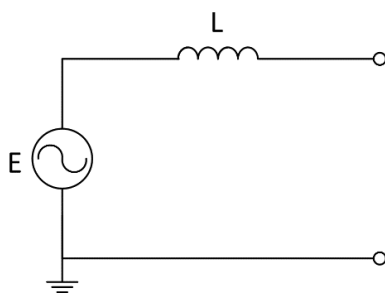


2. Cvičenie

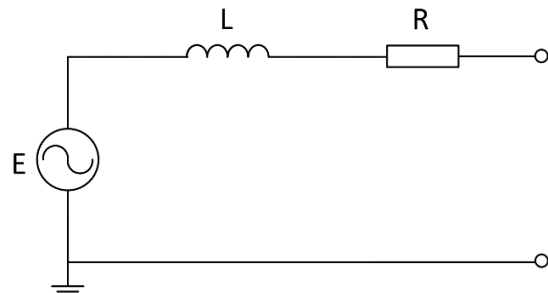
Charakteristiky nadradenej sústavy

Charakter nadradenej sústavy má význam pri sledovaní šírenia sa vyšších harmonických rušení. Pod charakterom sústavy si môžeme predstaviť amplitúdovú frekvenčnú charakteristiku videnej impedancie v mieste pripojenia. Miesto pripojenia sa v odbornej literatúre označuje názvom Point of Common Coupling a označuje sa skratkou PCC. V praxi sa môžeme stretnúť s viacerými druhmi charakteristík:

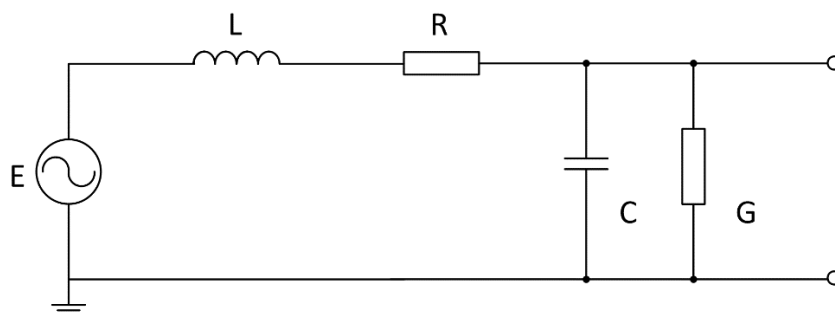
- Sieť indukčného charakteru – najjednoduchšia možnosť náhrady, videná impedancia pre 50 Hz zodpovedá reaktanciam, určeným so štítkov zariadení. Následne sa vykoná výpočet indukčnosti.
- Sieť indukčného charakteru s uvažovaním činného odporu – oproti predošlej variante sa uvažuje s pomerom $X_{50\text{Hz}}/R$.
- Sieť s paralelnou rezonanciou spôsobenou parazitnými kapacitami káblových vedení.
- Sieť s paralelnými rezonanciami s prvkami v sústave.



