

# **Vliv změny ovládacího kmitočtu systému hromadného dálkového ovládání na filtračně-kompenzační zařízení trakčních napájecích stanic Českých drah**

*Klíčová slova: jednofázová trakce ČD, filtračně-kompenzační zařízení, signál hromadného dálkového ovládání.*

## **1 - Úvod**

Dodavatel elektrické energie používá v rozvodných sítích pro svoje operativní účely systém hromadného dálkového ovládání (HDO). Tento systém využívá ovládací signál tvořený superposicí tónového kmitočtu a napětí sítě 50 Hz. V oblastech České republiky, kde ČD provozují jednofázovou trakční soustavu 25 kV, 50 Hz, se zatím používá kmitočet ovládacího signálu HDO 216,67 Hz. Aby se zabránilo útlumu tohoto signálu, předepisuje dodavatel elektrické energie v odběrném místě jistou nejmenší hodnotu impedance odběrného zařízení vztaženou ke kmitočtu systému HDO.

V souladu s těmito skutečnostmi ČD zavedly v trakčních napájecích stanicích (TNS) svá filtračně-kompenzační zařízení (FKZ), aby umožnily nejenom kompenzaci jalového výkonu hnacích vozidel, ale i podstatně omezily deformaci napětí sítě 110 kV proudovými harmonickými produkovanými hnacími vozidly. Tato FKZ jsou tvořena dvěma rezonančními L-C větvemi, zajišťujícími jak kompenzační výkon na kmitočtu 50 Hz, tak i omezení složky 3. a 5. harmonické v napětí sítě 110 kV.

---

**Doc. Ing. Karel Hlava, CSc.**, nar. 1930, absolvent ČVUT FEL, obor elektrická trakce  
r. 1953, vědecký pracovník, býv. vedoucí oddělení EMC TÚDC, nyní SŽE Hradec Králové

Předchozí příspěvek [1] měl za úkol:

- vyjasnit vazbu hodnot výkonových prvků dvouvětového FKZ na výslednou hodnotu impedance FKZ pro ovládací signál HDO energetiky 216,67 Hz, to jest hodnot  $C_3$ ,  $L_3$ ,  $C_5$  a  $L_5$ , při dodržení požadovaného kompenzačního výkonu FKZ,
- připravit podklady pro návrh parametrů FKZ nově projektovaných TNS, aby mohla být splněna minimální hodnota impedance TNS pro ovládací signál HDO.

Byla použita obecně platná analýza chování obou větví FKZ, která vyšla z poznatku, že mezi oběma kmitočty sériové rezonance L-C větví FKZ, na kterých má FKZ jako celek nejmenší impedanci, leží jedna frekvence paralelní rezonance, na které FKZ vykazuje teoreticky neomezenou hodnotu impedance. Je tedy možno vhodnou volbou parametrů obou L-C větví nastavit tento kmitočet právě na ovládací kmitočet signálu HDO, pokud tento kmitočet leží mezi rezonančními frekvencemi L-C větví, to jest **mezi 150 Hz a 250 Hz**. V takovém případě by vstupní impedance FKZ dosahovala velmi vysokých hodnot, teoreticky neomezených.

Tento příspěvek rozšiřuje oblast použití výše uvedené studie [1] v tom smyslu, že:

- odvozuje obecné vztahy pro výpočet vstupní reaktance, případně impedance, celé TNS včetně náhradní reaktance trakčního transformátoru 110/27 kV na všech čtyřech vyčleněných ovládacích kmitočtech HDO (**167 Hz, 183,33 Hz, 216,67 Hz a 232 Hz**), jak jsou uvedeny tabulce 1 PNE 38 2530 [3], případně i pro jiné ovládací kmitočty, pokud leží v mezích 150 Hz do 250 Hz, opět s respektováním kapacity  $C_{TV}$  připojeného trakčního vedení (TV) a indukčnosti  $L_D$  dekompenzační větve, včetně odhadu vlivu trakčního odběru,
- dovoluje stanovení kapacit  $C_3$  a  $C_5$  tak, aby současně:
  - ⇒ vstupní reaktance, případně impedance, TNS jako celku včetně kapacity TV vykazovala na straně 110 kV nejméně hodnotu  $X_{HDO,MIN}$  předepsanou dodavatelem elektrické energie pro případně i změněný ovládací kmitočet HDO vybraný z výše uvedených hodnot daných PNE 38 2530,
  - ⇒ TNS jako celek vykazovala na straně 110 kV potřebnou hodnotu kompenzačního výkonu na základním kmitočtu sítě 50 Hz,
  - ⇒ vytvořily spolu s  $L_3$  a  $L_5$  sací obvody sloužící k omezení deformace napětí sítě 110 kV proudovými harmonickými produkovanými hnacími vozidly.

V základní části příspěvku je přijat předpoklad, že TNS není zatížena trakčním odběrem. Za tohoto předpokladu přechází pojem "impedance TNS" na pojem "reaktance TNS". V závěrečné části příspěvku je pak analyzován případ s mezním činným trakčním odběrem a tam je tedy nutno použít pojmu "impedance TNS".

## 2 - Výpočtová část

Na rozdíl od výrazu (14) a dalších z [1], kde se i další vztahy týkaly odvození ideálního nastavení parametrů FKZ s cílem dosažení teoreticky neomezené hodnoty vstupní reaktance FKZ včetně kapacity TV a bylo tedy možno zanedbat vliv náhradní reaktance trakčního transformátoru, je ve zde sledovaném případě zaměřeném na dosažení již konečných (dodavatelem elektrické energie předepsaných jako nejmenších) hodnot vstupní reaktance  $X_{TNS,HDO,MIN}$  nutno s touto náhradní reaktancí počítat. Výraz (14) z [1] dostává zde tvar platící obecně pro reaktanci TNS značenou  $X_{TNS}$  jako celku na libovolné frekvenci  $f$  :

$$X_{TNS}(f) = X_{TT} * \frac{f}{50} - \frac{1}{2\pi * f * \left[ \frac{C_3}{1 - \left(\frac{f}{f_3}\right)^2} + \frac{C_5}{1 - \left(\frac{f}{f_5}\right)^2} + C_{TV} - \frac{1}{(2\pi * f)^2 * L_D} \right]} \quad (1)$$

Veličina  $X_{TT}$  představuje náhradní reaktanci trakčního transformátoru 110/27 kV a je definována výrazem

$$X_{TT} = \frac{u_K U_{TV}^2}{100 S_{TT}} \quad [\Omega, \%, \text{kV}, \text{MVA}] \quad (2)$$

Ve výrazu (1) se předpokládá obecné naladění obou L-C větví FKZ definované kmitočty  $f_3$  a  $f_5$  .

