

ELEKTROTECHNIKA 2

TEMATICKÉ OKRUHY

1. Harmonický ustálený stav – imitance a výkon

Harmonicky proměnné veličiny. Vyjádření fázorů jednotlivými tvary komplexních čísel. Symbolický počet a jeho využití při řešení harmonicky ustáleného stavu. Základní operace symbolického počtu (sčítání, odčítání, násobení, dělení, integrace, derivace). Rezistor, induktor a kapacitor v obvodu ustáleného harmonického proudu. Impedance a admitance základních obvodových prvků. Definice obecné imitance. Zobecněný Ohmův zákon. Výkony v obvodech ustáleného harmonického proudu. Přenos výkonu ze zdroje do zátěže, podmínka výkonového přizpůsobení.

2. Metody analýzy lineárních obvodů v harmonickém ustáleném stavu

Základní zákony elektrických obvodů v symbolickém tvaru. Ohmův zákon, Kirchhoffovy zákony. Sériové a paralelní řazení imitancí. Fázorové diagramy obvodů. Metoda postupného zjednodušování obvodů. Řešení lineárních obvodů pomocí metody úměrných veličin. Metoda Kirchhoffových rovnic. Řešení obvodů metodou smyčkových proudů. Řešení obvodů metodou uzlových napětí. Výpočet napěťového přenosu a vstupní impedance obvodů. Maticová forma zápisu a řešení soustavy rovnic. Řešení obvodů metodou náhradního zdroje. Využití Theveninovy a Nortonovy věty při řešení obvodů v harmonickém ustáleném stavu.

3. Základní vlastnosti a použití obvodů 1. řádu

Definice obvodů 1. řádu. Integrační článek RC, jeho vlastnosti a použití jako dolní propust. Modulová a argumentová kmitočtová charakteristika napěťového přenosu integračního článku, mezní kmitočet, hodograp obvodu. Derivační článek RC, jeho vlastnosti a použití jako horní propust. Modulová a argumentová kmitočtová charakteristika napěťového přenosu derivačního článku, mezní kmitočet, hodograp obvodu. Všepropustný článek RC a jeho použití jako fázovací obvod. Integrační a derivační články RL, jejich přenos, vlastnosti a použití.

4. Základní vlastnosti a použití obvodů 2. řádu

Definice obvodů 2. řádu. Sériový rezonanční obvod RLC a jeho využití. Fázorový diagram, rezonanční kmitočet, činitel jakosti. Modulová a argumentová kmitočtová charakteristika, činitel jakosti, šířka propustného pásma. Využití obvodu jako dolní propust, horní propust, pásmová propust, pásmová zádrž. Paralelní rezonanční obvod RLC a jeho využití jako pásmová propust. Fázorový diagram, rezonanční kmitočet, činitel jakosti. Modulová a argumentová kmitočtová charakteristika, činitel jakosti, šířka propustného pásma. Příklady využití sériového a paralelního obvodu RLC v silnoproudé a slaboproudé elektrotechnice.

5. Trojfázové obvody, jejich vlastnosti, použití, výkony v trojfázových obvodech

Mnohofázové soustavy - základní pojmy a vztahy. Soustava trojfázová, šestifázová, dvojfázová a jejich použití. Trojfázová soustava obvodů a její popis. Souměrná trojfázová soustava a její vlastnosti. Matematické vyjádření souměrné trojfázové soustavy, operátor natočení. Spojení zdrojů a zátěže do hvězdy. Vztah mezi fázory sdružených napětí a fázových napětí-fázorové diagramy. Spojení zdrojů a zátěže do trojúhelníka. Vztah mezi fázory

fázových a sdružený proudů. Výkon trojfázové soustavy nesouměrného a souměrného obvodu. Příklady výpočtu výkonů pro symetrickou a nesymetrickou zátěž. Porovnání ekonomiky přenosu energie u jednofázové a trojfázové soustavy. Využití přepínání zapojení spotřebiče z hvězdy do trojúhelníka.