Sieť indukčného charakteru



Sieť indukčného charakteru s uvažovaním činného odporu



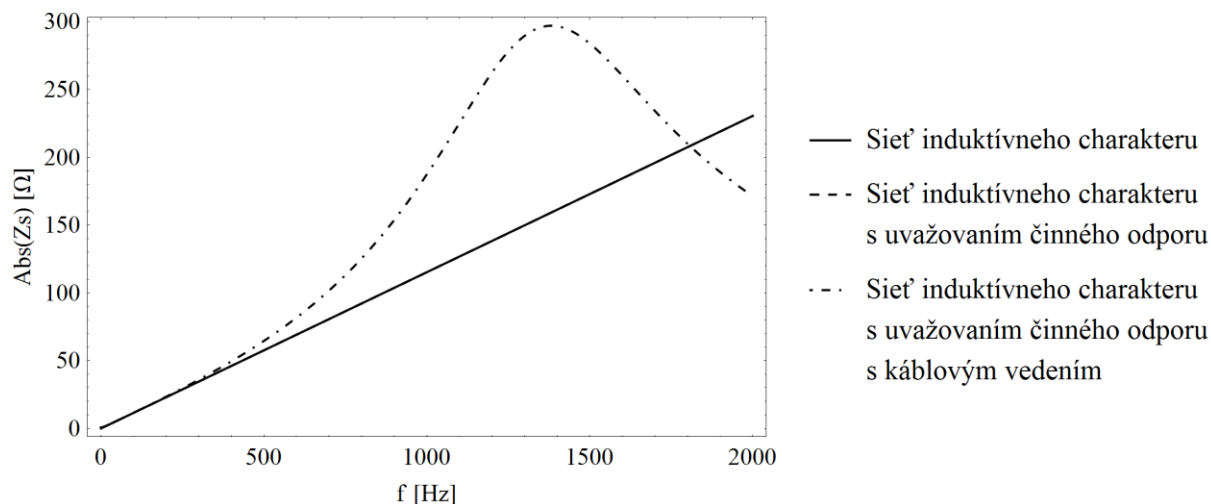
Sieť RL charakteru s káblovým vedením

Obr.1: Modelové schémy pre skúmanie charakteristík nadradenej sústavy rôznych druhov

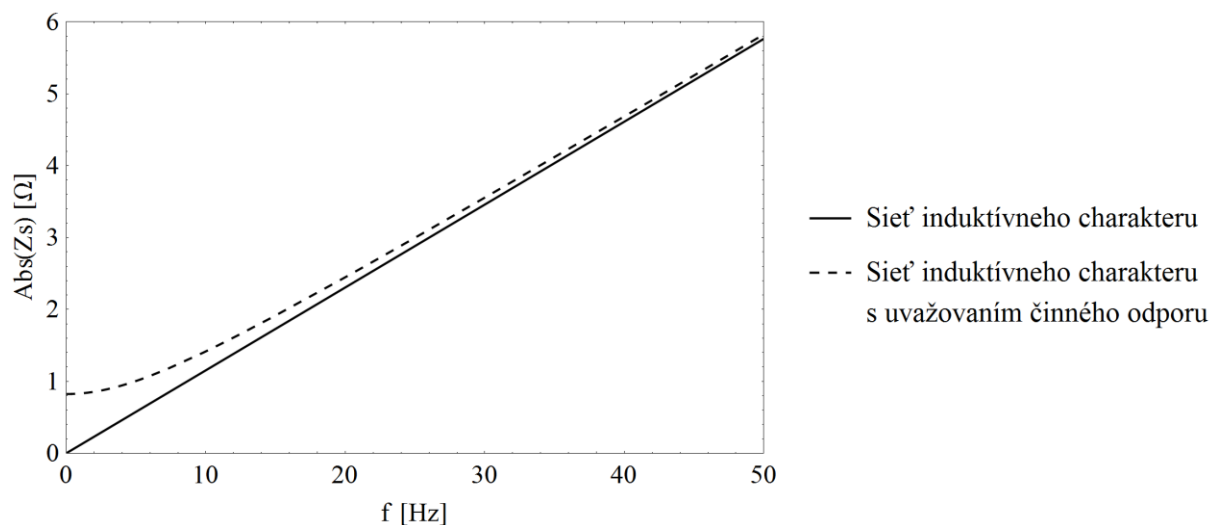
Obrázky 2 a 3 ukazujú amplitúdové frekvenčné charakteristiky nadradenej sústavy pre zapojenia na obrázku 1. Použité parametre sú zhrnuté v tabuľke 1.

L	18,35 mH
R	0,823 Ω
C	725 nF
G	0,0033 S

Tab. 1: Použité náhradné parametre pre ukážky charakteristík nadradenej sústavy



Obr. 2: Porovnanie charakteristík nadradenej sústavy



Obr. 3: Porovnanie charakteristík nadradenej sústavy - detail

Vyššie harmonické v zložkových sústavách

Na vyššie harmonické rušenia je potrebné nahliadať aj z hľadiska zložkových sústav, najmä z hľadiska šírenia sa netočivej zložky. Z predošlých kurzov vieme, že netočivú zložku je možné obmedziť zapojením vinutí transformátoru do trojuholníka, alebo eliminovať pomocou transformátoru s vinutím zapojeným do lomenej hviezdy. Skúmaním jednotlivých vyšších harmonických dospejeme

k zaujímavým záverom. Začneme definíciou transformačnej matice (1), ktorá pretransformuje trojfázový systém do zložkových sústav.