Náhradní indukčnost dekompenzační větve  $L_D$  je definována výrazem

$$L_D = \frac{U_{TV}^2}{100 \cdot \pi \cdot (Q_{K,FKZ} + 100 \cdot \pi \cdot U_{TV}^2 \cdot C_{TV})} \quad [H, kV, Mvar, F] \quad (3)$$

Výraz (1) je tedy výchozím výrazem a bude použit dvěma způsoby:

- Dosadíme-li do (1) za obecný kmitočet  $f = 50 \text{ Hz}$ , dostaneme reaktanci celé TNS včetně kapacity trakčního vedení  $C_{TV}$  pro základní kmitočet sítě  $X_{TNS,50}$ . Pro tento výpočet musíme vyloučit člen s indukčností  $L_D$  dekompenzační větve (vložíme  $L_D \approx \infty$ ). Pomocí reaktance  $X_{TNS,50}$  odvodíme výraz pro kompenzační výkon  $Q_{K,TNS}$  celé TNS bez dekompenzační větve, avšak s respektováním kapacity  $C_{TV}$ , ve tvaru

$$Q_{K,TNS} = \frac{U_{TV}^2}{X_{TNS,50}} \quad [Mvar, kV, \Omega] \quad (4)$$

- Dosadíme-li do (1) za obecný kmitočet  $f = f_{HDO}$  jako ovládací kmitočet systému HDO, dostaneme reaktanci celé TNS včetně kapacity trakčního vedení  $C_{TV}$  a včetně dekompenzační větve pro tento kmitočet, kterou označíme  $X_{TNS,HDO}$ .

Tímto postupem získáme dvě rovnice dovolující vypočítat např. kapacity kondenzátorových skupin  $C_3$  a  $C_5$ , pokud zadáme:

- požadovaný kompenzační výkon  $Q_{K,FKZ}$  realizovaný oběma L-C větvemi FKZ a dekompenzovaný větví s indukčností dekompenzační tlumivky  $L_D$ ,
- požadovanou reaktanci celé TNS  $X_{TNS,HDO,MIN}$  pro libovolný ovládací kmitočet  $f_{HDO}$  HDO ležící v mezích 150 Hz až 250 Hz a
- předpokládanou kapacitu trakčního vedení  $C_{TV}$ .

Vždy ale musí platit, že pro ovládací kmitočet HDO  $f_{HDO}$  je

$$X_{TNS,HDO}(f_{HDO}) \geq X_{TNS,HDO,MIN}(f_{HDO}) \quad (5)$$

Takto dostaneme pro kapacitu kondenzátorové skupiny L-C větve pro 3. harmonickou  $C_3$  výraz

$$C_3 \geq D * \frac{Q_{K,FKZ}}{U_{TV}^2} + E * C_{TV} - \frac{F}{X_{TT} * \frac{f_{HDO}}{50} + \frac{|X_{TNS,HDO,MIN}|}{16}} - \frac{G}{L_D}$$

[F, Mvar, kV,  $\Omega$ , Hz, H] (6)

Podobně dostaneme pro kapacitu kondenzátorové skupiny L-C větve pro 5. harmonickou  $C_5$  výraz

$$C_5 \leq H * \frac{Q_{K,FKZ}}{U_{TV}^2} - J * C_{TV} + \frac{K}{X_{TT} * \frac{f_{HDO}}{50} + \frac{|X_{TNE,HDO,MIN}|}{16}} + \frac{M}{L_D}$$

[F, Mvar, kV,  $\Omega$ , Hz, H] (7)

Ve výrazech (6) a (7) byly pro zjednodušení zavedeny následující pomocné veličiny:

$$F = \frac{\left[ \left( \frac{f_{HDO}}{f_3} \right)^2 - 1 \right] * \left[ 1 - \left( \frac{f_{HDO}}{f_5} \right)^2 \right]}{2\pi * f_{HDO} \left\{ \left[ 1 - \left( \frac{f_{HDO}}{f_5} \right)^2 \right] + \frac{A}{B} * \left[ \left( \frac{f_{HDO}}{f_3} \right)^2 - 1 \right] \right\}}$$

[Hz] (8)

$$D = \frac{f_{HDO}}{50} * \frac{1 - \left( \frac{50}{f_5} \right)^2}{1 - \left( \frac{f_{HDO}}{f_5} \right)^2} * F$$

[Hz] (9)

$$E = 2 * \pi * f_{HDO} * F$$

[Hz] (10)

$$G = \frac{F}{2 * \pi * f_{HDO}}$$

[Hz] (11)

$$\mathbf{H} = \left[ 1 - \left( \frac{50}{f_5} \right)^2 \right] * \left[ \frac{1}{100 * \pi} - \frac{\mathbf{A}}{\mathbf{B}} * \frac{f_{\text{HDO}}}{50} * \frac{\mathbf{F}}{1 - \left( \frac{f_{\text{HDO}}}{f_5} \right)^2} \right] \quad [\text{Hz}] \quad (12)$$

$$\mathbf{J} = \frac{\mathbf{A}}{\mathbf{B}} * \mathbf{E} \quad (13)$$

$$\mathbf{K} = \frac{\mathbf{A}}{\mathbf{B}} * \mathbf{F} \quad (14)$$

$$\mathbf{M} = \frac{\mathbf{A}}{\mathbf{B}} * \mathbf{G} \quad (15)$$

$$\mathbf{A} = \frac{100\pi}{1 - \left( \frac{50}{f_3} \right)^2} \quad (16)$$

$$\mathbf{B} = \frac{100\pi}{1 - \left( \frac{50}{f_5} \right)^2} \quad (17)$$

### 3 - Podklady pro vyčíslení

Vyčíslení je založeno na následujících předpokladech:

- obě větve L-C jsou laděny "ostře", což značí, že  $f_3 = 150 \text{ Hz}$ ,  $f_5 = 250 \text{ Hz}$ ,
- pro náhradní reaktanci trakčního transformátoru byla použita hodnota  $\mathbf{X}_{\text{TT}} = 7,226 \Omega$ , platící pro 50 Hz a vztažená na stranu trakčního napětí  $\mathbf{U}_{\text{TV}}$ ,
- závitový převod trakčního transformátoru je předpokládán hodnotou **4,00**,
- veličina  $\mathbf{Q}_{\text{K,FKZ}}$  se dosazuje zvolenou konstantní hodnotou  $\mathbf{Q}_{\text{K,FKZ}} = 2,5 \text{ Mvar}$ , (s ukázkou pro  $\mathbf{Q}_{\text{K,FKZ}} = 3 \text{ Mvar}$ ),
- veličina  $\mathbf{X}_{\text{TNS,HDO}} (f = f_{\text{HDO}})$  se dosazuje vztažená na stranu 110 kV.

