

České vysoké učení technické v Praze
Fakulta elektrotechnická
Katedra elektroenergetiky



Vyšší harmonické a mezipharmonické

A0M15EZS – Elektrické zdroje a soustavy

2. přednáška ZS 2011/2012

Ing. Tomáš Sýkora, Ph.D.



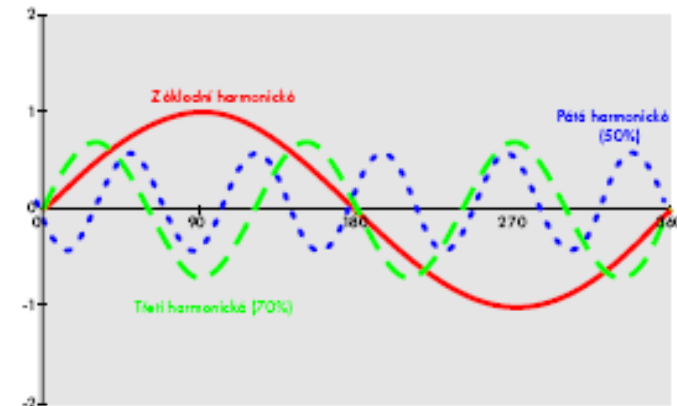
Definice a zdroje vyšších harmonických

Definice

- vyšší harmonické = celistvé násobky základního síťového kmitočtu
- jsou jedním z ukazatelů **kvality elektrické energie** (související normy: ČSN 33 0050-604 a ČSN EN 50160)

Zdroje vyšších harmonických

- zařízení s prvky výkonové elektroniky
 - usměrňovače
 - pohony s frekvenčními měniči
 - pulzní zdroje
- zařízení s nelineární VA charakteristikou
 - středofrekvenční obloukové pece
 - indukční stroje (transformátory, motory, ...)
 - plynové výbojky
 - zářivky





Fourierova transformace – analytické vyjádření

- harmonické průběhy lze vyjádřit periodickou veličinu **nekonečnou řadou** složenou z konstanty a harmonických veličin o kmitočtu rovných přirozeným násobkům základního kmitočtu
- použitelná pouze, známe-li analytické vyjádření měřeného průběhu (popř. analytickou aproximaci)
- rozklad se nazývá **harmonická analýza**
- periodická funkce $f(t + T) = f(t)$ musí splňovat **Dirichletovy podmínky**:
 - musí být v intervalu $\langle 0; T \rangle$ jednoznačná
 - konečná
 - po částech spojitá
 - musí mít konečný počet maxim a minim
- Fourierova řada periodické funkce $f(t)$ s úhlovým kmitočtem:

$$f(t) = \frac{A_0}{2} + \sum_{n=1}^{\infty} A_n \cos(n\omega t) + \sum_{n=1}^{\infty} B_n \sin(n\omega t)$$

$$A_0 = \frac{2}{T} \int_0^T f(t) dt$$

$$A_n = \frac{2}{T} \int_0^T f(t) \cdot \cos(n\omega t) dt \quad \text{pro } n = 0, 1, 2, 3, \dots$$

$$B_n = \frac{2}{T} \int_0^T f(t) \cdot \sin(n\omega t) dt \quad \text{pro } n = 1, 2, 3, \dots$$



Fourierova transformace – analytické vyjádření

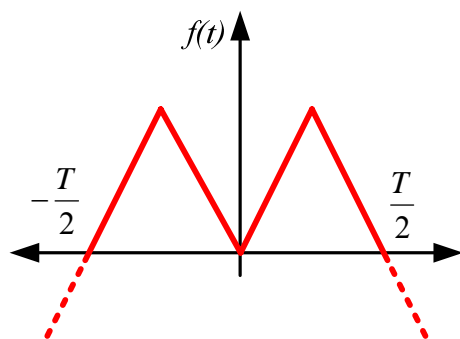
- spektrální tvar Fourierovy řady:

$$f(t) = \frac{A_0}{2} + \sum_{n=1}^{\infty} C_n \sin(n\omega t + \varphi_n)$$

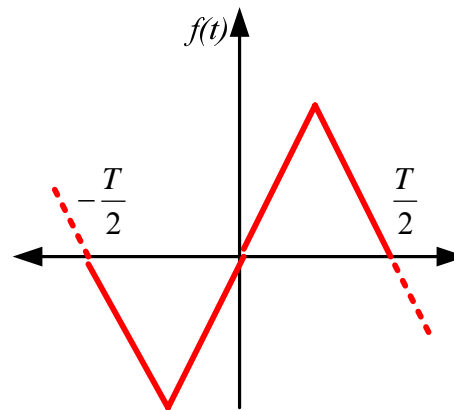
$$C_n = \sqrt{A_n^2 + B_n^2}$$

$$\varphi_n = \operatorname{arctg} \frac{B_n}{A_n}$$

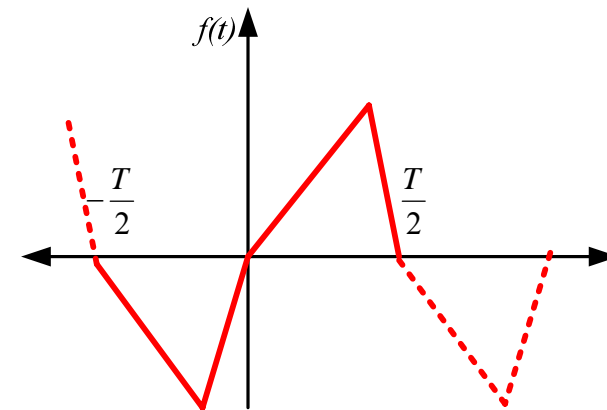
- C_n amplitudové spektrum
- φ_n fázové spektrum
- v praxi mnohé funkce splňují vlastnosti:
 - pro sudou funkci platí $f(-t) = f(t)$ (řada obsahuje pouze cosinové členy)
 - pro lichou funkci $f(-t) = -f(t)$ (řada obsahuje pouze sinové členy)
 - další funkce mohou být aperiodické $f(t) = -f(t \pm T/2)$



sudá funkce



lichá funkce



aperiodická funkce

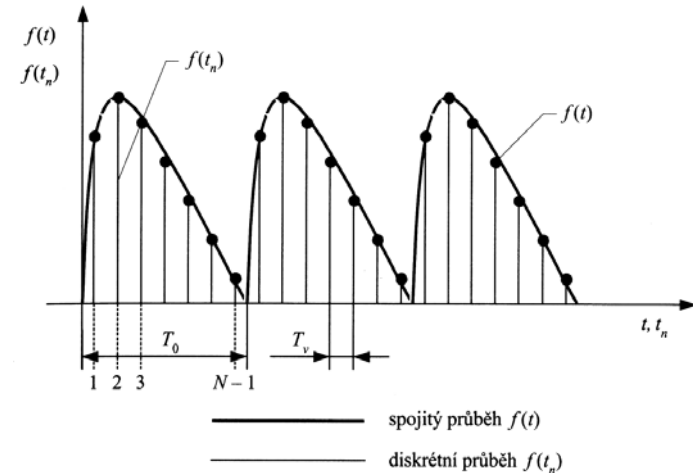


Fourierova transformace – numerické vyjádření

- Diskrétní Fourierova transformace (DFT)
 - transformace posloupnosti diskretních hodnot

$$X_k = DFT\{(f_k)\} = \frac{1}{N} \sum_{n=0}^{N-1} f(t_n) \cdot e^{-jn \frac{2\pi}{N} k}$$

- Tdoba mezi dvěma vzorky
- Npočet vzorků za periodu
- X_knaměřená hodnota v čase kT



- při výpočtu DFT je počet úměrný $N^2 \rightarrow$ při velkém počtu $N \rightarrow$ dlouhá doba výpočtu \rightarrow použití FFT (rychlá Fourierova transformace), využití podobnosti snímaných prvků

- pro FFT potom potřebujeme $\frac{N}{2} \cdot \log_2 N$ násobení

Příklad: pro $N = 2^{11} = 2048$ bodů se při použití FFT zkrátí výpočet cca 372 krát



Obecný periodický výkon

- periodický průběh ve FT vyjádříme jako

$$u(t) = U_0 + \sum_{k=1}^n U_{km} \sin(k\omega t + \varphi_k) \quad i(t) = I_0 + \sum_{k=1}^n I_{km} \sin(k\omega t + \varphi_k)$$