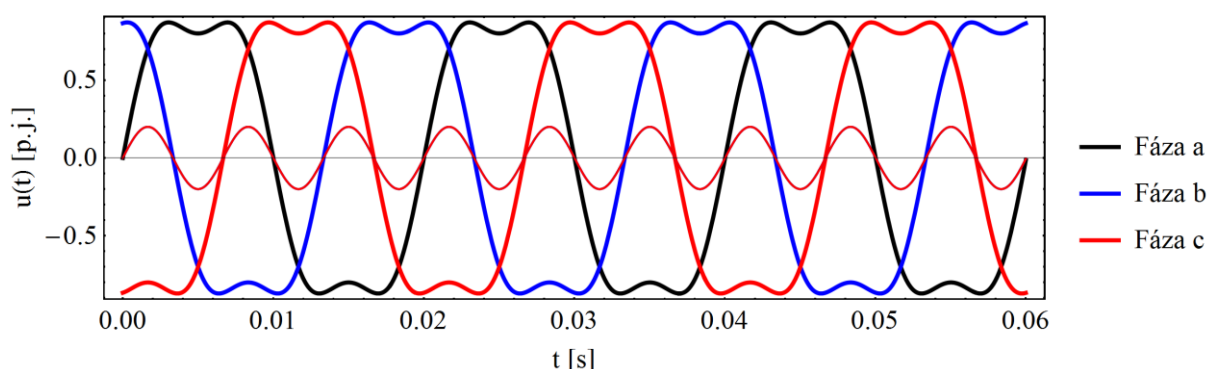
$$\mathbf{T} = \begin{pmatrix} 1 & 1 & 1 \\ 1 & a^2 & a \\ 1 & a & a^2 \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} 1 & 1 & 1 \\ 1 & e^{-j\frac{2\pi}{3}} & e^{j\frac{2\pi}{3}} \\ 1 & e^{j\frac{2\pi}{3}} & e^{-j\frac{2\pi}{3}} \end{pmatrix} \quad (1)$$

Ďalej si zadefinujeme fázory napätí (2) až (4), ktoré obsahujú aj harmonickú zložku h-teho rádu s amplitúdou 20 % základnej harmonickej. Ukážka pre 3. harmonickú je na obrázku 4.

$$\hat{U}_a = e^{j(314t)} + 0.2e^{j(314ht)} \quad (2)$$

$$\hat{U}_b = e^{j(314t + \frac{2}{3}\pi)} + 0.2e^{j*(314h*t + h\frac{2}{3}\pi)} \quad (3)$$

$$\hat{U}_c = e^{j(314t - \frac{2}{3}\pi)} + 0.2e^{j*(314h*t - h\frac{2}{3}\pi)} \quad (4)$$



Obr. 4: Ukážka priebehov napätí zaťažených 3. harmonickou

Zadefinujme si pre ďalšie výpočty transformáciu z trojfázového systému do zložkových sústav podľa (5).

$$\begin{pmatrix} \hat{U}_0 \\ \hat{U}_1 \\ \hat{U}_2 \end{pmatrix} = \frac{1}{3} \begin{pmatrix} 1 & 1 & 1 \\ 1 & e^{-j\frac{2\pi}{3}} & e^{j\frac{2\pi}{3}} \\ 1 & e^{j\frac{2\pi}{3}} & e^{-j\frac{2\pi}{3}} \end{pmatrix} \begin{pmatrix} \hat{U}_a \\ \hat{U}_b \\ \hat{U}_c \end{pmatrix} = \frac{1}{3} \mathbf{T} \cdot \mathbf{U}_{3f} = \mathbf{U}_{zl} \quad (5)$$