Pak pomocné veličiny ve výrazech (8) až (15) dostanou pro výše uvedené ovládací kmitočty  $f_{\text{HDO}}$  HDO číselné hodnoty podle této tabulky:

Pro výpočet kapacity  $C_3$  platí tyto pomocné hodnoty:

$f_{\text{HDO}}$ [Hz]	D	E	F	G
167	0,00090085	0,16325415	0,00015559	14,82762 e-8
183,33	0,00151575	0,22927624	0,00019904	17,27898 e-8
216,67	0,00233428	0,19012220	0,00013966	10,25859 e-8
232	0,00259027	0,11766946	0,00008072	5,53768 e-8

Pro výpočet kapacity  $C_5$  platí tyto pomocné hodnoty:

$f_{\text{HDO}}$ [Hz]	H	J	K	M
167	0,00208286	0,17631448	0,00016803	16,013833 e-8
183,33	0,00141876	0,24761834	0,00021496	18,661295 e-8
216,67	0,00053475	0,20533197	0,00015083	11,079270 e-8
232	0,00025828	0,12708301	0,00008718	5,980697 e-8

Pomocné veličiny nezávislé na ovládacím kmitočtu  $f_{\text{HDO}}$  HDO ani na kompenzačním výkonu  $Q_{\text{K,FKZ}}$  mají podle výrazů (16) a (17) hodnoty:

$$A = 353,429174$$

$$B = 327,249235$$

#### 4 - Příklady získaných výsledků

##### 4.1 - Výpočet kapacit obou kondenzátorových skupin $C_3$ a $C_5$ pro zadané hodnoty

$|Q_{\text{K,FKZ}}|$  a  $|X_{\text{TNS,HDO,MIN}}|$ , při odpojeném trakčním vedení

Jako výchozí hodnoty zadáme:

- ⇒ požadovanou nejmenší reaktanci TNS na straně 110 kV  $|X_{TNS,HDO,MIN}| = 500 \Omega$
- ⇒ platnou pro ovládací kmitočty HDO  $f_{HDO} = 167 \text{ Hz}, 183,33 \text{ Hz}, 216,67 \text{ Hz}$  a  $232 \text{ Hz}$
- ⇒ při jednotném kompenzačním výkonu FKZ  $|Q_{K,FKZ}| = 2,5 \text{ Mvar}$  (ukázka pro 3 Mvar)
- ⇒ tomu odpovídající náhradní indukčnosti dekompenzační větve  $L_D = 0,96289 \text{ H}$   
(pro ukázku  $|Q_{K,FKZ}| = 3 \text{ Mvar}$  je  $L_D = 0,80241 \text{ H}$ )
- ⇒ při **ostrém naladění** obou L-C větví  $f_3 = 150 \text{ Hz}, f_5 = 250 \text{ Hz}$ ,
- ⇒ při odpojeném trakčním vedení (tedy pro  $C_{TV} = 0$ )

### **Poznámka:**

Dekompenzační tlumivka je ve skutečnosti tvořena fázově řízeným reaktorem. Proud reaktorem procházející je závislý na úhlu otevření fázového regulátoru a jeho hodnota pak simuluje proměnnou indukčnost  $L_D$  dekompenzační větve a tím i proměnnou hodnotu jejího dekompenzačního (induktivního) výkonu. Regulátor fázového řízení průběžně nastavuje takovou hodnotu dekompenzačního výkonu, který je zapotřebí jako doplněk k jalovému (indukčnímu) výkonu hnacích vozidel vykazujících průměrný účinník **0,85**, aby na vstupu TNS byla dosažena neutrální hodnota účinníku. Tento regulátor však musí současně respektovat i jalový výkon (kapacitní) rozvinuté délky napájených úseků trakčního vedení.

Největší jalový výkon používaných dekompenzačních větví je přibližně 3 Mvar. Z tohoto důvodu je základní kompenzační výkon L-C větví FKZ pro prováděný rozbor volen  $|Q_{K,FKZ}| = 2,5 \text{ Mvar}$ , aby:

- ⇒ bylo možno, jak ukážeme v následujícím, vykompenzovat i kapacitu napájených úseků trakčního vedení (do hodnoty  $C_{TV} = 2 \mu\text{F}$ ) bez trakčního odběru,
- ⇒ a aby bylo možno vykompenzovat i případně později doplněnou LC větev pro 7. harmonickou.

Hledáme specifikaci pro  $C$  a  $L$  obou rezonančních větví FKZ, přičemž indukčnosti  $L_3$  a  $L_5$  jsou dány Thomsonovým vzorcem.

Výsledky pro  $|Q_{K,FKZ}| = 2,5 \text{ Mvar}$  lze shrnout do této tabulky:



$f_{HDO}$ [Hz]	$C_3$ [ $\mu$ F]	$L_3$ [mH]	$C_5$ [ $\mu$ F]	$L_5$ [mH]
167	0,01486	75785,79	10,0857	40,1841
183,33	1,38445	813,169	8,6065	47,0904
216,67	5,37783	209,339	4,2937	94,3909
232	7,25924	155,084	2,2618	179,1906

Výsledky pro ukázkou  $|Q_{K,FKZ}| = 3 \text{ Mvar}$  lze shrnout do této tabulky:

$f_{HDO}$ [Hz]	$C_3$ [ $\mu$ F]	$L_3$ [mH]	$C_5$ [ $\mu$ F]	$L_5$ [mH]
167	0,57966	1942,2	11,4961	35,254
183,33	2,35071	478,92	9,5833	42,291
216,67	6,89984	163,16	4,6703	86,780
232	8,96032	125,64	2,4449	165,76

#### **4.2 - Výpočet kompenzačního výkonu FKZ $Q_{K,FKZ}$ při zadaných kapacitách $C_3$ a $C_5$**

Použijeme výrazy (1), (4), (16) a (17) a dostaneme pro  $Q_{K,FKZ}$  výraz

$$Q_{K,FKZ} = U_{TV}^2 * (A * C_3 + B * C_5) \quad [\text{Mvar, kV, F}] \quad (18)$$

Tato hodnota platí pro samotné FKZ a je rovna jalovému výkonu dekompenzační větve, realizovanému tlumivkou  $L_D$ . Tento výraz může též posloužit pro výpočet kapacity  $C_5$ , známe-li hodnotu kapacity  $C_3$  a požadovaný součtový kompenzační výkon  $Q_{K,FKZ}$  obou větví FKZ.