- efektivní hodnota

definice:

$$U = \sqrt{\frac{1}{T} \int_0^T u^2(t) dt} \quad U = \sqrt{\frac{1}{T} \int_0^T \left[U_0 + \sum_{k=1}^n U_{km} \sin(k\omega t + \varphi_k) \right]^2 dt} = \sqrt{\sum_{k=0}^n U_k^2}$$

hodnocení míry rušení

- obsah základní harmonické

$$g = \frac{I_1}{I} = \frac{I_1}{\sqrt{\sum_{k=1}^{\infty} I_k^2}}$$

- obsah vyšších harmonických

$$k = \frac{\sqrt{\sum_{n=2}^{\infty} I_n^2}}{I} = \frac{\sqrt{\sum_{n=2}^{\infty} I_n^2}}{\sqrt{\sum_{n=1}^{\infty} I_n^2}}$$

- celkové harmonické zkreslení
(total harmonic distortion – THD)

$$THD = \frac{\sqrt{\sum_{n=2}^{\infty} I_n^2}}{I_1}$$



Vztahy pro výkon

▪ Činný výkon:
$$P = U_0 I_0 + \sum_{k=1}^{\infty} U_k I_k \cos \varphi_k$$

▪ Jalový výkon:
$$Q = \sum_{k=1}^{\infty} U_k I_k \sin \varphi_k$$

▪ Zdánlivý výkon:
$$S = U \cdot I = \sqrt{\left(U_0^2 + \sum_{k=1}^{\infty} U_k^2 \right) \left(I_0^2 + \sum_{k=1}^{\infty} I_k^2 \right)}$$

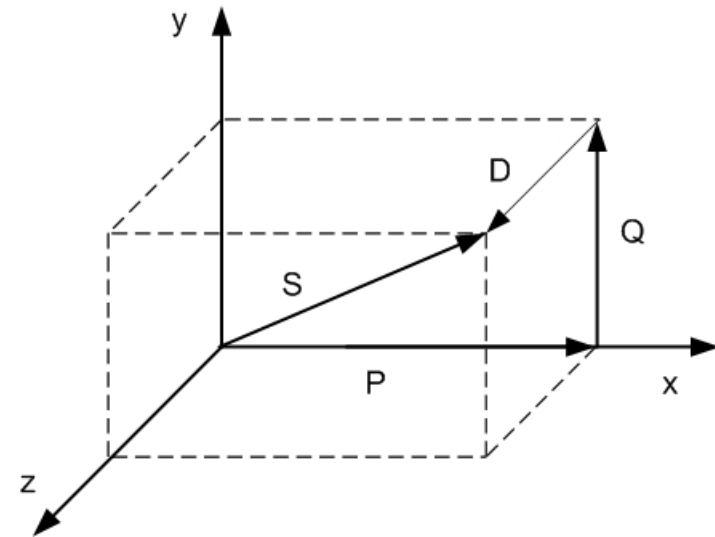
protože
$$S^2 \geq P^2 + Q^2$$

- zavádíme deformační výkon D :

$$S^2 = P^2 + Q^2 + D^2$$

a opravdový účinník:
(Power Factor)

$$\lambda = \frac{P}{S} = \cos \varphi_{ekv}$$





Zdroje vyšších harmonických

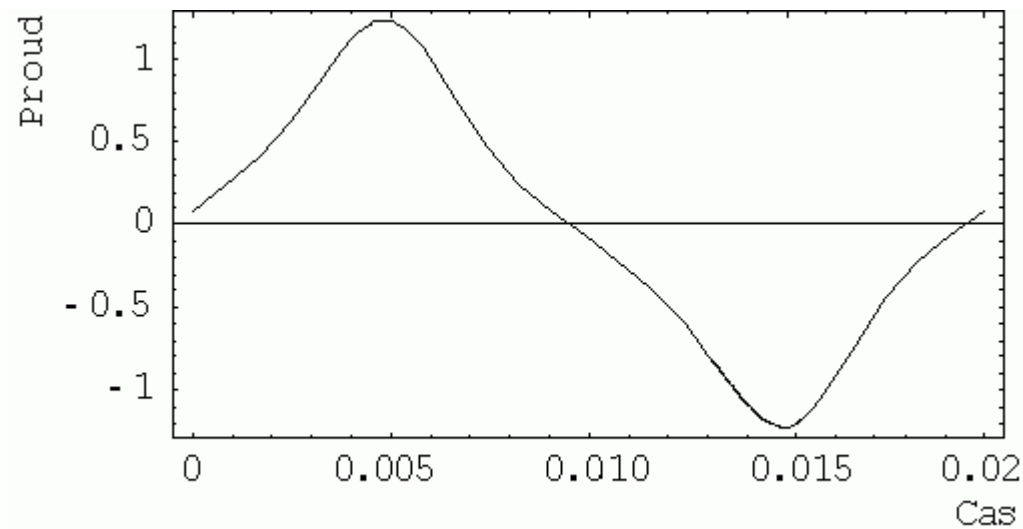
1. Zdroje vyšších harmonických napětí

- alternátory, motory (vliv nesinusového rozložení magnetického toku)

2. Zdroje vyšších harmonických proudu

a) transformátory

- vliv nelinearity magnetizační charakteristiky
- nejhorší: chod naprázdno => magnetický tok v jádře je největší
- deformace proudu při chodu naprázdno:



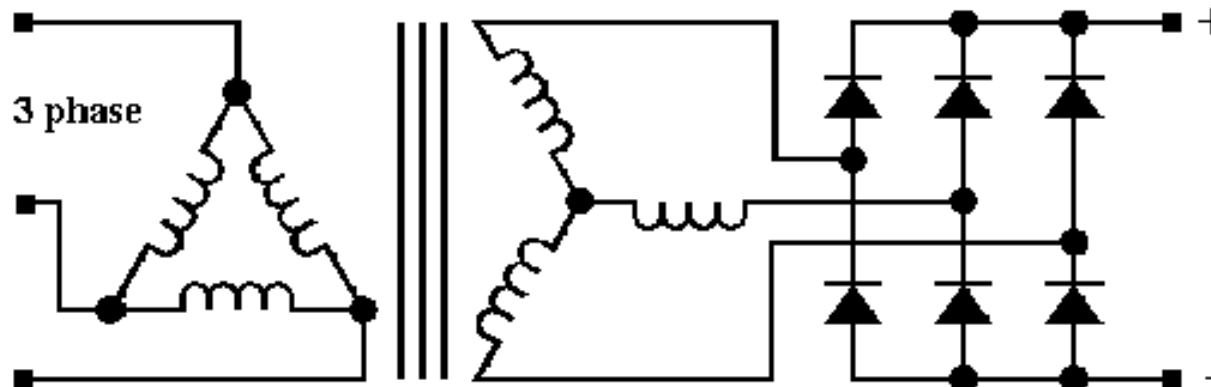


Zdroje vyšších harmonických

b) usměrňovače a měniče

- spektrum vyšších harmonických lze analyticky vyjádřit za těchto předpokladů:
 - symetrická trojfázová soustava
 - sinusové napětí na vstupu usměrňovače
 - indukčnost ve stejnosměrném obvodu $L \rightarrow \infty$
 - zkratový výkon napájecí soustavy $S_k \rightarrow \infty$ tj. $L_{vs} \rightarrow 0$
 - ztráty na usměrňovači jsou nulové

6-pulsní usměrňovač:

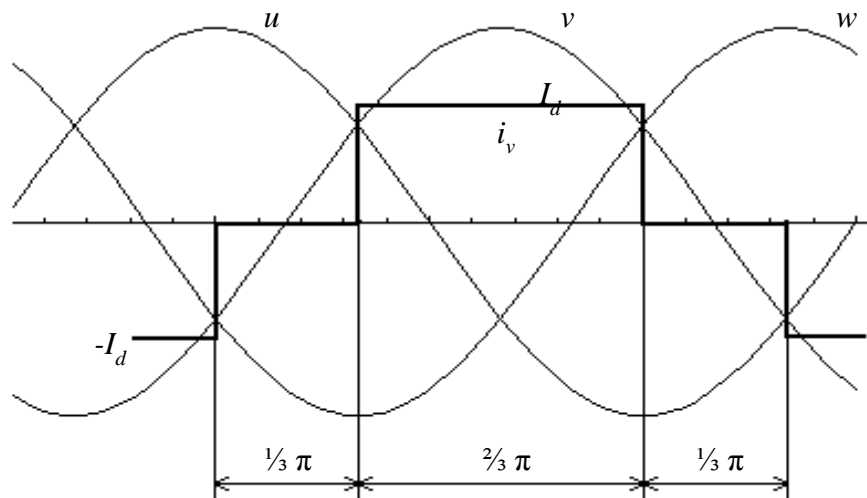




Proud usměrňovačem

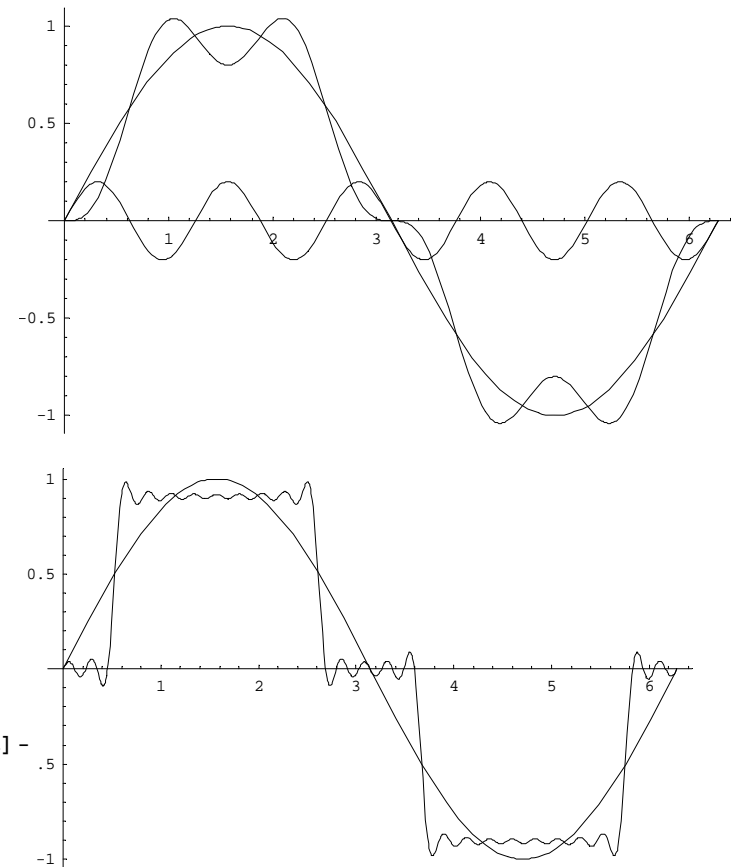
proud fáze v:

$$i_v(t) = \frac{2\sqrt{3}}{\pi} I_d \left[\sin \omega t - \frac{1}{5} \sin 5\omega t - \frac{1}{7} \sin 7\omega t + \frac{1}{11} \sin 11\omega t + \dots \right]$$



$$n = 6k \pm 1$$

```
Plot[{{Sin[x], Sin[x] - 1/5 Sin[5 x] - 1/7 Sin[7 x] + 1/11 Sin[11 x] + 1/13 Sin[13 x] - 1/17 Sin[17 x] - 1/19 Sin[19 x] + 1/23 Sin[23 x] + 1/25 Sin[25 x]}, {x, 0, 2 Pi]}
```





Proud usměrňovačem

platí tzv. Amplitudový zákon pro usměrňovač:

$$\frac{I_n}{I_1} = \frac{1}{n} \quad \text{pro} \quad n = 6k \pm 1$$

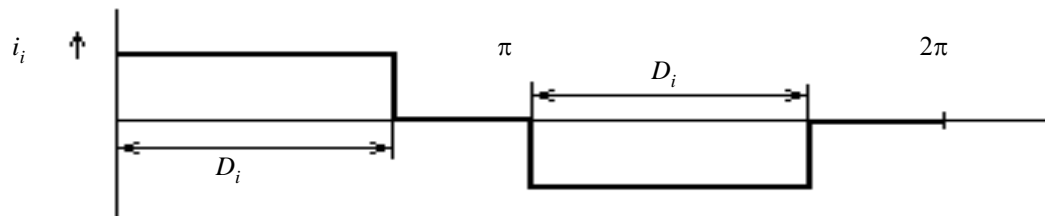
pro reálné usměrňovače existují přesnější vztahy např. podle normy CEI 1000-2-1:

$$\frac{I_n}{I_1} = \frac{1}{\left(n - \frac{5}{n}\right)^{1,2}} \quad \text{pro} \quad n = 6k \pm 1$$

vliv nesymetrie:

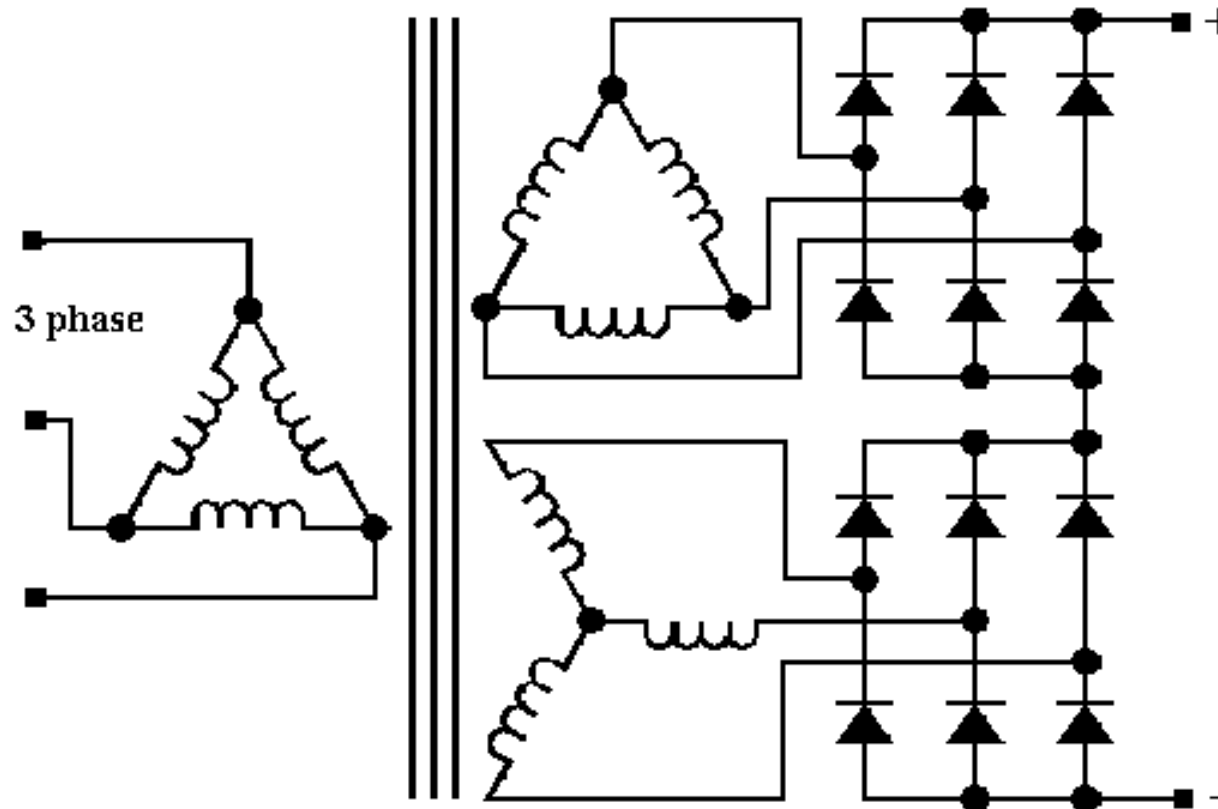
je-li usměrňovač napájen nesymetrickým zdrojem napětí, není fázová délka otevření diody $2/3\pi$, ale obecně pro i -tou fází D_i a platí

$$i_{hi} = \frac{1}{h} \frac{\left| \sin\left(\frac{hD_i}{2}\right) \right|}{\sin\left(\frac{D_i}{2}\right)}$$





12 – pulsní usměrňovač



Amplitudový zákon pro 12-pulsní usměrňovač:

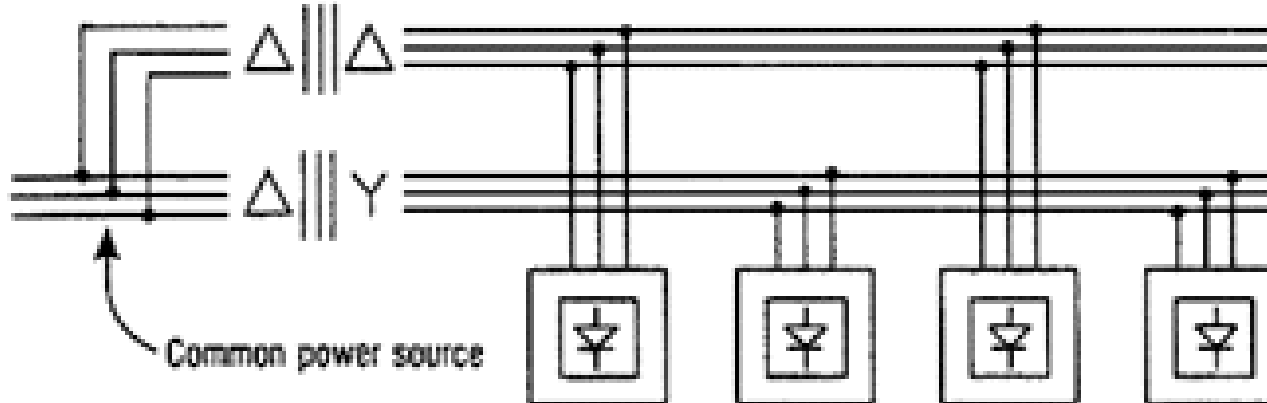
$$\frac{I_n}{I_1} = \frac{1}{n} \quad \text{pro } n = 12k \pm 1$$



Oblouková pec

c) obloukové pece (OP)

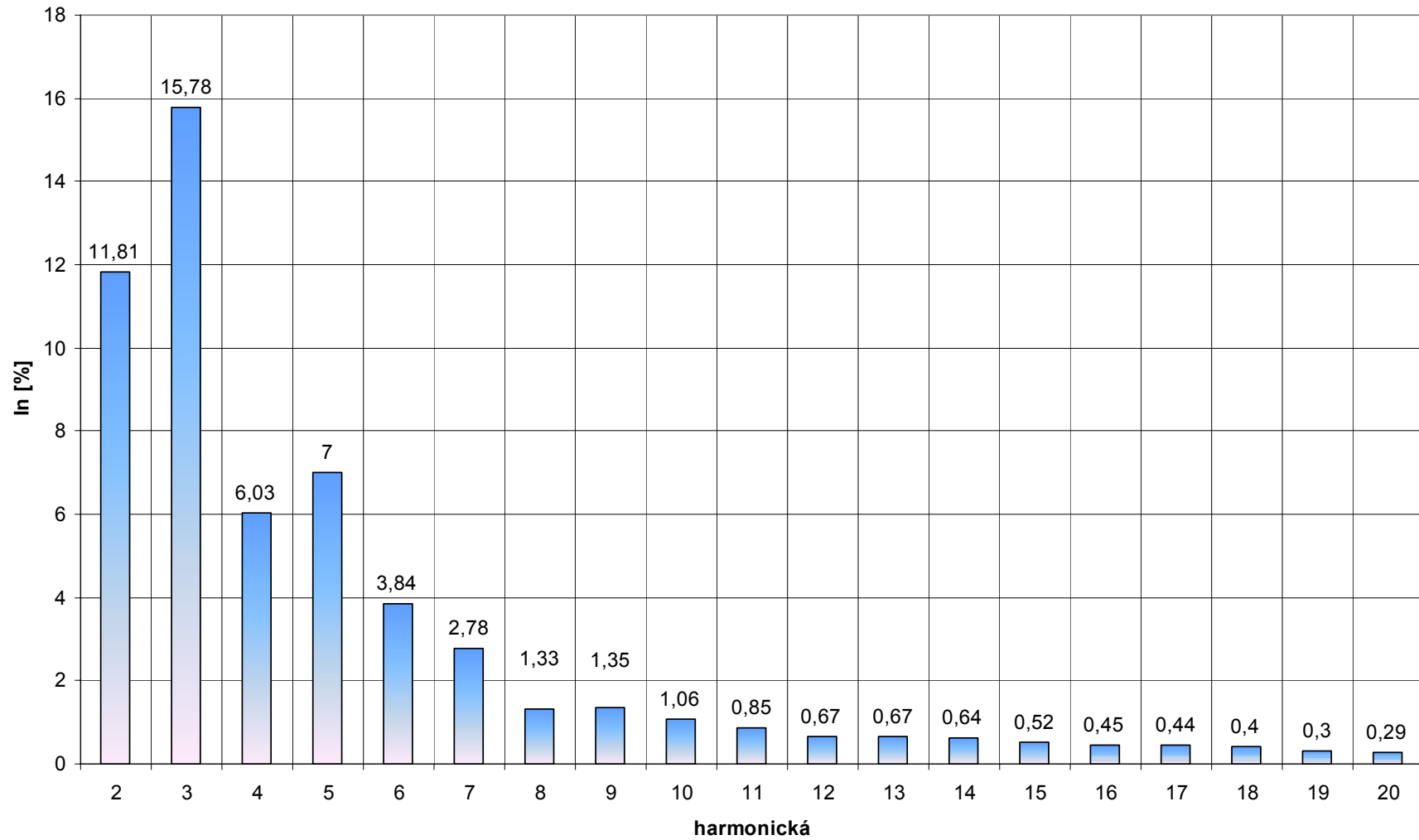
- nejhůře znečišťují sinusový průběhu
- produkují:
 - vyšší harmonické (liché i sudé !)
 - nesymetrie
 - subharmonické





Obloukové pece

Spektrum harmonických proudů, které produkuje EOP





Šíření vyšších harmonických v elektrické síti

I. Výpočet ustáleného stavu

Mějme uzlovou síť o n uzlech a g zdrojích (z pasivní zátěže)

Pro všechny uzlová napětí a proudy platí (viz. metoda uzl. napětí)

$$[\mathbf{I}] = [\mathbf{Y}] \cdot [\mathbf{U}]$$

nediagonální prvky $y_{kl} = \frac{1}{z_{kl}}$ diagonální $y_{kk} = -\frac{1}{z_{kz}} - \sum_{\substack{i=1 \\ i \neq k}}^n \frac{1}{z_{ki}}$

V blokovém vyjádření

$$\begin{bmatrix} [\mathbf{I}_g] \\ [\mathbf{0}] \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} [\mathbf{Y}_{gg}] & [\mathbf{Y}_{gz}] \\ [\mathbf{Y}_{zg}] & [\mathbf{Y}_{zz}] \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} [\mathbf{U}_g] \\ [\mathbf{U}_z] \end{bmatrix}$$

Odtud redukovaná matice $[\mathbf{Y}_{red}]$

$$[\mathbf{I}_g] = \left\{ [\mathbf{Y}_{gg}] - [\mathbf{Y}_{gz}] \cdot [\mathbf{Y}_{zz}]^{-1} \cdot [\mathbf{Y}_{zg}] \right\} \cdot [\mathbf{U}_g] = [\mathbf{Y}_{red}] \cdot [\mathbf{U}_g]$$



Šíření vyšších harmonických v elektrické síti

Známe buď $[\mathbf{U}_g]$ nebo $[\mathbf{I}_g]$

z nich pak dopočítáme přes $[\mathbf{Y}]$ a $[\mathbf{Y}_{red}]$ všechny ostatní napětí a proudy

II. Výpočet šíření vyšších harmonických od jejich zdroje

V síti se v uzlu k nachází zdroj vyšších harmonických (např. usměrňovač), který je popsán spektrální charakteristikou

+

Z ustáleného stavu máme zjištěn proud 1. harmonické

=> proudy vyšších harmonických h v uzlu k

$$\begin{bmatrix} \mathbf{Z}_{11h} & & \mathbf{Z}_{1zh} \\ & \dots & \\ \mathbf{Z}_{z1h} & & \mathbf{Z}_{zzh} \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} 0 \\ \dots \\ \mathbf{I}_{kh} \\ 0 \\ \dots \\ 0 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \mathbf{U}_{1h} \\ \dots \\ \mathbf{U}_{kh} \\ \dots \\ \mathbf{U}_{nh} \end{bmatrix} = [\mathbf{Z}_{zh}][\mathbf{I}_h] = [\mathbf{U}_h]$$



Šíření vyšších harmonických v elektrické síti

▪ kde $[Z_{zh}] = ([Y(h.\omega)]^{-1})_{z \times z}$

je zkratová impedanční matice (zkratujeme napěťové zdroje, asynchronní motory nahrazujeme impedanci nakrátko)

Tímto známe všechna uzlová napětí vyšších harmonických v soustavě

⇒ Porovnáme s normou a zjistíme jestli nejsou překročené limity

Harmonická	limit [%]	Harmonická	limit [%]	Harmonická	limit [%]
3	5	5	6	2	2
9	1.5	7	5	4	1
15	0.5	11	3.5	6...24	0.5
21	0.5	13	3		