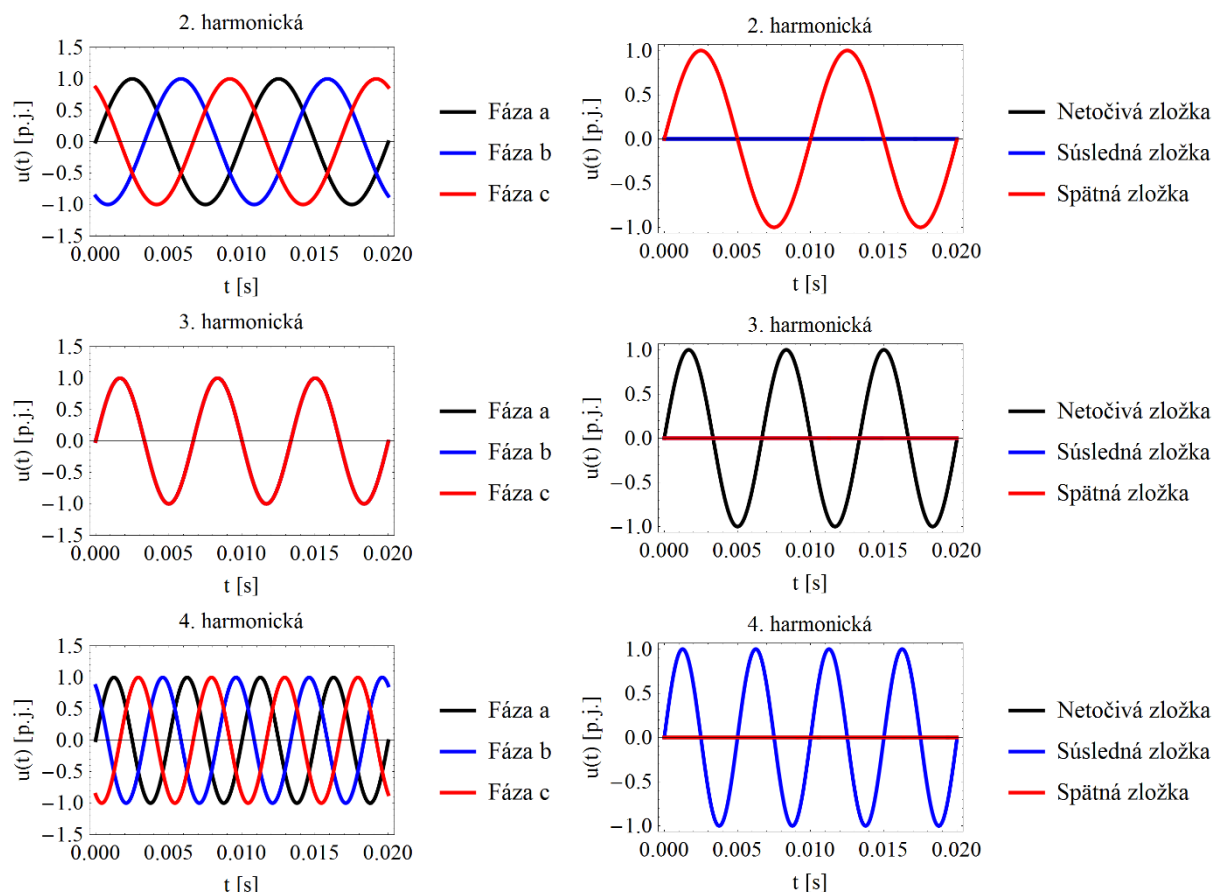
\hat{U}_0 predstavuje netočivú zložku, \hat{U}_1 predstavuje súslednú zložku a \hat{U}_2 predstavuje spätnú zložku. V tejto chvíli by sme mohli analyzovať priebehy napätí narušených vyššími harmonickými. Aby bol výsledný efekt jednoznačne pozorovateľný nebudeme u priebehov uvažovať zložku základnej harmonickej a podľa vzťahov (6) až (8) si zadefinujeme fázory napätí vyšších harmonických.

$$\hat{U}_a = 0.2e^{j(314ht)} \quad (2)$$

$$\hat{U}_b = 0.2e^{j*(314h*t + h\frac{2}{3}\pi)} \quad (3)$$

$$\hat{U}_c = 0.2e^{j*(314h*t - h\frac{2}{3}\pi)} \quad (4)$$

Vyjadrené napätia trojfázového systému transformujeme podľa (5). Pôvodné a transformované priebehy pre 2., 3. a 4. harmonickú si ukážeme na obrázku 5.