#### **4.3 - Výpočet prvků FKZ pro vyčleněné hodnoty ovládacího kmitočtu HDO při zadaných hodnotách $Q_{K,FKZ}$ a $X_{TNS,HDO}$ a při připojení trakčním vedení s kapacitou $C_{TV}$ , bez trakčního odběru**

Použijeme přímo výraz (6) a (7), kam dosadíme výchozí hodnoty včetně indukčnosti dekompenzační větve  $L_D$ .

Protože se však jedná o reaktanci TNS jako celku, tedy včetně kapacity TV, je nutné do výrazu (6) a (7) dosazovat upravené hodnoty indukčnosti dekompenzační větve  $L_D$ . Tato hodnota  $L_D$  musí totiž zajistit dekompenzování nejenom kompenzačního výkonu obou L-C větví FKZ, ale i připojené kapacity rozvinuté délky TV.

Kapacitní výkon rozvinuté délky TV (pro měrnou kapacitu TV **20 nF/km**) a příslušná indukčnost dekompenzační větve  $L_D$  dekompenzující současně i obě větve FKZ s kompenzačním výkonem **2,5 Mvar** dostává pak hodnoty podle následující tabulky:

	$C_{TV} = 0$	$C_{TV} = 1 \mu F$	$C_{TV} = 2 \mu F$
$l_{TV}$ [km]	0	50	100
$Q_{K,TV}$ [Mvar]	0	0,2376	0,4752
$L_D$ [H]	0,96289	0,8793	0,8091

Pro kapacitu rozvinuté délky TV v hodnotě  $C_{TV} = 1 \mu F$  dostaneme tyto parametry obou L-C větví FKZ:

$f_{HDO}$ [Hz]	$C_3$ [ $\mu F$ ]	$L_3$ [mH]	$C_5$ [ $\mu F$ ]	$L_5$ [mH]
<b>167</b>	0,16347	6886,676	9,9252	40,8340
<b>183,33</b>	1,5967	705,0865	8,3773	48,3787
<b>216,67</b>	5,5578	202,5598	4,0993	98,8671
<b>232</b>	7,3715	152,7232	2,1406	189,3348

Pro kapacitu rozvinuté délky TV v hodnotě  $C_{TV} = 2 \mu F$  dostaneme tyto parametry obou L-C větví FKZ:

$f_{HDO}$ [Hz]	$C_3$ [ $\mu F$ ]	$L_3$ [mH]	$C_5$ [ $\mu F$ ]	$L_5$ [mH]
<b>167</b>	0,3121	3607,209	9,7647	41,5052
<b>183,33</b>	1,8089	622,3641	8,1481	49,7396
<b>216,67</b>	5,7378	196,2054	3,9049	103,7890

232	7,4837	150,4334	2,0194	200,6965
-----	--------	----------	--------	----------

**4.4 - Výpočet reaktance  $X_{TNS,HDO}$  na jiném z ovládacích kmitočtů HDO při hodnotách  $C_3$ ,  $C_5$ ,  $Q_{K,FKZ}$  odvozených pro kmitočet  $f_{HDO} = 216,67$  Hz a při připojeném trakčním vedení s kapacitou  $C_{TV}$ , bez trakčního odběru**

Vydeme z reálné situace, že existuje FKZ navržené pro dnes používaný kmitočet HDO s hodnotou  $f_{HDO} = 216,67$  Hz s parametry odvozenými v příkladu 4.1 a 4.3 a vyšetříme změnu hodnoty  $X_{TNS,HDO}$  způsobenou použitím jiného z vyčleněných kmitočtů HDO. Pro výpočet použijeme výraz (1), který dává hodnoty vztažené na stranu trakčního napětí  $U_{TV}$ . Přepočet na stranu 110 kV získáme vynásobením čtvercem závitového převodu (zde číslem "16").

Pro kapacitu rozvinuté délky trakčního vedení volenou v hodnotách  $C_{TV} = 0$ ,  $C_{TV} = 1 \mu F$  a  $C_{TV} = 2 \mu F$  (rozvinutá délka TV cca 50 km, případně 100 km) dostaneme za těchto předpokladů pro jednotlivé kmitočty HDO hodnoty reaktance TNS uvedené v této tabulce:

Pro výpočtový stav s odpojeným trakčním vedením ( $C_{TV} = 0$ ) platí tyto hodnoty:

	Při $C_{TV} = 0$		Při $C_{TV} = 1 \mu F$		Při $C_{TV} = 2 \mu F$	
$f_{HDO}$ [Hz]	$X_{TNS,HDO}$ [ $\Omega$ ]	char.	$X_{TNS,HDO}$ [ $\Omega$ ]	char.	$X_{TNS,HDO}$ [ $\Omega$ ]	char.
167	1360,9	ind.	1421,2	ind.	1489,3	ind.
183,33	6250,9	ind.	9949,8	ind.	26508,6	ind.
216,67	500,0	kap.	425,3	kap.	361,0	kap.
232	123,5	ind.	137,8	ind.	151,1	ind.

Pro výpočtový stav s kapacitou trakčního vedení  $C_{TV} = 1 \mu F$  platí tyto hodnoty:

	Při $C_{TV} = 0$	Při $C_{TV} = 1 \mu F$	Při $C_{TV} = 2 \mu F$
--	------------------	------------------------	------------------------

$f_{HDO}$ [Hz]	$X_{TNS,HDO}$ [ $\Omega$ ]	char.	$X_{TNS,HDO}$ [ $\Omega$ ]	char.	$X_{TNS,HDO}$ [ $\Omega$ ]	char.
167	1291,9	ind.	1349,1	ind.	1414,0	ind.
183,33	4706,8	ind.	6616,0	ind.	11597,0	ind.
216,67	593,2	kap.	500,0	kap.	421,4	kap.
232	97,46	ind.	114,3	ind.	130,0	ind.

Pro výpočtový stav s kapacitou trakčního vedení  $C_{TV} = 2 \mu F$  platí tyto hodnoty:

	Při $C_{TV} = 0$		Při $C_{TV} = 1 \mu F$		Při $C_{TV} = 2 \mu F$	
$f_{HDO}$ [Hz]	$X_{TNS,HDO}$ [ $\Omega$ ]	char.	$X_{TNS,HDO}$ [ $\Omega$ ]	char.	$X_{TNS,HDO}$ [ $\Omega$ ]	char.
167	1232,0	ind.	1281,7	ind.	1337,5	ind.
183,33	3809,6	ind.	4900,8	ind.	7030,0	ind.
216,67	705,5	kap.	593,2	kap.	500,0	kap.
232	67,93	ind.	87,11	ind.	104,8	ind.