6. Analýza trojfázových obvodů v harmonickém ustáleném stavu

Základní požadavky analýzy trojfázových obvodů. Analýza souměrných trojfázových obvodů. Analýza obvodů metodou smyčkových proudů. Analýza obvodů metodou uzlových napětí. Analýza základních jednoduchých poruchových stavů soustavy. Příklady analýzy jednodušších trojfázových obvodů. Nesouměrná trojfázová soustava a její souměrné složky. Výkon nesouměrné trojfázové soustavy, analýza nesouměrných trojfázových obvodů metodou souměrných složek.

7. Přechodné děje v lineárních obvodech

Přechodné děje a metody jejich řešení. Řešení diferenciálních rovnic obvodu. Obvody 1. řádu. Řešení přechodných dějů v RC a RL obvodech. Příklady řešení přechodných dějů v obvodech 1. řádu. Formulace a řešení diferenciálních rovnic obvodů 2. řádu. Aperiodický tlumený děj. Kritický tlumený děj. Podkritický tlumený kmitavý děj. Netlumený děj. Příklady řešení přechodných dějů v obvodech 2. řádu.

8. Řešení přechodných dějů pomocí Laplaceovy transformace

Princip řešení přechodných dějů pomocí Laplaceovy transformace. Základní vztahy Laplaceovy transformace. Transformace základních matematických operací. Příklady přímé transformace. Příklady zpětné transformace. Inverze Laplaceových obrazů pomocí slovníku. Inverze pomocí Heavisideova vzorce. Numerická inverze Laplaceových obrazů. Operátorové charakteristiky obvodových prvků a jejich využití při formulaci rovnic obvodů. Náhradní schémata zdrojů pro řešení nenulových počátečních podmínek. Příklady řešení obvodů 1. a 2. řádu. Řešení periodického ustáleného stavu operátorovou metodou.

9. Přenosová vedení

Obvody se soustředěnými a rozloženými parametry. Základní rovnice vedení. Primární parametry vedení. Náhradní schéma elementárního úseku vedení. Telegrafní rovnice vedení a jejich řešení v časové oblasti. Vlny na bezztrátovém vedení, vlnové rovnice. Sekundární parametry vedení - vlnová impedance a činitel šíření. Nekonečně dlouhé vedení. Vedení konečné délky. Vlna postupná a vlna odražená. Poměry na vedení se ztrátami. Podmínky pro nezkreslující vedení. Poměry na obecném vedení se ztrátami.

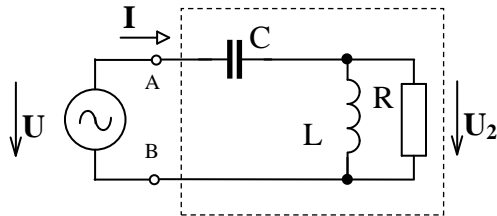
10. Harmonicky ustálený stav na vedení

Vznik harmonicky ustáleného stavu na vedení. Postupná a zpětná vlna na vedení. Charakteristická impedance, konstanta šíření, délka vlny na vedení. Vznik stojatých vln, definice činitele odrazu. Poměr stojatých vln pro přizpůsobené a nepřizpůsobené vedení. Vstupní impedance bezztrátového vedení konečné délky. Impedančně přizpůsobené vedení. Vstupní impedance vedení nakrátko a naprázdno v závislosti na délce vedení. Vedení zakončené reaktancí. Vlastnosti vedení poloviční a čtvrtinové vlnové délky - transformace zatěžovací impedance. Vstupní impedance krátkého vedení. Parametry základních druhů vedení.

UKÁZKOVÉ PŘÍKLADY

1) Harmonický ustálený stav – imitance a výkon

Určete impedanci zátěže Z_{AB} obecně, vypočtete numericky impedanci zátěže Z_{AB} a fázor proudu I a napětí U_2 (ve složkovém i exponenciálním tvaru). Vypočtete numericky celkový výkon zátěže (komplexní S , zdánlivý $|S|$, činný P , jalový Q).



$$\begin{aligned} R &= 200 \, \Omega \\ C &= 5 \, \mu\text{F}, \\ L &= 1 \, \text{H}, \\ f &= 50\text{Hz} \\ U &= 230 e^{j0} \, \text{V} \end{aligned}$$

