.30}$$



Obr. 4.9 Paralelný RLC obvod

Vzťah

$$\boxed{\overline{I} = \overline{Y}\overline{U}} \tag{4.31}$$

je podobne ako vzťah 4.26 zovšeobecneným Ohmovým zákonom v symbolicko-komplexnom vyjadrení. Vo vzťahu 4.31 predstavuje $\overline{Y}$ **admitanciu** (komplexnú vodivosť), ktorej jednotkou je **siemens** [S]. Admitancia (rovnako ako impedancia) je komplexným číslom avšak nie fázorom, keďže nie je vyjadrením harmonickej funkcie. Vo vzťahu 4.30 má admitancia nasledujúcu podobu:

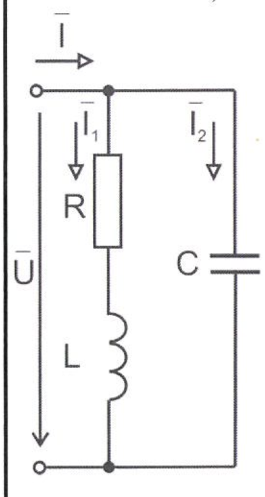
$$\boxed{\overline{Y} = G + j\left(\omega C - \frac{1}{\omega L}\right)} \tag{4.32}$$

Reálna zložka admitancie je vo všeobecnosti tvorená vodivosťou rezistorov a nazýva sa **konduktancia**. Imaginárna zložka impedancie je vo všeobecnosti tvorená susceptanciami kondenzátorov a cievok (celý výraz v zátvorke vzťahu 4.27, ktorý môžeme ako celok označiť B) – pripomeňme, že susceptancie sú prevrátené hodnoty reaktancií kondenzátorov a cievok. Admitancia je teda prevrátenou hodnotou impedancie:

$$\boxed{\overline{Y} = \frac{1}{\overline{Z}}} \tag{4.33}$$

Príklad 4.2

Vypočítajte fázory všetkých vyznačených prúdov $\overline{I}_1, \overline{I}_2, \overline{I}$ a nakreslite fázorový diagram ak je dané: $R = 40\ \Omega$, $C = 15\ \mu F$, $L = 0{,}2\ H$, $f = 50\ Hz$, $U = 230\ V$.



Fázory prúdov $\overline{I}_1, \overline{I}_2$ môžeme vypočítať pomocou Ohmovho zákona:

$$\overline{I}_1 = \frac{\overline{U}}{\overline{Z}_1} = \frac{\overline{U}}{R + j\omega L} = \frac{230V}{(40 + j62{,}8)\,\Omega} = \frac{230V}{74{,}46e^{j57{,}5^o}} = \underline{\underline{3{,}09e^{-j57{,}5^o}}}\,A$$

$$= 3{,}09(\cos(-57{,}5^o) + j\sin(-57{,}5^o)) = \underline{\underline{(1{,}66 - j2{,}61)A}}$$

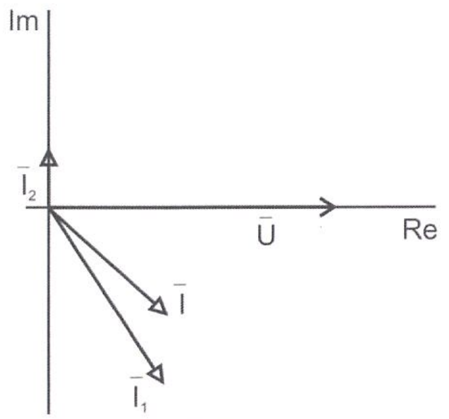
Impedanciu $\overline{Z}_1$ sme previedli do exponenciálneho tvaru pretože delenie (resp. násobenie) komplexných čísel v exponenciálnom tvare je jednoduchšie – výsledný modul je daný podielom modulov oboch komplexných čísel a výsledný argument je daný rozdielom argumentov. Pokiaľ je uvedená len efektívna hodnota bez argumentu (ako u napájacieho napätia), znamená to, že počiatočná fáza je rovná nule. Výsledný fázor prúdu sme zároveň previedli do zložkového tvaru pretože pre sčítanie a odčítanie komplexných čísel je vhodný zložkový tvar v ktorom osobitne sčítavame (alebo odčítavame) reálne a osobitne imaginárne zložky.

$$\bar{I}_2 = \frac{\bar{U}}{\bar{Z}_2} = \frac{\bar{U}}{-j(1/\omega C)} = \frac{230V}{-j212,31\Omega} = \underline{\underline{j1,08\,A}}$$

Podľa I.KZ platí:

$$\bar{I} = \bar{I}_1 + \bar{I}_2 = (1,66 - j2,61 + j1,08)\,A = \underline{\underline{(1,66 - j1,53)\,A}} = \underline{\underline{2,26e^{-j42,67^\circ}}}\,A$$

Vo fázorovom diagrame si zvolíme referenčný fázor, ktorým bude napájacie napätie, ktorého vektor bude ležať v osi x. Pre fázory prúdov a fázory napätí volíme osobitnú mierku. Všimnime si, že fázory je možné sčítavať (resp. odčítavať) rovnako ako vektory – preto môžeme získať výsledný fázor prúdu $\bar{I}$ graficky z fázorov $\bar{I}_1, \bar{I}_2$ doplnením na rovnobežník. Dĺžky vektorov odpovedajú efektívnym hodnotám elektrických veličín.