Z těchto tabulek je patrné, že:

- snížení ovládacího kmitočtu  $f_{HDO}$  pod hodnotu 216,67 Hz (např. na 167 Hz či 183,33 Hz) je z hlediska reaktance TNS na ovládacím kmitočtu  $f_{HDO}$  s FKZ navrženým pro kmitočty 216,67 Hz vyhovující a nepodkročí požadovanou hodnotu  $X_{TNS,HDO,MIN}$  (nehrozí snížení úrovně signálu HDO,
- naopak použitím vyššího ovládacího kmitočtu HDO (232 Hz) vede při FKZ navrženém pro kmitočty 216,67 Hz k pravděpodobně nepřijatelnému poklesu reaktance TNS, a tím i k možnému útlumu signálu HDO,
- se změnou ovládacího kmitočtu dochází též ke změně charakteru reaktance TNS na ovládacím kmitočtu HDO, což by však nemělo být na závadu, protože požadavek dodavatele elektrické energie uvádí pouze absolutní hodnotu této reaktance.

Graficky je popsaná situace znázorněna na dvou grafech, a to:

- na **grafu č. 1** je vykreslena frekvenční závislost reaktance  $|X_{TNS,HDO}|$  v pásmu 150 Hz až 250 Hz pro výpočtovou kapacitu  $C_{TV} = 1\mu F$  rozvinuté délky cca 50 km napájených úseků trakčního vedení s vyznačením kmitočtů  $f_{HDO} = 216,67 \text{ Hz}$  a  $232 \text{ Hz}$ ,
- na **grafu č. 2** je znázorněn průběh téže veličiny, avšak pro výpočtovou kapacitu TV v hodnotě  $C_{TV} = 2 \mu F$  představující cca 100 km rozvinuté délky TV.

#### **4.4 - Výpočet mezních hodnot kapacit $C_3$ a $C_5$ v závislosti na požadované reaktanci**

##### **$X_{TNS,HDO,MIN}$ pro vyčleněné ovládací kmitočty HDO**

Dodavatel elektrické energie požaduje, aby vstupní reaktance TNS jako celku  $X_{TNS,HDO}$  vykazovala na vyčleněných kmitočtech HDO jistou minimální hodnotu  $X_{TNS,HDO,MIN}$ . Tento požadavek lze splnit vhodnou volbou prvků obou L-C větví FKZ ( $C_3$  a  $C_5$ ), která však současně musí zajistit nezbytnou hodnotu kompenzačního výkonu  $Q_{K,FKZ}$ . Tuto úlohu řešila diplomní práce [5] simulační metodou využitím programu PSpice.

Pro odvození potřebných výpočtových výrazů využijeme výchozí výraz (5), který modifikoval oba definiční výrazy (6) a (7) pro výpočet kapacit  $C_3$  a  $C_5$ . Mezní hodnoty kapacit  $C_3$  a  $C_5$  byly pro  $Q_{K,FKZ} = 2,5 \text{ Mvar}$  (a v ukázce též pro 3 Mvar) vypočteny a soustředěny v **tabulkách příkladu 4.1 a 4.3**.

Použijeme-li ve výrazech (6) a (7) znaménko nerovnosti, lze pro zvolené hodnoty kapacit trakčního vedení  $C_{TV} = 0$ ,  $C_{TV} = 1 \mu F$  a  $C_{TV} = 2 \mu F$  například pro ovládací kmitočty  $f_{HDO} = 216,67 \text{ Hz}$  a  $X_{TNS,HDO,MIN} = 500 \Omega$  sestavit následující tabulku přípustných hodnot  $C_3$  a  $C_5$ :

	$C_{TV} = 0$	$C_{TV} = 1 \mu F$	$C_{TV} = 2 \mu F$
$C_3$	větší než 5,3778 $\mu F$	větší než 5,5578 $\mu F$	větší než 5,7378 $\mu F$
$C_5$	menší než 4,2937 $\mu F$	menší než 4,0993 $\mu F$	menší než 3,9049 $\mu F$

Z této tabulky vyplývá, že pro daný rozsah kapacity trakčního vedení, představující při měrné kapacitě **0,20 nF/km** rozsah délek napájených úseků **do 50 km, případně 100 km rozvinuté délky**, a pro ovládací kmitočet **HDO 216,67 Hz**, jsou použitelné hodnoty kapacit:

$$\begin{array}{ll} \text{pro rozvinutou délku TV 50 km:} & C_3 \geq 5,56 \mu\text{F} \quad C_5 \leq 4,10 \mu\text{F} , \\ \text{pro rozvinutou délku TV 100 km:} & C_3 \geq 5,74 \mu\text{F} \quad C_5 \leq 3,90 \mu\text{F} . \end{array}$$

Podobně lze postupovat i pro ostatní vyčleněné kmitočty HDO:

⇒ pro  $f_{\text{HDO}} = 167 \text{ Hz}$  musí platit:

$$\begin{array}{ll} \text{pro rozvinutou délku TV 50 km:} & C_3 \geq 0,163 \mu\text{F} \quad C_5 \leq 9,93 \mu\text{F} , \\ \text{pro rozvinutou délku TV 100 km:} & C_3 \geq 0,312 \mu\text{F} \quad C_5 \leq 9,76 \mu\text{F} . \end{array}$$

⇒ pro  $f_{\text{HDO}} = 183,33 \text{ Hz}$  musí platit:

$$\begin{array}{ll} \text{pro rozvinutou délku TV 50 km:} & C_3 \geq 1,60 \mu\text{F} \quad C_5 \leq 8,38 \mu\text{F} , \\ \text{pro rozvinutou délku TV 100 km:} & C_3 \geq 1,81 \mu\text{F} \quad C_5 \leq 8,15 \mu\text{F} . \end{array}$$

⇒ pro  $f_{\text{HDO}} = 232 \text{ Hz}$  musí platit:

$$\begin{array}{ll} \text{pro rozvinutou délku TV 50 km:} & C_3 \geq 7,37 \mu\text{F} \quad C_5 \leq 2,14 \mu\text{F} , \\ \text{pro rozvinutou délku TV 100 km:} & C_3 \geq 7,48 \mu\text{F} \quad C_5 \leq 2,02 \mu\text{F} . \end{array}$$

Z tohoto rozboru vyplývá, že pro volbu mezních hodnot obou kapacit  $C_3$  i  $C_5$  je směrodatná **největší provozně možná rozvinutá délka (kapacita) napájených úseků trakčního vedení**.