Procentní hodnoty harmonických napětí pro distribuční sítě nn
dle ČSN EN 50 160



Šíření vyšších harmonických v elektrické síti

III. Snižování emisí vyšších harmonických

- a) aktivní filtr
 - b) uspořádání spotřebičů (např. 12-pulsní usměrňovač)
 - c) pasivní filtr LC
- při instalaci zařízení, která snižují obsah vyšších harmonických je potřeba provést důkladnou analýzu viděné impedance !!!
 - (platí to zejména při instalaci LC-filtru)

Závislost viděné impedance uzlu k na frekvenci získáme jako

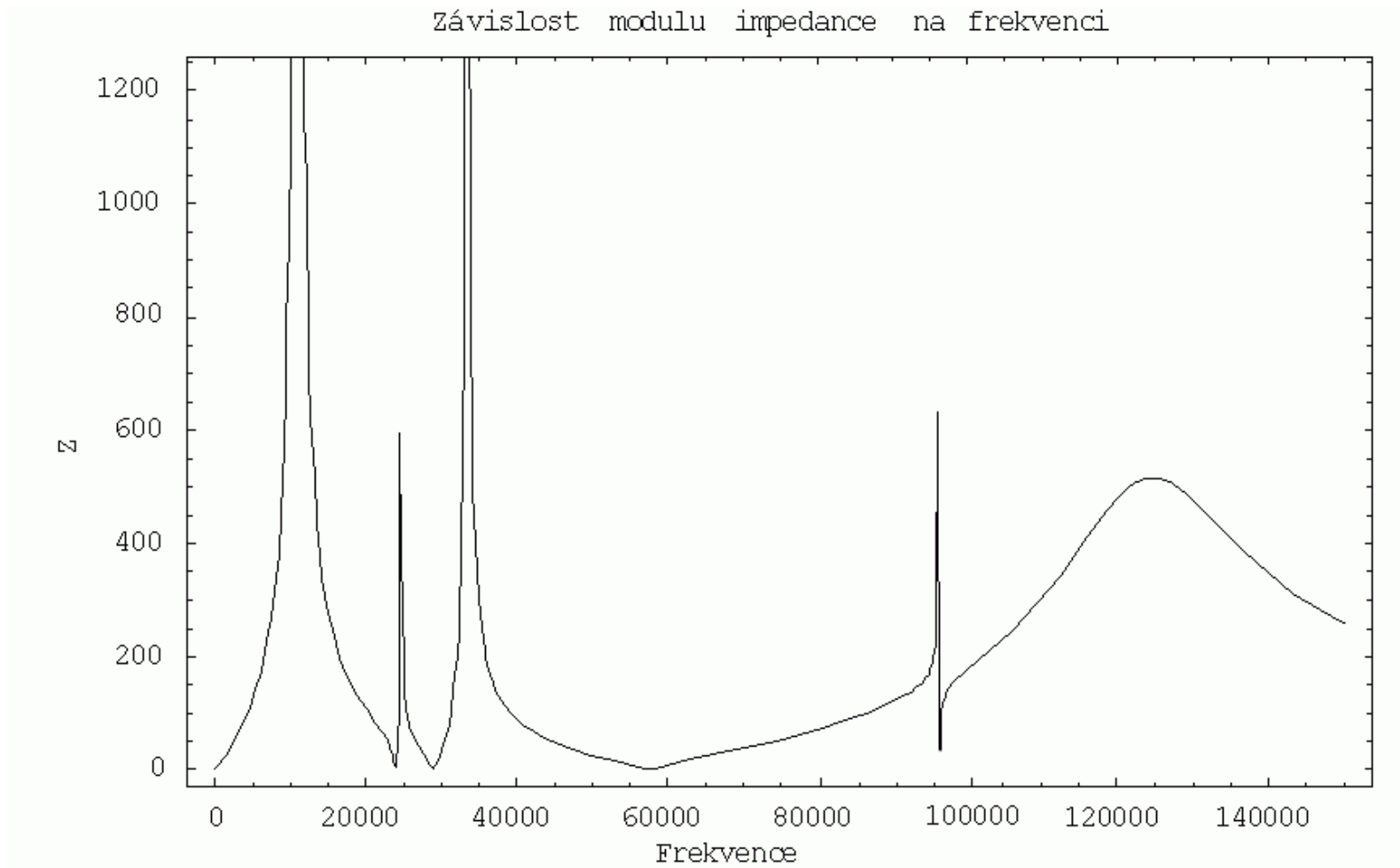
$$[\mathbf{Z}_z(\omega)] = \left([\mathbf{Y}(\omega)]^{-1} \right)_{z \times z}$$
$$\mathbf{Z}_k(\omega) = [\mathbf{Z}_z(\omega)]_{kk}$$

Problém: funkce se vytvoří pomocí inverze matice \mathbf{Y} (výpočetní problém v rozsáhlých sítích)



Šíření vyšších harmonických v elektrické síti

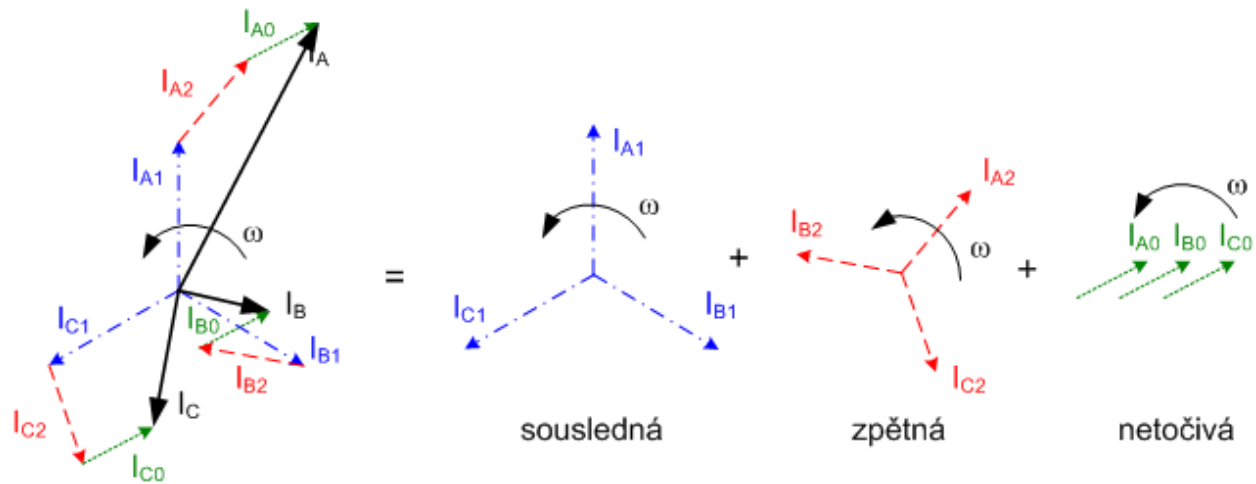
Příklad takto zjištěného průběhu (software Mathematica)