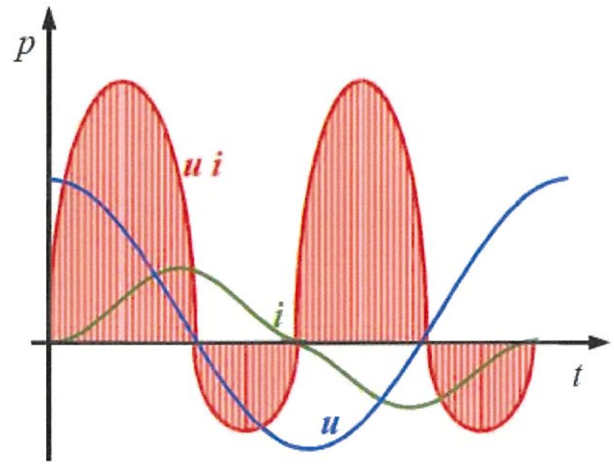


4.7 Výkony v striedavých obvodoch

Z jednosmerných obvodov už vieme, že *elektrický výkon* je definovaný ako súčin napätia a prúdu. V striedavých obvodoch však vzhľadom k tomu, že okamžitá hodnota prúdu aj napätia sa v čase menia (predpokladáme harmonické funkcie), *mení sa v čase aj okamžitá hodnota výkonu*, čo môžeme napísať:

$$\boxed{p(t) = u(t).i(t)} \tag{4.34}$$

Príklad priebehu okamžitého výkonu je na Obr. 4.10. Okamžitý výkon je kmitavý a má jednosmernú zložku $UI\cos\phi$ a striedavú zložku s frekvenciou 2ω. V každom okamihu sa jeho hodnota rovná súčinu hodnoty prúdu a napätia a môže mať aj kladné aj záporné znamienko. Je zrejmé, že záporné znamienko bude mať okamžitý výkon vtedy pokiaľ sú navzájom opačné znamienka prúdu a napätia (buď je napätie kladné a prúd záporný alebo naopak). K tomu dochádza vtedy ak prúd a napätie nie sú vo fáze (ich fázový posun nie je nulový). V čase kedy je $p(t) > 0$, je energia dodávaná do záťaže (v rezistoroch sa mení na teplo a v kondenzátoroch a cievkach sa akumuluje v podobe energie elektrického resp. magnetického poľa), avšak keď je $p(t) < 0$, energia sa vracia zo záťaže späť. Ak je sú napätie a prúd vo fáze (t.j. ich fázový posun je rovný nule) je okamžitý výkon vždy kladný a späť sa nevracia žiadna energia. Ak je fázový posun väčší ako nula ale menší ako ±90°, späť sa vracia len časť energie.



Obr. 4.10 Znázornenie okamžitého elektrického výkonu v striedavom obvode [26]

Energia, ktorá sa v obvode premieňa na teplo je **činná energia** charakterizovaná **činným výkonom**. Energia, ktorá sa periodicky vymieňa medzi zdrojom a cievkami resp. kondenzátormi je **jalová energia** charakterizovaná **jalovým výkonom**. Tieto zložky okamžitého výkonu je možné zapísať aj matematicky úpravou vzťahu 4.34 (uvedieme bez odvodenia):

$$\boxed{p(t) = (UI\cos\phi - UI\cos\phi\cos 2\omega t) + (UI\sin\phi\sin 2\omega t) = p_R + p_X} \tag{4.35}$$

kde člen p_R – okamžitý činný výkon a p_X – okamžitý jalový výkon. Všimnime si, že prvý člen v zátvorke vzťahu 4.35 má dve zložky, z ktorých jedna (UI $\cos\phi$) nezávisí od uhlovej frekvencie ω. Ak použijeme vzťah 4.9 pre výpočet strednej hodnoty okamžitého výkonu za jednu periódu, dostaneme:

$$\boxed{P = UI\cos\phi} \tag{4.36}$$

Tento výkon predstavuje **jednosmernú zložku okamžitého činného výkonu**. Jednotkou činného výkonu je **watt** [W].
Ak by sme použili vzťah 4.9 pre výpočet strednej hodnoty okamžitého jalového výkonu, výsledok by bol rovný nule pretože táto zložka okamžitého výkonu je striedavá (symetrická okolo osi x). **Jalový výkon** preto definujeme ako amplitúdu okamžitého jalového výkonu:

$$\boxed{P_Q = UI\sin\phi} \tag{4.37}$$

Jednotkou jalového výkonu je **voltampér reaktančný** [VAr].
Pri výpočtoch sa používa aj **zdanlivý výkon**, ktorý je definovaný:

$$\boxed{P_S = UI} \tag{4.38}$$

Jednotkou zdanlivého výkonu je **voltampér** [VA].
Keďže okamžitý výkon je tiež harmonická funkcia (podobne ako prúd alebo napätie), je možné použiť pri analýze symbolicko-komplexnú metódu a prisúdiť mu charakter komplexnej funkcie času. Platí:

$$\boxed{\overline{P}_S = P + jP_Q = UI\cos\phi + jUI\sin\phi} \qquad (4.39)$$

Vzťah 4.39 je vyjadrený v zložkovom tvare a vyplýva z neho, že reálna zložka komplexného výkonu odpovedá činnému výkonu a imaginárna jalovému výkonu. Komplexný výkon samozrejme môžeme zapísať aj v exponenciálnom tvare:

$$\boxed{\overline{P}_S = P_S e^{j\phi}} \qquad (4.40)$$

kde ϕ - fázový posun medzi napätím a prúdom. Ak vnímame výkon ako komplexnú veličinu, môžeme si ho znázorniť v Gaussovej rovine pomocou fázorov (Obr. 4.11). Toto zobrazenie nazývame **výkonový trojuholník**.

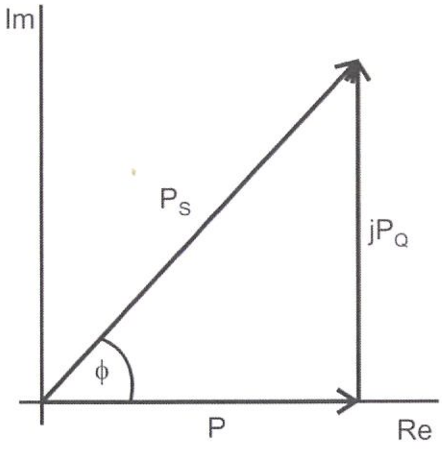
Z výkonového trojuholníka vyplýva:

$$\boxed{\begin{array}{lll} P_S = \sqrt{P^2 + P_Q^2} & P = P_S\cos\phi & P_Q = P_S\sin\phi \\ \mathrm{tg}\phi = P_Q / P & P_Q = P\,\mathrm{tg}\phi & P = P_Q\,\mathrm{cotg}\phi \end{array}} \qquad (4.41)$$

Veličina $\cos\phi$ sa nazýva **účinník** a udáva akú časť zdanlivého výkonu predstavuje činný výkon. Je definovaný ako pomer činného výkonu a zdanlivého výkonu:

$$\boxed{\cos\phi = \frac{P}{P_S}} \qquad (4.42)$$

Keďže je funkcia kosínus párna, znamená to, že účinník nadobúda vždy kladné hodnoty a to bez ohľadu na charakter záťaže (odporovo-indukčná alebo odporovo-kapacitná).



Obr. 4.11 Výkonový trojuholník v Gaussovej rovine

Príklad 4.3

Uvažujme vedenie s koncovým napätím U = 420 V a k nemu paralelne pripojené tri spotrebiče, každý s iným činným výkonom a účinníkom: P_1 = 90 kW, $\cos\phi_1$ = 0,6 (kap.), P_2 = 110 kW, $\cos\phi_2$ = 0,85 (ind.), P_3 = 85 kW, $\cos\phi_3$ = 0,95 (ind.). Vypočítajte fázor prúdu zo zdroja.

Pre určenie fázoru celkového prúdu budeme potrebovať zistiť jeho efektívnu hodnotu a jeho počiatočnú fázu. Celkový činný výkon je daný:

$$P = P_1 + P_2 + P_3 = 285\,kW$$

Jalový výkon jednotlivých spotrebičov dostaneme z činného výkonu pomocou vzťahu $P_Q = P\ \mathrm{tg}\phi$ (vzťah 4.41):

$$\begin{aligned} P_{Q1} &= -90\,\mathrm{tg}(\arccos 0{,}6) = -120\,kVAr \\ P_{Q2} &= 110\,\mathrm{tg}(\arccos 0{,}85) = 68\,kVAr \\ P_{Q3} &= 85\,\mathrm{tg}(\arccos 0{,}95) = 28\,kVAr \end{aligned}$$