## ***5 - Analýza vlivu činného zatížení v napájeném úseku***

Hnací vozidla jednofázové soustavy lze pro prováděné výpočty nahradit paralelní kombinací  $L_{\text{LOK}}$  a  $R_{\text{LOK}}$ . Veličina  $L_{\text{LOK}}$  způsobuje odběr jalového výkonu.

Činný odběr hnacích vozidel lze nahradit veličinou  $R_{\text{LOK}}$ . Nejmenší číselnou hodnotu  $R_{\text{LOK}}$  můžeme s jistou přibližností odvodit ze jmenovitého výkonu trakčního transformátoru TNS a dostaneme

$$R_{\text{LOK}} \cong \frac{U_{\text{TV}}^2}{S_{\text{TT}}} = \frac{27,5^2}{10} = 75,625 \Omega \quad [\Omega, \text{kV}, \text{MVA}] \quad (19)$$

Tuto hodnotu jako pravděpodobně nejmenší možnou použijeme v rozboru jejího vlivu na impedanci TNS vůči signálu HDO. Ve skutečnosti však odpovídá uvažovanému kompenzačnímu výkonu FKZ 2,5 Mvar při účinníku hnacího vozidla 0,85 činný výkon pouze 4,03 MW, čemuž odpovídá  $R_{\text{LOK}} = 187,5 \Omega$ . Použití hodnoty podle výrazu (19) považujeme za správnější, protože respektuje i činný odběr hnacích vozidel moderní koncepce (s účinníkem blízkým 1).

Při hodnocení vlivu činného odběru použijeme přímo simulační program PSpice s parametry uvedenými pro kmitočet  $f_{\text{HDO}} = 216,67 \text{ Hz}$  v příkladu 4.3:

- pro  $C_3 = 5,7378 \mu\text{F}$  a  $C_5 = 3,9049 \mu\text{F}$ , platící pro výpočtovou kapacitu  $C_{\text{TV}} = 2 \mu\text{F}$  (pro rozvinutou délku TV cca 100 km),
- pro  $C_3 = 5,5578 \mu\text{F}$  a  $C_5 = 4,0993 \mu\text{F}$ , platící pro výpočtovou kapacitu  $C_{\text{TV}} = 1 \mu\text{F}$  (pro rozvinutou délku TV cca 50 km).

Pro čtyři vyčleněné hodnoty ovládacího kmitočtu  $f_{\text{HDO}}$  dostaneme následující hodnoty impedance TNS jako celku  $|Z_{\text{TNS,HDO}}|$  včetně odběru hnacích vozidel představovaného hodnotou podle výrazu (19) v porovnání s hodnotami bez trakčního odběru:

	bez trakce	s trakcí	bez trakce	s trakcí
$f_{\text{HDO}}$ [Hz]	$C_{\text{TV}} = 1 \mu\text{F}$	$C_{\text{TV}} = 1 \mu\text{F}$	$C_{\text{TV}} = 2 \mu\text{F}$	$C_{\text{TV}} = 2 \mu\text{F}$
167	1349,1	1082,6	1337,5	1078,2
183,33	6616,0	1335,3	7030,0	1333,4
216,67	500,0	500,4	500,0	500,4
232	114,3	207,1	104,8	205,5

Z uvedené tabulky vyplývá, že činný trakční odběr prakticky nezmění impedanci TNS na ovládacím kmitočtu  $f_{\text{HDO}} = 216,67 \text{ Hz}$  (500,0 vůči 500,4  $\Omega$ ) v případě, podle kterého jsou nastaveny kapacity obou kondenzátorů L-C větví (byly použity kapacity určené pro výpočtovou hodnotu  $C_{\text{TV}} = 1 \mu\text{F}$  a  $2 \mu\text{F}$ ).

Pro oba kmitočty HDO nižší než 216,67 Hz zjištěná změna impedance TNS neovlivní šíření signálu HDO v síti 110 kV.

Pro kmitočet HDO 232 Hz (vyšší než 216,67 Hz) jsou hodnoty impedance TNS v případě trakčního odběru poněkud příznivější, nedosahují však hodnoty požadované dodavatelem elektrické energie.

Graficky je popsána situace znázorněna na dvou grafech, a to:

- na **grafu č. 3** je vykreslena frekvenční závislost reaktance  $|X_{\text{TNS,HDO}}|$  v pásmu 150 Hz až 250 Hz pro výpočtovou kapacitu  $C_{\text{TV}} = 1\mu\text{F}$  rozvinuté délky cca 50 km napájených úseků trakčního vedení při respektování trakčního odběru, s vyznačením ovládacích kmitočtů  $f_{\text{HDO}} = 216,67 \text{ Hz}$  a  $232 \text{ Hz}$ ,
- na **grafu č. 4** je znázorněn průběh téže veličiny, avšak pro výpočtovou kapacitu TV v hodnotě  $C_{\text{TV}} = 2 \mu\text{F}$  představující cca 100 km rozvinuté délky TV.

## 6 - Závěr

Příspěvek popisuje důsledky případné změny ovládacího kmitočtu systému HDO dodavatele elektrické energie, jejíž možnost naznačuje. Z principiálního důvodu analyzuje situaci pro vyčleněné ovládací kmitočty HDO ležící podle PNE 38 2530 [3] v mezích **od 150 Hz do 250 Hz**, protože pro tyto kmitočty lze použít výše citovanou zásadu o možnosti nastavení polohy kmitočtu paralelní rezonance obou L-C větví FKZ do blízkosti ovládacího kmitočtu HDO.



Z předložených výpočtů i číselných příkladů je patrné, že kritická situace z hlediska možného nepříjemného útlumu signálu HDO v síti 110 kV by nastala v případě, že by dnes používaný ovládací kmitočet HDO  $f_{\text{HDO}} = 216,67$  Hz byl zvýšen na další podle [3] vyčleněnou hodnotu 232 Hz. Pak by stávající FKZ, které bylo navrženo pro ovládací kmitočet HDO 216,67 Hz, bylo nutno rekonstruovat, aby byla zajištěna minimální hodnota vstupní impedance TNS jako celku požadovaná dodavatelem elektrické energie.

Přechod na nižší ovládací kmitočet HDO (např. na 167 Hz či 183,33 Hz) nezpůsobí z uvedeného hlediska při dnes provozovaných FKZ potíže.

Pokud by systém HDO použil ovládací kmitočty ležící **mimo interval (150 - 250) Hz** vyčleněné ve smyslu tabulky 1 PNE 38 2530 [3], **nelze uvedený princip použít** a bylo by zapotřebí hledat jinou cestu včetně případného použití hradicích členů.