Řešení

$$Z_{AB} = \frac{1}{j\omega C} + \frac{R \cdot j\omega L}{R + j\omega L} = \frac{\omega^2 L^2}{R^2 + \omega^2 L^2} + j \frac{R^2 \omega L}{R^2 + \omega^2 L^2} - j \frac{1}{\omega C}$$

$$Z_{AB} = 142,31 - j546,01 = 564,25 e^{-j75,39^\circ} \, \Omega$$

$$Z_2 = 142,31 + j90,603 = 168,71 e^{j32,48^\circ} \, \Omega$$

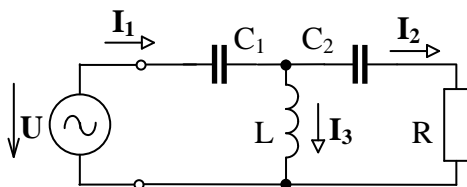
$$I = U / Z_{AB} = 0,1028 + j0,3944 = 0,40761 e^{j75,39^\circ} \, \text{A}$$

$$U_2 = I \cdot Z_2 = -21,105 + j65,451 = 68,769 e^{j107,87^\circ} \, \text{V}$$

$$S = U \cdot I^* = U^2 / Z^* = 23,646 - j90,72 = 93,751 e^{-j75,39^\circ} \, \text{VA}$$

2) Metody analýzy lineárních obvodů v harmonickém ustáleném stavu

Metodou smyčkových proudů vypočtete fázory proudů I_1 , I_2 , a I_3 ve složkovém i exponenciálním tvaru, uveďte výrazy pro okamžité hodnoty těchto proudů $i_1(t)$, $i_2(t)$ a $i_3(t)$.



$$\begin{aligned} R &= 100 \, \Omega, \\ C_1 &= 5 \, \mu\text{F}, \quad C_2 = 10 \, \mu\text{F} \\ L &= 0,5 \, \text{H} \\ f &= 50\text{Hz} \\ U &= 230 e^{j0} \, \text{V} \end{aligned}$$

Řešení

$j(\omega L - 1/\omega C_1)$	$-j\omega L$
$-j\omega L$	$R + j(\omega L - 1/\omega C_2)$

I_{S1}
I_{S2}

U
0

$-j479,5401$	$-j157,0796$
$-j157,0796$	$100 - j161,2302$

I_{S1}
I_{S2}

230
0

$$\begin{aligned}
\mathbf{D} &= -52642,367 - j 47954,014 = 71209,594 e^{j42,33^\circ} \\
\mathbf{D}_1 &= 23000 - j 37082,958 = 43636,519 e^{-j 58,19^\circ} \\
\mathbf{D}_2 &= 0 + j 36128,315 = 36128,215 e^{j90^\circ} \\
\mathbf{I}_{S1} = \mathbf{D}_1 / \mathbf{D} = \mathbf{I}_1 &= 0,1119 + j 0,60248 = 0,6128 e^{j79,48^\circ} \text{ A} \\
\mathbf{I}_{S2} = \mathbf{D}_2 / \mathbf{D} = \mathbf{I}_2 &= -0,34166 - j 0,37506 = 0,50735 e^{-j132,33^\circ} \text{ A} \\
\mathbf{I}_3 = \mathbf{I}_{S1} - \mathbf{I}_{S2} &= 0,45358 + j 0,97755 = 1,0777 e^{j65,11^\circ} \text{ A} \\
\mathbf{i}_1(t) &= 0,8666 \sin(314,16t + 79,48^\circ) \text{ A}, \\
\mathbf{i}_2(t) &= 0,7175 \sin(314,16t - 132,33^\circ) \text{ A}, \\
\mathbf{i}_3(t) &= 1,5241 \sin(314,16t + 65,11^\circ) \text{ A}
\end{aligned}$$

3) Základní vlastnosti a použití obvodů 1. řádu

Na vstup derivačního CR článku ($R=100 \Omega$, $C=100 \text{ nF}$) je přiváděno harmonické napětí o amplitudě 1 V : $u_1(t) = U_m \sin(\omega t) = I \sin(\omega t) [V]$. Určete oblast práce článku a výstupní napětí článku $u_2(t)$ pro kmitočty a) $f=160 \text{ Hz}$, b) $f=1600 \text{ Hz}$, c) $f=16000 \text{ Hz}$.