Prvý jalový výkon je záporný kvôli kapacitnému charakteru záťaže (fázový posun medzi napätím a prúdom je pri tejto záťaži záporný). Celkový jalový výkon sa rovná:

$$P_Q = P_{Q1} + P_{Q2} + P_{Q3} = -26\,kVAr$$

Celkový zdanlivý výkon je (vzťah 4.41):

$$P_S = \sqrt{P^2 + P_Q^2} = 286\,kVA$$

Efektívna hodnota prúdu zo zdroja je:

$$I = \frac{P_S}{U} = \frac{286.10^3\,VA}{420\,V} \cong 681\,A$$

Fázový posun vzhľadom na napätie určíme zo vzťahu 4.41:

$$\phi = \mathrm{arctg}\left(\frac{P_Q}{P}\right) = \mathrm{arctg}\left(\frac{-26\,kVAr}{285\,kW}\right) = -5^o 12'$$

Počiatočnú fázu prúdu dostaneme zo vzťahu 4.4:

$$\phi_i = \phi_u - \phi = 0^o - (-5^o 12') = 5^o 12'$$

Fázor celkového prúdu zo zdroja je:

$$\bar{I} = \underline{\underline{681 e^{j5^o 12'}}}\,A$$

Zhrnutie

1. *Striedavé elektrické veličiny sú veličiny, ktorých okamžitá hodnota sa v čase mení a po určitej dobe (perióda) sa opakuje. Cyklus je úsek priebehu, ktorý trvá jednu periódu a počet cyklov za jednotku času je frekvencia.*

2. *Harmonické elektrické veličiny sú veličiny, ktoré môžeme popísať funkciou sínus resp. kosínus. Charakterizujeme ich amplitúdou (max. hodnotou), frekvenciou a fázou (okamžitou resp. počiatočnou). Fáza je uhol, ktorý priraďujeme časovému priebehu harmonických veličín (1 perióda má uhol 360°).*
3. *Rozdiel počiatočných fáz dvoch harmonických priebehov nazývame fázový posun. Pre napätie a prúd je definovaný ako rozdiel medzi počiatočnou fázou napätia a počiatočnou fázou prúdu. Ak je kladný, napätie predbieha prúd, ak je záporný, prúd predbieha napätie.*
4. *Efektívna hodnota je taká hodnota jednosmerného prúdu pri ktorom sa vytvorí rovnaké množstvo tepla ako pri priechode daného striedavého prúdu. Efektívna hodnota je približne 70% z maximálnej hodnoty. Stredná hodnota je priemerná hodnota za jednu periódu (prípadne za polovicu periódy, ak ide o striedavý priebeh). Stredná hodnota je približne 64% z maximálnej hodnoty.*
5. *Harmonické funkcie môžeme vyjadriť ako komplexné funkcie času. Takto vyjadrený harmonický priebeh sa nazýva komplexor. Ak si vyjadríme len tú časť priebehu, ktorá nesie informáciu o efektívnej (alebo maximálnej) hodnote a počiatočnej fáze, nazývame ju fázor. Fázory znázorňujeme ako vektory v Gaussovej rovine, pričom ich dĺžka odpovedá ich efektívnej (alebo maximálnej) hodnote a ich uhol s kladnou osou x odpovedá ich počiatočnej fáze.*
6. *V striedavých obvodoch sa ako pasívne prvky vyskytujú rezistor, kondenzátor a cievka. Odpor kondezátora a cievky je frekvenčne závislý a nazýva sa kapacitná a indukčná reaktancia. Kondenzátor spôsobuje fázový posun medzi napätím a prúdom 90° pričom prúd predbieha napätie (znamienko fázového posunu je mínus). Cievka spôsobuje fázový posun medzi napätím a prúdom tiež 90° ale napätie v tomto prípade predbieha prúd (znamienko fázového posunu je plus).*
7. *Pre analýzu striedavých obvodov sa používajú Kirchhoffove zákony a Ohmov zákon, ktoré platia pre fázory. Odpor v striedavých obvodoch sa vyjadruje pomocou komplexného odporu nazývaného impedancia. Jeho reálnu zložku tvorí odpor rezistorov a imaginárnu tvoria reaktancie cievok a kondenzátorov. Prevrátená hodnota impedancie sa nazýva admitancia a prevrátená hodnota reaktancie sa nazýva susceptancia (kapacitná a indukčná).*
8. *Okamžitý výkon v striedavých obvodoch je daný ako súčin okamžitej hodnoty prúdu a napätia, a preto sa mení. Ak má zápornú hodnotu, časť energie sa vracia späť k zdroju (jalová zložka výkonu), ak má kladnú hodnotu, elektrická energia sa v záťaži mení na užitočnú energiu. Pokiaľ má záťaž čisto ohmický charakter (rezistory), celý striedavý výkon je tvorený jeho činnou zložkou. Pokiaľ by mala záťaž čisto reaktančný charakter, celý výkon by bol tvorený jalovou zložkou. Kosínus fázového posunu medzi napätím a prúdom nazývame účinník.*