## 7 - Seznam značek

$C_3$	kapacita kondenzátorové skupiny L-C větve FKZ pro 3. harmonickou [F]
$L_3$	indukčnost reaktoru L-C větve FKZ pro 3. harmonickou [H]
$C_5$	kapacita kondenzátorové skupiny L-C větve FKZ pro 5. harmonickou [F]
$L_5$	indukčnost reaktoru L-C větve FKZ pro 5. harmonickou [H]
$C_{\text{TV}}$	kapacita napájených úseků trakčního vedení [F]
$L_{\text{D}}$	náhradní indukčnost dekompenzační větve FKZ [H]
$f_3$	frekvence, na kterou je naladěna L-C větev FKZ 3. harmonické [Hz]
$f_5$	frekvence, na kterou je naladěna L-C větev FKZ 5. harmonické [Hz]
$f_{\text{HDO}}$	ovládací kmitočet systému hromadného dálkového ovládání (HDO) dodavatele elektrické energie [Hz]
$X_{\text{HDO,MIN}}$	reaktance TNS jako celku (včetně $C_{\text{TV}}$ a $L_{\text{D}}$ ) pro $f_{\text{HDO}}$ předepsaná dodavatelem elektrické energie [ $\Omega$ ]
$X_{\text{TT}}$	náhradní reaktance trakčního transformátoru 110/27 kV pro 50 Hz [ $\Omega$ ]
$u_{\text{K}}$	procentní napětí nakrátko trakčního transformátoru 110/27 kV [%]
$U_{\text{TV}}$	napětí trakčního vedení [kV]

<b>S<sub>TT</sub></b>	jmenovitý výkon trakčního transformátoru 110/27 kV [MVA]
<b>X<sub>TNS,50</sub></b>	reaktance TNS včetně C <sub>TV</sub> pro 50 Hz [ $\Omega$ ]
<b>Q<sub>K,TNS</sub></b>	kompensační výkon celé TNS včetně C <sub>TV</sub> ale bez L <sub>D</sub> [Mvar]
<b>Q<sub>K,FKZ</sub></b>	požadovaný kompenzační výkon realizovaný oběma L-C větvemi FKZ [Mvar]
<b>X<sub>TNS,HDO</sub></b>	reaktance celé TNS včetně C <sub>TV</sub> a včetně L <sub>D</sub> pro f <sub>HDO</sub> [ $\Omega$ ]
<b>X<sub>TNS,HDO,MIN</sub></b>	požadovaná reaktance celé TNS včetně C <sub>TV</sub> a L <sub>D</sub> pro f <sub>HDO</sub> [ $\Omega$ ]
<b>R<sub>LOK</sub></b>	náhradní odpor představující činný odběr hnacích vozidel [ $\Omega$ ]
<b>L<sub>LOK</sub></b>	náhradní indukčnost představující jalový odběr hnacích vozidel [H]
<b>TNS</b>	trakční napájecí stanice jednofázové soustavy 25 kV, 50 Hz
<b>FKZ</b>	filtračně-kompensační zařízení použité v TNS
<b>TV</b>	trakční vedení (trolejové vedení a zpětné vedení kolejnicemi a zemí)

## 8 - Literatura

- [1] Hlava, K.: Diagnostika vlivu napájecí soustavy jednofázové trakce ČD na signál hromadného dálkového ovládání. Vědeckotechnický sborník Českých drah, č. 10/2000, str. 49 – 59.
- [2] Hlava, K.: Diagnostika vlivu napájecí soustavy jednofázové trakce ČD na signál hromadného dálkového ovládání (zkrácené znění). Nová železniční technika, č. 1/2000, str. 16 – 19.
- [3] PNE 38 2530 Hromadné dálkové ovládání. Automatiky, vysílače a přijímače. Účinnost od 1.1.1994.
- [4] Hlava, K.: Omezení vlivu FKZ na signál HDO energetiky, 1. a 2. část. Zpráva k úkolu TR č. D2374026, TÚDC odd. EMC, červenec 1996.

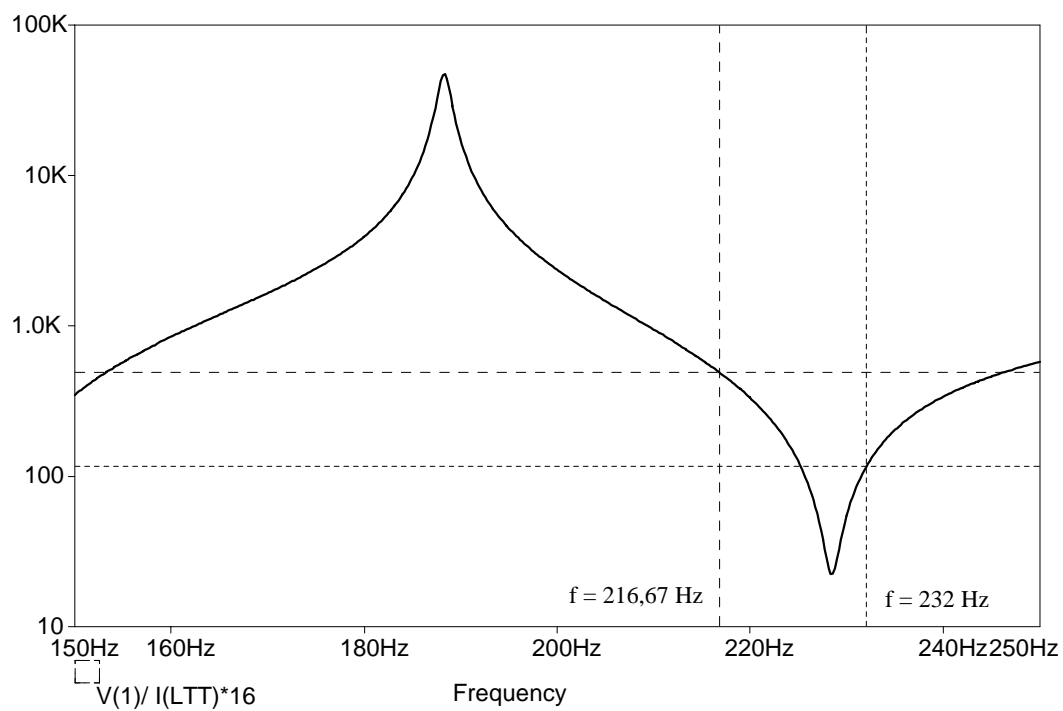
- [5] Satori, M.: Impedance trakční napájecí stanice jednofázové soustavy ČD pro kmitočty hromadného dálkového ovládání. Diplomová práce Univerzity Pardubice, Dopravní fakulty Jana Pernera, KEEZ, školní rok 2000 - 2001, vedoucí Ing. K. Hlava, CSc.
- [6] PNE 33 3430-6 "Parametry kvality elektrické energie, část 6: Omezení zpětných vlivů na hromadné dálkové ovládání". Účinnost od 1.1.1998.