Obr. 5: Transformácia vyšších harmonických do zložkových sústav

Skúmaním vyšších rádov harmonických by sme dospeli k univerzálnym pravidlám (5) až (7) pre rády vyšších harmonických.

$$\text{Netočivá zložka: } h = 3k \quad (5)$$

$$\text{Súsledná zložka: } h = 3k + 1 \quad (6)$$

$$\text{Spätná zložka: } h = 3k - 1 \quad (7)$$

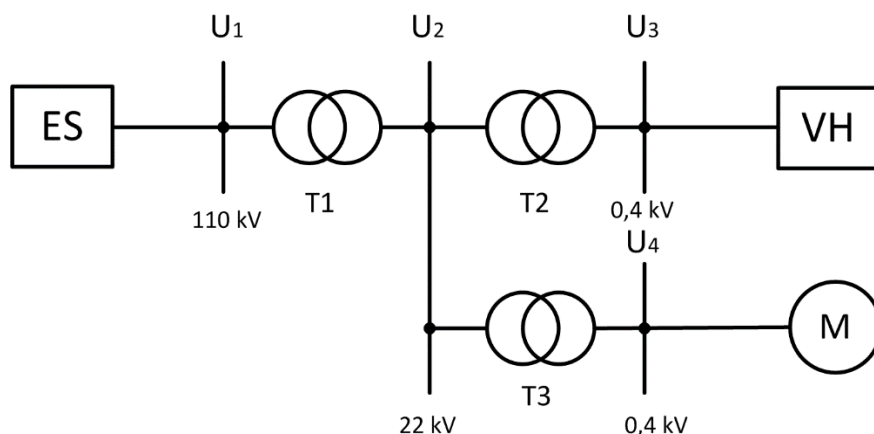
pre $k = 1, 2, \dots, n$

Dôležitým dôsledkom je, že 3. harmonická a jej násobky sa prejavujú len v netočivej zložke. To znamená, že 3. harmonickú a jej násobky dokážeme eliminovať vhodným zapojením vinutí transformátorov.

Šírenie vyšších harmonických

Princípy šírenia vyšších harmonických si ukážeme na názornom príklade. Schéma sústavy je znená na obrázku 6, pričom parametre jednotlivých komponent sú zhrnuté v tabuľke 2. Skratkou „VH“ je označený prúdový zdroj vyšších harmonických. Začneme prepočtom indukčností na hladinu NN tj. 400 V. Pre sústavu platí (8).

$$L_s = \frac{U_{Ns}^2}{S_{ks}} \frac{1}{2\pi 50} p_{T1}^2 p_{T3}^2 = \frac{110^2}{1500} \frac{1}{2\pi 50} \left(\frac{22}{110}\right)^2 \left(\frac{0,4}{22}\right)^2 \quad (8)$$



Obr. 6: Schéma zapojenia sústavy pre ukázkový výpočet

Prvok	uk [%]	U1 [kV]	U2 [kV]	Sn [MVA]	Pk [kW]	Sks [MVA]	Un [kV]	Pn [kW]	cosφ	iz [-]
T1	4	110	22	80	12	-	-	-	-	-
T2	4	22	0,4	0,16	10,35	-	-	-	-	-
T3	4	22	0,4	0,1	2,35	-	-	-	-	-
Sústava	-	-	-	-	-	1500	110	-	-	-
M	-	-	-	-	-	-	0,4	16	0,8	8

Tab. 2: Parametre prvok pre ukázkový výpočet

Pre transformátory platí (9) až (14).

$$L_{T1} = u_{kT1} \frac{U_{nT1}^2}{S_{nT1}} \frac{1}{2\pi 50} p_{T3}^2 = 0,04 \frac{110^2}{80} \frac{1}{2\pi 50} \left(\frac{0,4}{22}\right)^2 \quad (9)$$

$$L_{T2} = u_{kT2} \frac{U_{nT2}^2}{S_{nT2}} \frac{1}{2\pi 50} = 0,04 \frac{22^2}{0,16} \frac{1}{2\pi 50} \quad (10)$$

$$L_{T3} = u_{kT3} \frac{U_{nT3}^2}{S_{nT3}} \frac{1}{2\pi 50} = 0,04 \frac{22^2}{0,1} \frac{1}{2\pi 50} \quad (11)$$

$$R_{T1} = \frac{P_k U_{nT1}^2}{S_{nT1}^2} p_{T3}^2 = \frac{12 * 22^2}{80^2} \left(\frac{0,4}{22}\right)^2 \quad (12)$$

$$R_{T2} = \frac{P_k U_{nT2}^2}{S_{nT2}^2} = \frac{10,35 * 0,4^2}{0,16^2} \quad (13)$$

$$R_{T3} = \frac{P_k U_{nT3}^2}{S_{nT3}^2} = \frac{2,35 * 0,4^2}{0,1^2} \quad (14)$$

Pre motor platí (15).