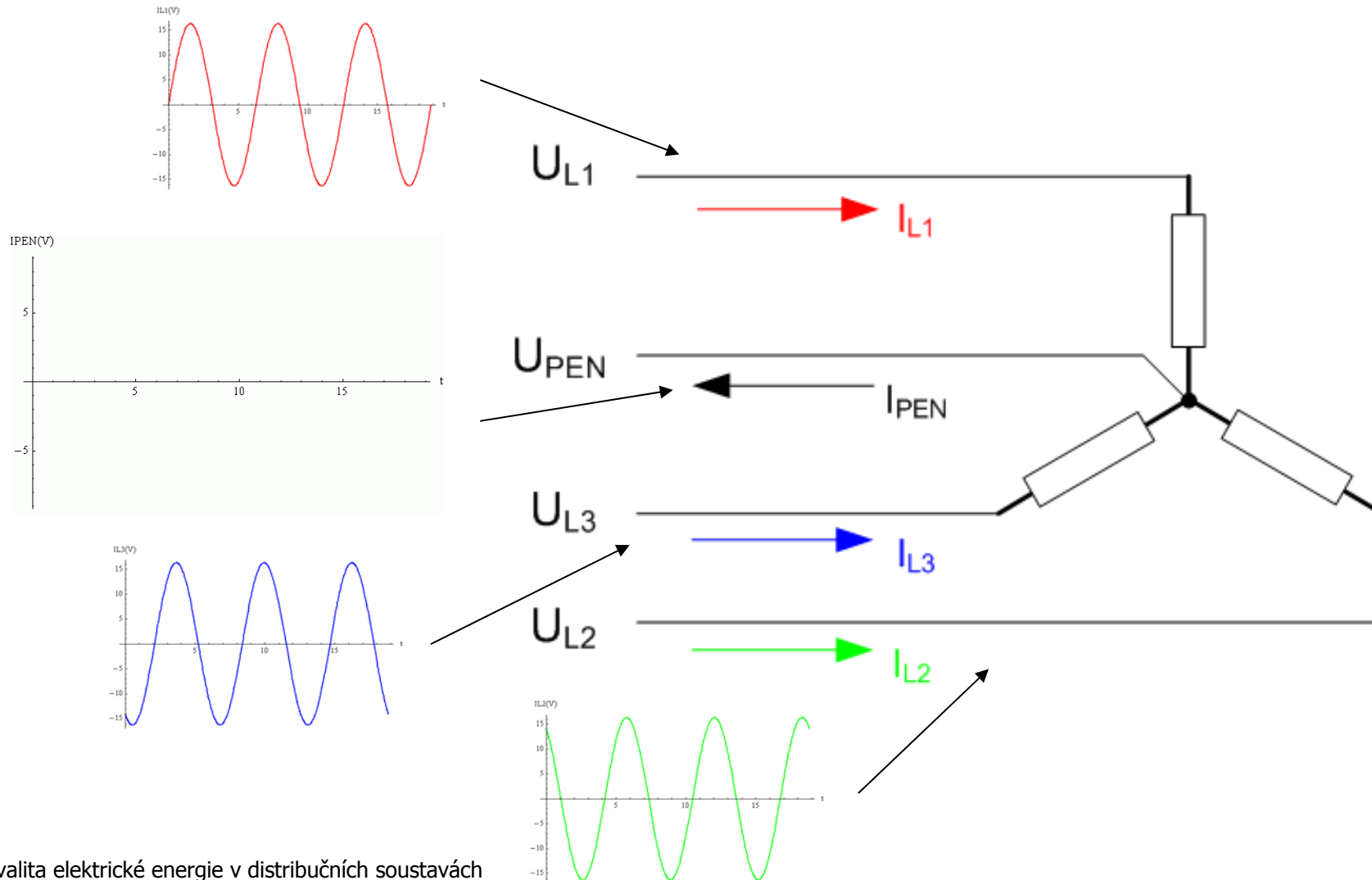
Čím může být způsobeno přetěžování PEN vodiče?

- sousledná složková soustava $3k + 1$
- zpětná složková soustava $3k + 2$
- **netočivá složková soustava..... $3k$**



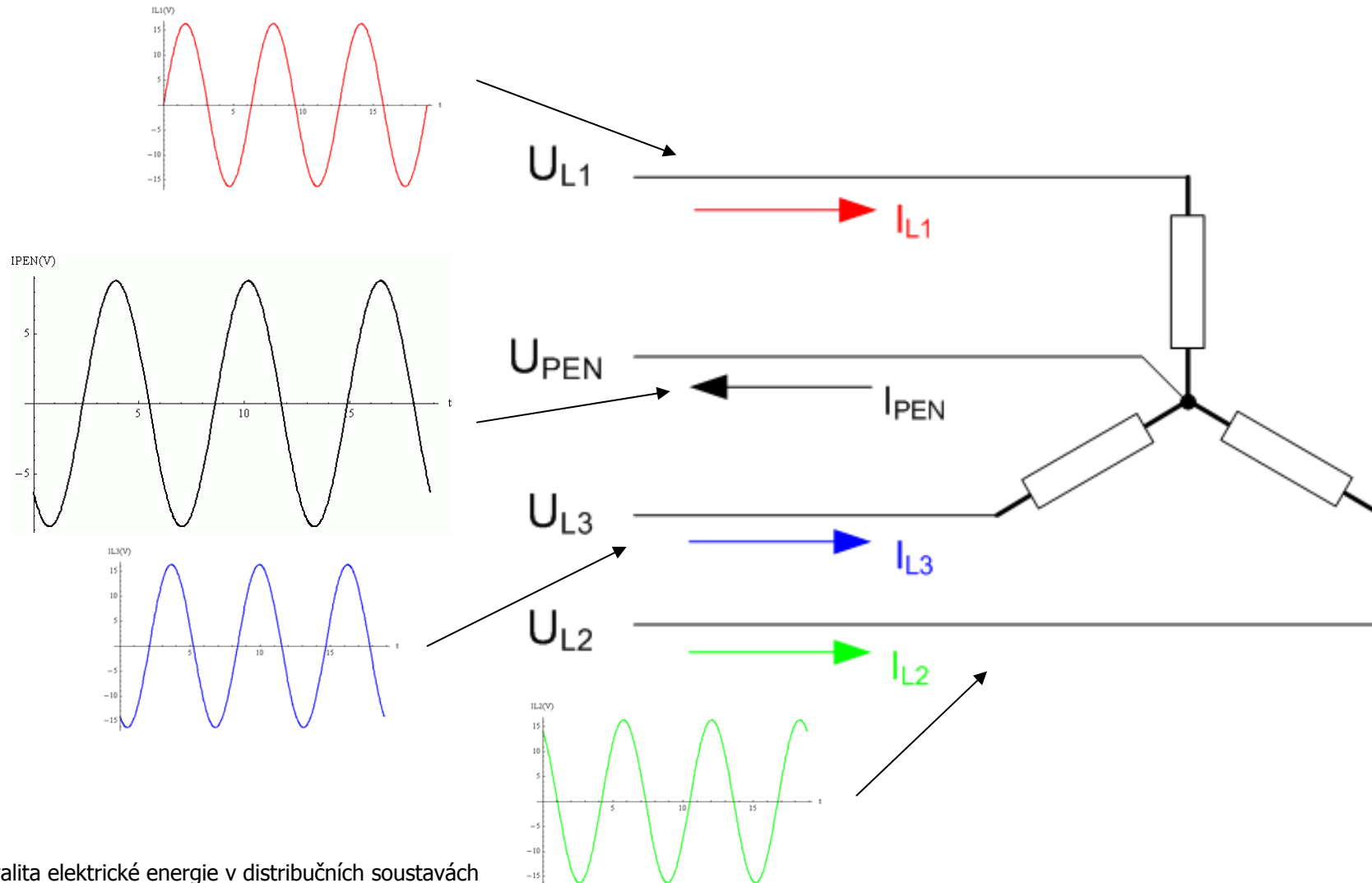


Čím může být způsobeno přetěžování PEN vodiče?