- a) $f=160 \text{ Hz}$: $U_2=0,100 e^{j84,3^\circ} \text{ V}$, $u_2(t) = 0,100 \sin(\omega t + 84,3^\circ) \text{ V}$, oblast derivace,
b) $f=1600 \text{ Hz}$: $U_2=0,7090 e^{j44,8^\circ} \text{ V}$, $u_2(t) = 0,7090 \sin(\omega t + 44,8^\circ) \text{ V}$, oblast mezního kmitočtu,
c) $f=16000 \text{ Hz}$: $U_2=0,9951 e^{j5,7^\circ} \text{ V}$, $u_2(t) = 0,9951 \sin(\omega t + 5,7^\circ) \text{ V}$, oblast přenosu.

4) Základní vlastnosti a použití obvodů 2. řádu

Na vstup sériového RLC obvodu ($R=10 \Omega$, $L=1 \text{ mH}$, $C=100 \text{ nF}$) je přiváděno harmonické napětí o amplitudě 1 V : $u_1(t) = U_m \sin(\omega t) = I \sin(\omega t) [V]$. Určete rezonanční kmitočet obvodu f_0 , fázory proudu obvodem a napětí na jednotlivých prvcích obvodu pro kmitočty a) $f=15,9155 \text{ kHz}$, b) $f=159 \text{ kHz}$, c) $f=1,59 \text{ kHz}$.

$$f_r = \frac{1}{2\pi\sqrt{LC}} = 15,9155 \text{ kHz}, \quad \mathbf{I}(j\omega) = \frac{\mathbf{U}}{\mathbf{Z}(j\omega)} = \mathbf{U} \frac{1}{R + j(\omega L - \frac{1}{\omega C})}$$

$$\mathbf{U}_R = R\mathbf{I}, \quad \mathbf{U}_L = j\omega L\mathbf{I}, \quad \mathbf{U}_C = -j\frac{1}{\omega C}\mathbf{I}$$

ad a) $f=15,9155 \text{ kHz}$: $\mathbf{I}=0,1 e^{j0^\circ} [A]$, $\mathbf{U}_R=1,0 e^{j0^\circ} [V]$, $\mathbf{U}_L=10,0 e^{j90^\circ} [V]$, $\mathbf{U}_C=10,0 e^{-j90^\circ} [V]$,

ad b) $f=159 \text{ kHz}$: $\mathbf{I}=0,001 e^{-j89,4^\circ} [A]$, $\mathbf{U}_R=0,010 e^{-j89,4^\circ} [V]$, $\mathbf{U}_L=1,01 e^{j0,6^\circ} [V]$,
 $\mathbf{U}_C=0,01 e^{-j179,4^\circ} [V]$,

ad c) $f=1,59 \text{ kHz}$: $\mathbf{I}=0,001 e^{j89,4^\circ} [A]$, $\mathbf{U}_R=0,01 e^{j89,4^\circ} [V]$, $\mathbf{U}_L=0,01 e^{j179,4^\circ} [V]$,
 $\mathbf{U}_C=1,01 e^{-j0,6^\circ} [V]$.

5) Trojfázové obvody, jejich vlastnosti, použití, výkony v trojfázových obvodech

Spotřebič je zapojen do trojúhelníka, impedance $Z_1=Z_2=(15 + j 15)\Omega$, $Z_3 =(10 + j25)\Omega$. Je napájen souměrným zdrojem o sdružených napětích $U_s = 400$ V.