V Praze, září 2001

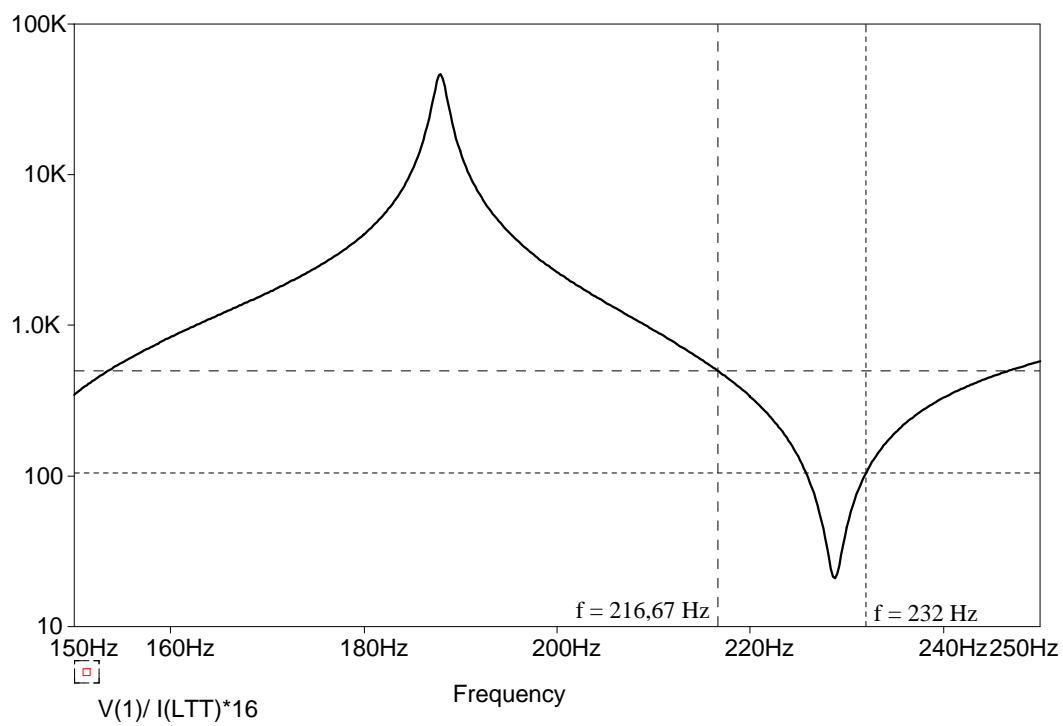
Lektoroval: Ing. Jiří Krupica  
ČD TÚDC Praha

*Klíčová slova: jednofázová trakce ČD, filtračně-kompenzační zařízení, signál hromadného dálkového ovládání.*

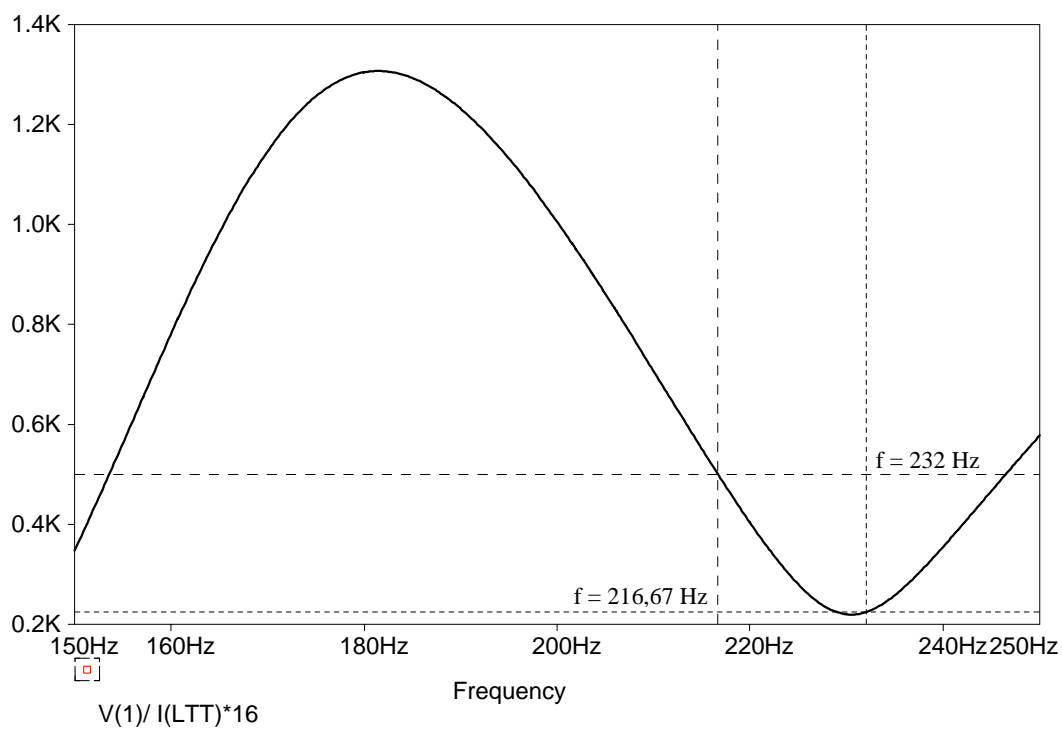
**Kmitočtová závislost reaktance TNS pro výpočtovou kapacitu  $C_{TV} = 1 \mu F$   
a základní ovládací kmitočet  $f_{HDO} = 216,67 \text{ Hz}$**



**Kmitočtová závislost reaktance TNS pro výpočtovou kapacitu  $C_{TV} = 2 \mu\text{F}$   
a základní ovládací kmitočet  $f_{HDO} = 216,67 \text{ Hz}$**



**Kmitočtová závislost impedance TNS pro výpočtovou hodnotu  $C_{TV} = 1 \mu\text{F}$   
a základní ovládací kmitočet  $f_{HDO} = 216,67 \text{ Hz}$  při trakčním odběru 10 MW**



**Kmitočtová závislost impedance TNS pro výpočtovou hodnotu  $C_{TV} = 2 \mu\text{F}$   
a základní ovládací kmitočet  $f_{HDO} = 216,67 \text{ Hz}$  při trakčním odběru 10 MW**