$$L_M = \frac{U_{nM} \cos \varphi}{i_z P_{nM}} \frac{1}{2\pi 50} = \frac{400 * 0,8}{8 * 16000} \frac{1}{2\pi 50} \quad (15)$$

Vo výpočtoch nás budú zaujímať videné impedancie v jednotlivých uzloch. K tomu budeme potrebovať znalosť impedančnej matice, ktorú získame inverziou admitančnej matice. V ďalšom kroku si teda zostavíme admitančnú maticu. Pre diagonálne prvky bude platiť (16) až (19).

$$\hat{Y}_{(1,1)} = -\left(\frac{1}{j\omega L_s} + \frac{1}{R_{T1} + j\omega L_{T1}}\right) \quad (16)$$

$$\hat{Y}_{(2,2)} = -\left(\frac{1}{R_{T1} + j\omega L_{T1}} + \frac{1}{R_{T2} + j\omega L_{T2}} + \frac{1}{R_{T3} + j\omega L_{T3}}\right) \quad (17)$$

$$\hat{Y}_{(3,3)} = -\left(\frac{1}{R_{T3} + j\omega L_{T3}}\right) \quad (18)$$

$$\hat{Y}_{(2,2)} = -\left(\frac{1}{R_{T3} + j\omega L_{T3}} + \frac{1}{j\omega L_M}\right) \quad (19)$$

Výsledná admitančná matica je teda daná (20).

$$\mathbf{Y} = \begin{pmatrix} -\left(\frac{1}{j\omega L_s} + \frac{1}{R_{T1} + j\omega L_{T1}}\right) & \frac{1}{R_{T1} + j\omega L_{T1}} & 0 & 0 \\ \frac{1}{R_{T1} + j\omega L_{T1}} & -\left(\frac{1}{R_{T1} + j\omega L_{T1}} + \frac{1}{R_{T2} + j\omega L_{T2}} + \frac{1}{R_{T3} + j\omega L_{T3}}\right) & \frac{1}{R_{T2} + j\omega L_{T2}} & \frac{1}{R_{T3} + j\omega L_{T3}} \\ 0 & \frac{1}{R_{T2} + j\omega L_{T2}} & -\left(\frac{1}{R_{T3} + j\omega L_{T3}}\right) & 0 \\ 0 & \frac{1}{R_{T3} + j\omega L_{T3}} & 0 & -\left(\frac{1}{R_{T3} + j\omega L_{T3}} + \frac{1}{j\omega L_M}\right) \end{pmatrix} \quad (20)$$

Impedančnú maticu získame inverziou admitančnej matice podľa (21). Pri výpočtoch si musíme dať pozor na dosadenie frekvencie, ktorú je potrebné dosadiť pred samotnou operáciou invertovania matice.

$$\mathbf{Z} = \mathbf{Y}^{-1} \quad (21)$$

Ďalej si upresníme zdroje vyšších harmonických. Ako bolo spomenuté už vyššie, budeme uvažovať s prúdovými zdrojmi vyšších harmonických ktoré môžeme umiestňovať do ľubovoľných uzlov. V našom príklade pridáme prúdové zdroje vyšších harmonických do uzlu 3. Podľa (22) si zavedieme stĺpcový vektor prúdov uzlov.

$$\mathbf{I}_h = \begin{pmatrix} 0 \\ 0 \\ \hat{I}_{3h} \\ 0 \end{pmatrix} \quad (22)$$

Podľa (23) a (24) potom získame veľkosti napätí vyšších harmonických v jednotlivých uzloch. Jedná sa o fázové hodnoty.