($U_{UV}= 400 e^{j 0}$, $U_{VW} = 400 e^{-j120^\circ}$, $U_{WU} = 400 e^{j 120^\circ}$). Vypočtěte fázory proudů impedancemi, celkový komplexní, činný, jalový a zdánlivý výkon spotřebiče.

$$I_1=U_{UV}/Z_1=400/(15+15j)=13,3 - j13,3 = 18,856 e^{-j45^\circ} \text{ A}$$

$$I_2=U_{VW}/Z_2 = (-200-j346,41)/(15+15j) = -18,2136 -j4,8803 = 18,856 e^{-j165^\circ} \text{ A}$$

$$I_3=U_{WU}/Z_3=(-200+j346,41)/(15+15j)= 9,1865+j11,6746 = 14,856 e^{-j51,8^\circ} \text{ A}$$

$$S= U_{UV} I_1^* + U_{VW} I_2^* + U_{WU} I_3^*=12873,56189 + j16183,8856=20679,6216 e^{j51,5^\circ} \text{ VA}$$

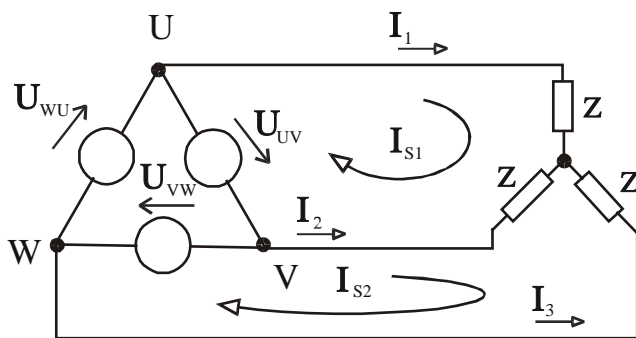
$$P = \text{Re}[S] = 12873,57 \text{ W}, Q = \text{Im}[S] = 16183,89 \text{ VAR}, S = |S| = 20679,62 \text{ VA}$$

6) Analýza trojfázových obvodů v harmonickém ustáleném stavu

Spotřebič je zapojen do hvězdy, impedance $Z_1 = Z_2 = Z_3 = (10 + j 25)\Omega$.

Je napájen souměrným zdrojem o sdružených napětích $U_s = 380$ V. ($U_{UV}= 380 e^{j0}$, $U_{VW} = 380 e^{-j120^\circ}$, $U_{WU} = 380 e^{j120^\circ}$). Metodou smyčkových proudů vypočtěte fázory proudů impedancemi spotřebiče.

Řešení metodou smyčkových proudů ($Z_1 = Z_2 = Z_3 = Z$)



$$\begin{bmatrix} 2Z & -Z \\ -Z & 2Z \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} I_{S1} \\ I_{S2} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} U_{UV} \\ U_{VW} \end{bmatrix} \Rightarrow \begin{bmatrix} 20 + j50 & -10 - j25 \\ -10 - j25 & 20 + j50 \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} I_{S1} \\ I_{S2} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 380 \angle 0^\circ \\ 380 \angle -120^\circ \end{bmatrix}$$

$$I_{S1} = \frac{\Delta_1}{\Delta} = \frac{13927,2 + j10959,1}{-1575 + j1500} = -1,1620 - j8,0648 \text{ [A]}$$

$$I_{S2} = \frac{\Delta_2}{\Delta} = \frac{16454,5 - j6581,8}{-1575 + j1500} = -7,5653 - j3,0261 \text{ [A]}$$

$$I_1 = I_{S1}, I_2 = I_{S2} - I_{S1}, I_3 = -I_{S2}$$

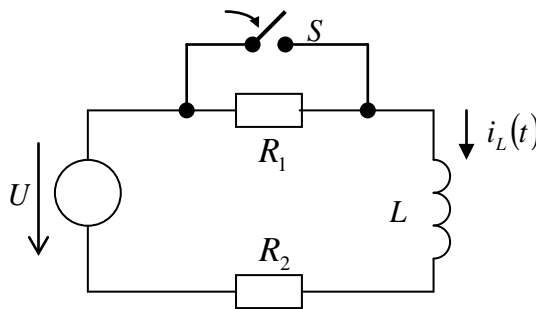
$$I_1 = -1,1620 - j8,0648 \text{ [A]} = 8,1481 \angle -98,20^\circ \text{ [A]}$$