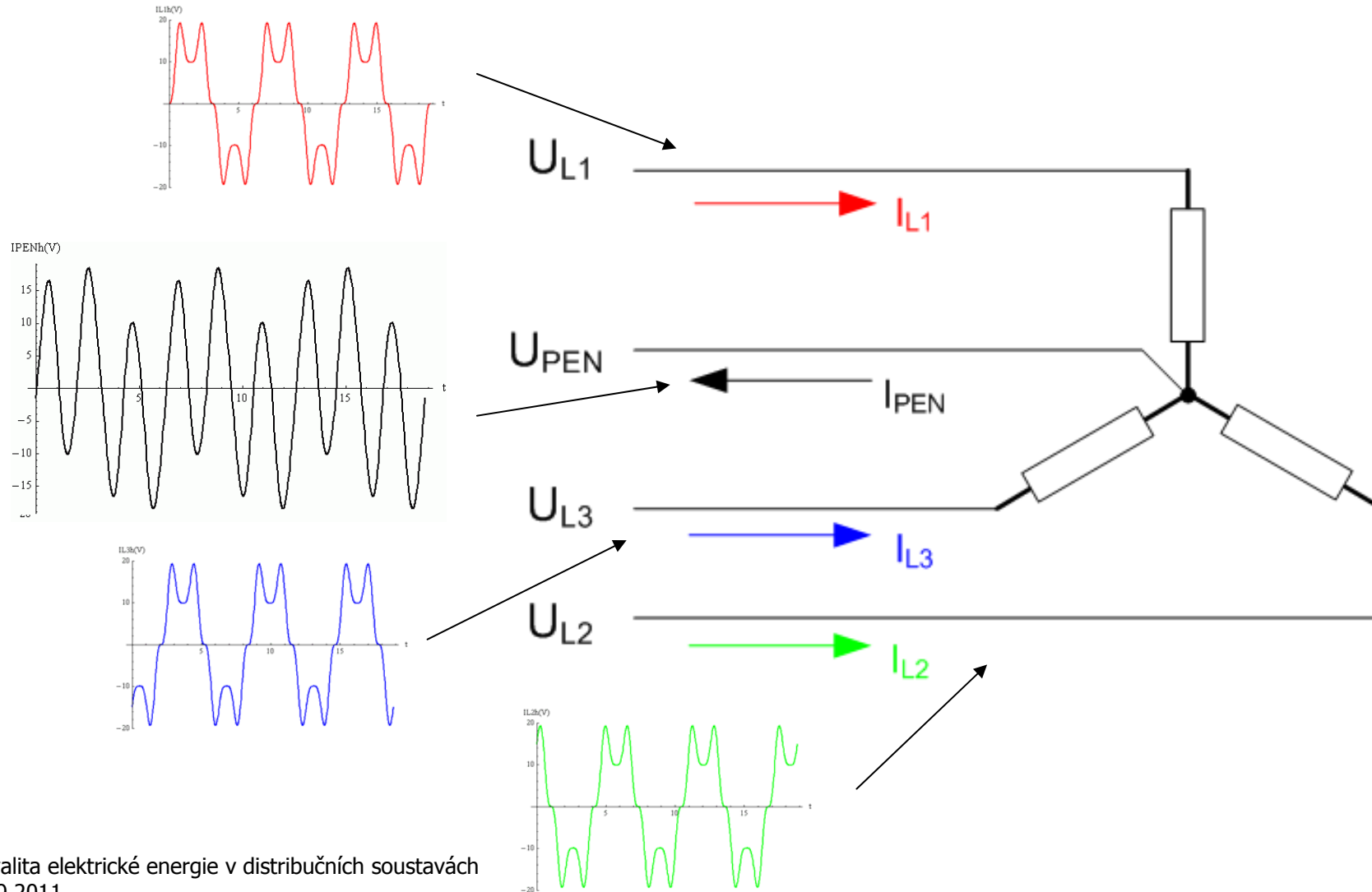


Čím může být způsobeno přetěžování PEN vodiče?





Cím může být způsobeno přetěžování PEN vodiče?





Speciální problémy v elektrických sítích nn

3. harmonická proudu je konfázní (obsahuje pouze netočivou složku)

- ⇒ tyto proudy se sčítají ve středním vodiči
- ⇒ mohou dosáhnout hodnoty převyšující proudy 1. harmonické ve fázi !
- ⇒ průřez středního vodiče volíme i s ohledem na charakteru spotřeby z hlediska produkce vyšších harmonických

filtrace konfázních harmonických pomocí TRF

např. TRF Y_d , Y_{nd} ... (filtrují netočivou složku)

týká se 3. , 9. , 15. , 21. atd. harmonické

nebo tlumivkou s lomeným vinutím



Vyšší harmonické v distribuční síti

Následky rušení vyššími harmonickými

- zařízení s výkonovou elektronikou (usměrňovače, pohony s frekvenčními měniči, pulzní zdroje, stmívače, ...)
- zařízení s nelineární voltampérovou charakteristikou (středofrekvenční a obloukové pece, plynové výbojky, zářivky, indukčnosti, malé transformátory)

Následky rušení vyššími harmonickými

- zkrácením životnosti
- chybná funkce ochran
- nesprávná funkce přijímačů HDO
- proudy vyšších harmonických nepříznivě ovlivňují zhášení oblouků zemních spojení

Potlačení rušení vyššími harmonickými

- bez přídavného zařízení (různé druhy zapojení měničů)
- s přídavným zařízením (pasivní a aktivní filtry)



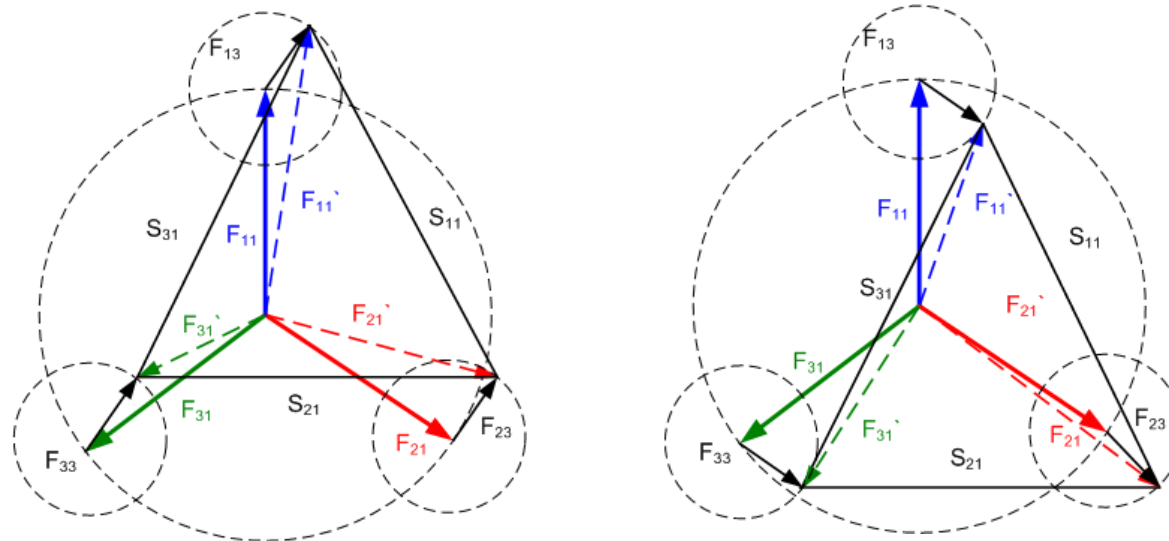
Třetí harmonická 1

- nesymetrická třífázová soustava => rozložení do složkových soustav (sousedná, zpětná, netočivá)
- u nesymetrického proudového zdroje se přes střední vodič uzavírají obecně všechny řády harmonických dle charakteru nesymetrie
- nejvýznamnější složkou proudu procházejícím středním vodičem je 3. harmonická
- pokud je 3. harmonická velmi významná v rozvodech nn, je možné její šíření omezit na úrovni vn vhodným zapojením transformátoru vn/nn
- po omezení 3. harmonické stávají se dominantními 5. a 7. harmonická
- projevuje se v napětí a v proudu
- obvykle ve všech třech fázích shodnou velikost a stejnou fázi vůči průběhu základní harmonické



Třetí harmonická 2

- obvykle ve všech třech fázích shodnou velikost a stejnou fází vůči průběhu základní harmonické



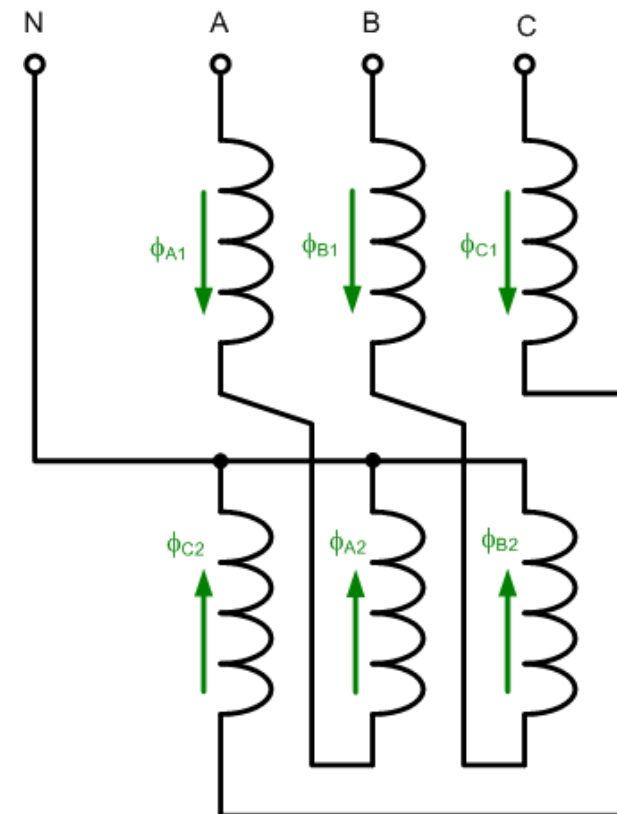
Nejčastější výskyt

- v napětí a proudech náhradních zdrojů (dieselalternátor)
- v proudu nelineárních spotřebičů (výbojková svítidla, PC)