$$\mathbf{U}_{h\text{prep}} = \mathbf{Z}_h \mathbf{I}_h \quad (23)$$

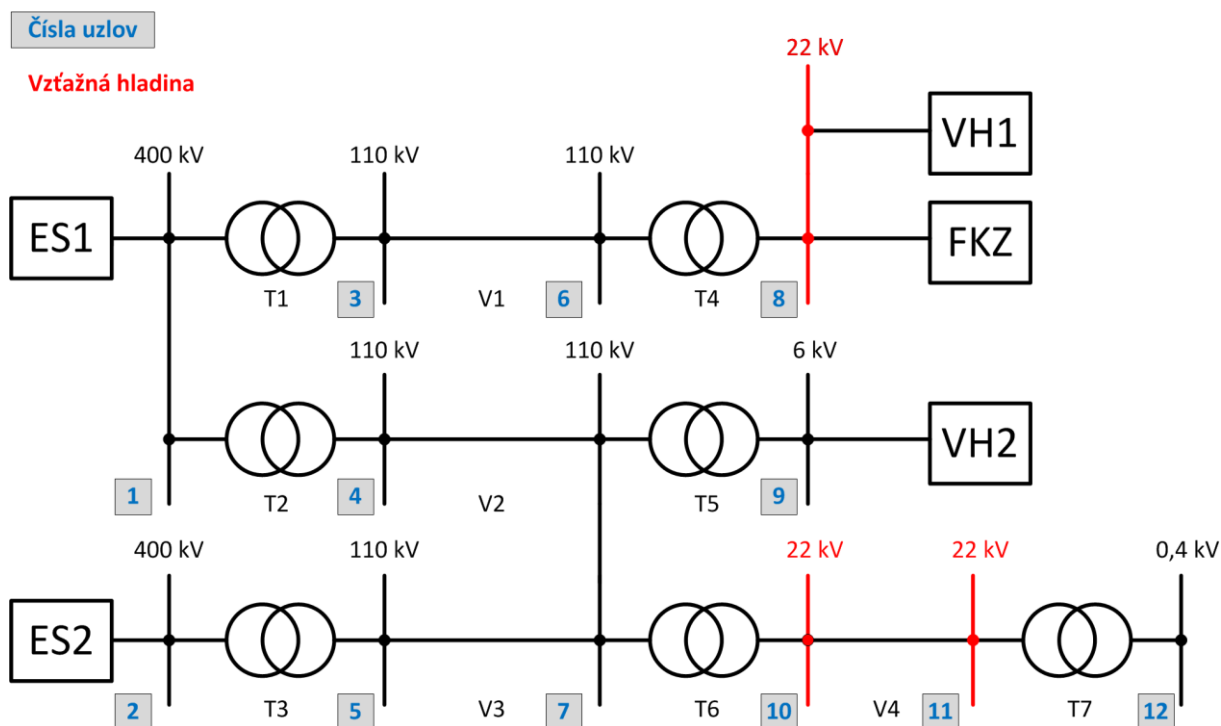
$$\mathbf{U}_h = \text{Abs} \begin{pmatrix} p_1 \hat{U}_{1h} \\ p_2 \hat{U}_{2h} \\ p_3 \hat{U}_{3h} \\ p_4 \hat{U}_{4h} \end{pmatrix} = \text{Abs} \begin{pmatrix} \frac{110}{0,4} \hat{U}_{1h} \\ \frac{22}{0,4} \hat{U}_{2h} \\ 1 \hat{U}_{3h} \\ 1 \hat{U}_{4h} \end{pmatrix} \quad (24)$$

Zoznam programov

1. Charaktery sustavy.nb
2. Harmonicke a zlozkove sustavy.nb
3. Siren timer harmonickych.nb

Na domáce precvičenie

Pre precvičenie vysvetlených znalostí si zostavte admitančnú maticu a šírenie vyšších harmonických v sústave na obrázku 6 s parametrami v tabuľke 3. Zdroje vyšších harmonických uvažujte podobne ako v predošlom príklade. Filtre zatiaľ neuvažujte.



Obr. 6: Schéma sústavy pre precvičenie

Prvok	u_k [%]	U_1 [kV]	U_2 [kV]	S_n [MVA]	P_k [kW]	S_{ks} [MVA]	U_n [kV]	X_v [Ω /km]	l [km]
T1	10	400	110	350	600	-	-	-	-
T2	10	400	110	350	600	-	-	-	-
T3	11	400	110	250	500	-	-	-	-
T4	12	110	22	80	50	-	-	-	-
T5	12,5	110	6	40	35	-	-	-	-
T6	12	110	22	25	30	-	-	-	-
T7	4	22	0,4	0,16	10,35	-	-	-	-
Sústava 1	-	-	-	-	-	20000	400	-	-
Sústava 2	-	-	-	-	-	12000	400	-	-
V1	-	-	-	-	-	-	110	0,38	20
V2	-	-	-	-	-	-	110	0,4	20
V3	-	-	-	-	-	-	110	0,4	50
V4	-	-	-	-	-	-	22	0,7	5

Tab. 3: Parametre prvkov