$$I_2 = -6,4033 + j5,0387 \text{ [A]} = 8,1481 \angle 141,80^\circ \text{ [A]}$$

$$I_3 = 7,5653 + j3,261A = 8,1481 \angle 21.80^\circ [A]$$

8) Řešení přechodných dějů pomocí Laplaceovy transformace

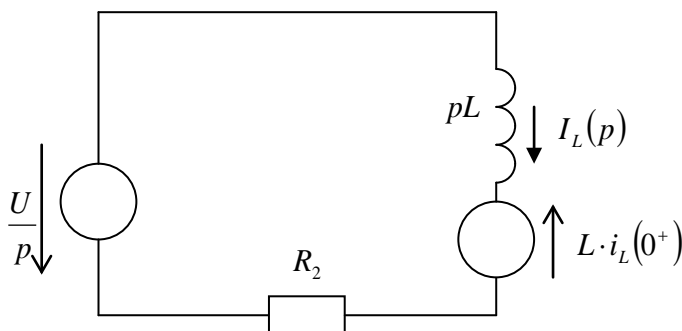
Obvod na schématu se nacházel před sepnutím spínače v ustáleném stavu. Odvoďte pomocí Laplaceovy transformace obecně i číselně časový průběh proudu $i_L(t)$ induktoru L po sepnutí spínače a naznačte jeho průběh graficky. Vypočítejte velikost proudu $i_L(t)$ v čase $t=0$, $t=\infty$, $t=1 \mu s$.



$$\begin{aligned} U &= 24 \text{ V} \\ L &= 1,5 \text{ mH} \\ R_1 &= 3 \text{ k}\Omega \\ R_2 &= 1 \text{ k}\Omega \end{aligned}$$

$$i_L(0) = \frac{U}{R_1 + R_2} = \frac{24}{4 \cdot 10^3} = 6 \cdot 10^{-3} = 6 \text{ mA}$$

$$I_L(p) = \frac{\frac{U}{p} + L \cdot i_L(0^+)}{pL + R_2} = \frac{pi_L(0^+) + \frac{U}{L}}{p\left(p + \frac{R_2}{L}\right)} = i_L(0^+) \frac{1}{p + \frac{R_2}{L}} + \frac{U}{R_2} \frac{\frac{R_2}{L}}{p\left(p + \frac{R_2}{L}\right)}$$



S využitím známých tvarů pro L.T.

$$\mathcal{L}\{e^{-at}\} = \frac{1}{p+a}, \quad \mathcal{L}\{1 - e^{-at}\} = \frac{a}{p(p+a)},$$

je originál k obrazu proudu induktorem $I_L(p)$:

$$i_L(t) = \frac{U}{R_1 + R_2} e^{-\frac{R_2}{L}t} + \frac{U}{R_2} \left(1 - e^{-\frac{R_2}{L}t}\right) = \underline{\underline{\frac{U}{R_2} \left(1 - \frac{R_1}{R_1 + R_2} e^{-\frac{R_2}{L}t}\right) \text{ A}}}$$

$$i_L(t) = \frac{U}{R_2} \left(1 - \frac{R_1}{R_1 + R_2} \cdot e^{-\frac{R_2}{L}t} \right) = \underline{\underline{24 \cdot 10^{-3} (1 - 0,75 \cdot e^{-6,66 \cdot 10^5 t})}} \text{ A}$$

$$i_L(t = 1 \mu s) = \underline{\underline{14,7585 \cdot 10^{-3} \text{ A}}}, \quad i_L(t \rightarrow \infty) = \frac{U}{R_2} = \frac{24}{1 \cdot 10^3} = 24 \cdot 10^{-3} = 24 \text{ mA}$$

9) Přenosová vedení

Bezeztrátové homogenní vedení s primárními parametry $C_0 = 100$ [pF/m], $L_0 = 0,25$ [μ H/m], o délce $l = 50$ m pracuje na kmitočtu $f = 200$ MHz, je zatíženo vlnovou impedancí $Z_2 = Z_V$. Vypočítejte: a) Sekundární parametry vedení (γ, Z_V) a délku vlny na vedení λ , b) Délku (kabelu) vedení l pro čtvrtvlnné vedení, c) Vstupní impedanci Z_{VST} pro vedení délky $2m$ - pro přizpůsobené vedení, pro vedení naprázdno a pro vedení nakrátko, d) Činitel odrazu ρ pro $Z_2 = 0, Z_2 = \infty$,

$$Z_2 = Z_V$$

$$Z_V = \sqrt{\frac{L_0}{C_0}} = 50,0 \ \Omega, \quad \gamma = j\omega\sqrt{L_0 C_0} = j 6,2832 \ \text{1/m}$$

$$\lambda = \frac{2\pi}{\alpha}, \text{ proto } \lambda/4 = \frac{\pi}{2\alpha} = 0,25 \ \text{m}, \alpha l = 12,5664$$

$$Z_{VST} = Z_V = 50,0 \ \Omega, \quad Z_{VST0} = -j Z_V \cotg \alpha l = -j 1,7015 \cdot 10^6 \ \Omega$$

Protože

$$\rho(j\omega) = \frac{Z_2(j\omega) - Z_V(j\omega)}{Z_2(j\omega) + Z_V(j\omega)},$$

pro $Z_2 = 0 \dots \rho = -1$, $Z_2 = \infty \dots \rho = 1$, $Z_2 = Z_V \dots \rho = 0$.

10) Harmonicky ustálený stav na vedení

Homogenní vedení s primárními parametry $G_0 = 0$ [S/m], $R_0 = 55$ [m Ω /m],

$C_0 = 100$ [pF/m], $L_0 = 0,25$ [μ H/m] o délce $l = 50$ m pracuje na kmitočtu $f = 200$ MHz, je zatíženo vlnovou impedancí $Z_2 = Z_V$.

Vypočítejte: a) sekundární parametry vedení (γ, Z_V), délku vlny na vedení λ

b) vstupní napětí a vstupní proud, je-li napětí na výstupu $u_2(t) = U_{2m} \sin(\omega t + \psi_u) = \sqrt{2} \cdot 50 \sin(\omega t)$ [V]

$$a) \quad \hat{\gamma} = \sqrt{(R_0 + j\omega L_0)(G_0 + j\omega C_0)} \doteq (5,5 \cdot 10^{-4} + j6,2832)m^{-1} = 6,2832 \angle 89,89^\circ \text{ m}^{-1}$$

$$\hat{Z}_v = \sqrt{\frac{R_0 + j\omega L_0}{G_0 + j\omega C_0}} \doteq (50 - j4.3768 \cdot 10^{-3}) \Omega = 50.00 \angle -5.015 \cdot 10^{-3} \Omega$$

$$\lambda = v_f T = \frac{\omega}{\alpha} T = \frac{2\pi}{\alpha} = \frac{2\pi}{\text{Im}\{\gamma\}} \doteq 1.000 m$$

b) - fázor efektivní hodnoty $\hat{U}_2 = 50V$, z první kaskádní rovnice při $\hat{Z}_2 = \hat{Z}_v$

$$\begin{aligned} \hat{U}_1 &= \hat{U}_2 \cosh \hat{\gamma} l + \hat{Z}_v \hat{I}_2 \sinh \hat{\gamma} l = \hat{U}_2 (\cosh \hat{\gamma} l + \sinh \hat{\gamma} l) = \hat{U}_2 \cdot e^{\hat{\gamma} l} \doteq \\ &\doteq (51.3941 + j6.193 \cdot 10^{-5}) V = 51.394 \angle 6.9043 \cdot 10^{-5} V \end{aligned}$$

$$\Rightarrow u_1(t) = 72.682 \sin(\omega t + 6.9043 \cdot 10^{-5}) V$$

$$\hat{I}_1 = \frac{\hat{U}_1}{\hat{Z}_{vst}} = \frac{\hat{U}_1}{\hat{Z}_v} \doteq (1.0279 + j5.0844 \cdot 10^{-3}) A = 1.0279 \angle 9.1214 \cdot 10^{-5} A$$

$$\Rightarrow i_1(t) = 1.4536 \sin(\omega t + 9.1214 \cdot 10^{-5}) A$$