Omezení 3. harmonické

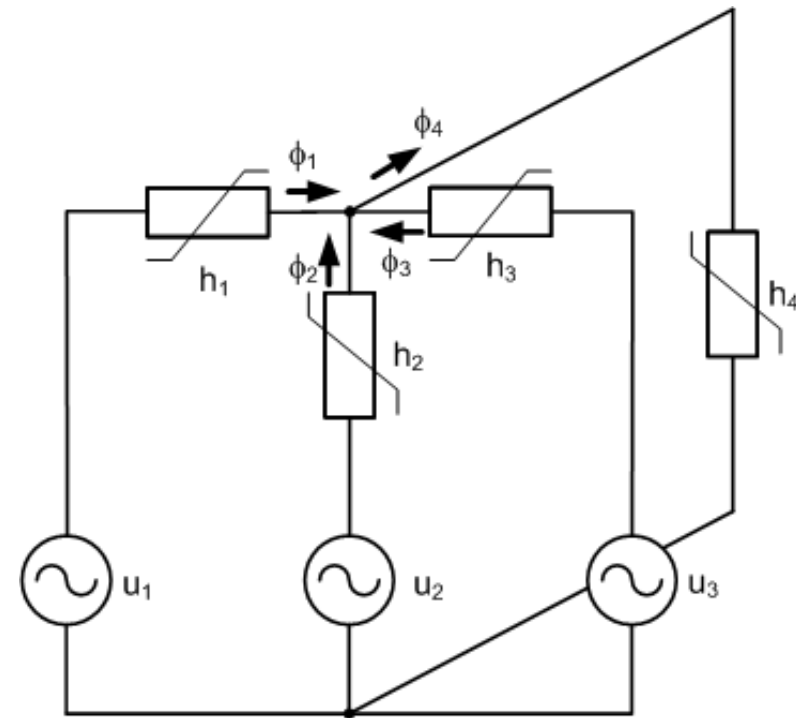
- je možno obecně použít pasivního či aktivního filtru (nevýhoda u aktivního filtru je vysoká cena a u pasivního filtru je možnost vzniku rezonanci)
- využití nového typu pasivního filtru, který zkratuje netočivou složku nebo pro ni funguje jako zadrž
- při dodatečném připojení do sítě nezpůsobuje rezonanci v síti
- lze využít v sítích malého rozsahu s nízkým zkratovým výkonem
- tlumivka s vinutím zapojeného do lomené hvězdy (ZigZag vinutí)





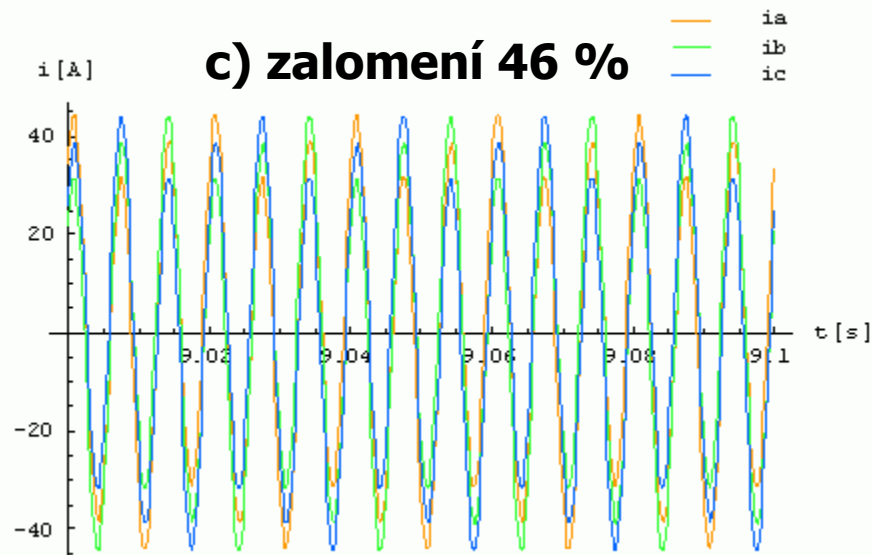
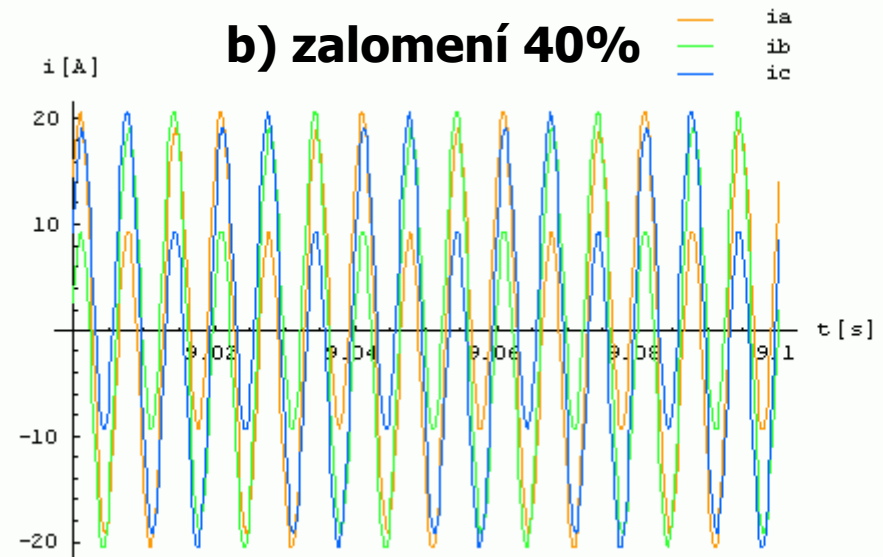
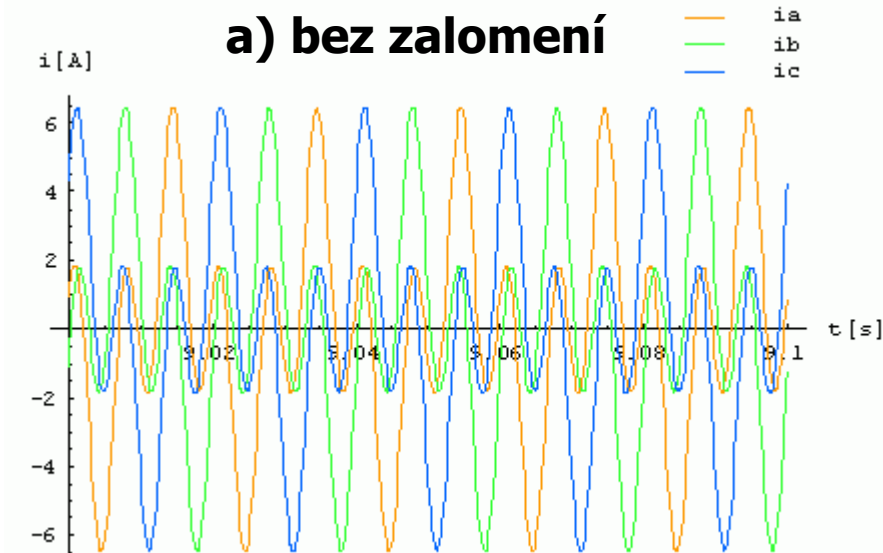
Model ZigZag tlumivky

- tlumivka je modelována jako jednojádrový typ s respektováním magnetické vazby k nádobě tlumivky
- model byl sestaven na základě obvodových rovnic a rovnic pro magnetický obvod
- simulace byly provedeny v softwaru Mathematica®
- zdroj napájení obsahuje základní (50 Hz) a 3. harmonickou (150 Hz)
- bylo sledováno uzavírání konfázní 3. harmonické v obvodu tlumivky s ohledem na zalomení vinutí

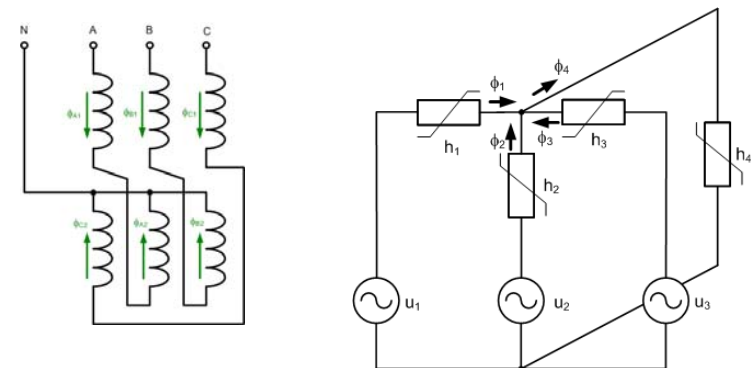




Symetrické napájení – proud vinutím



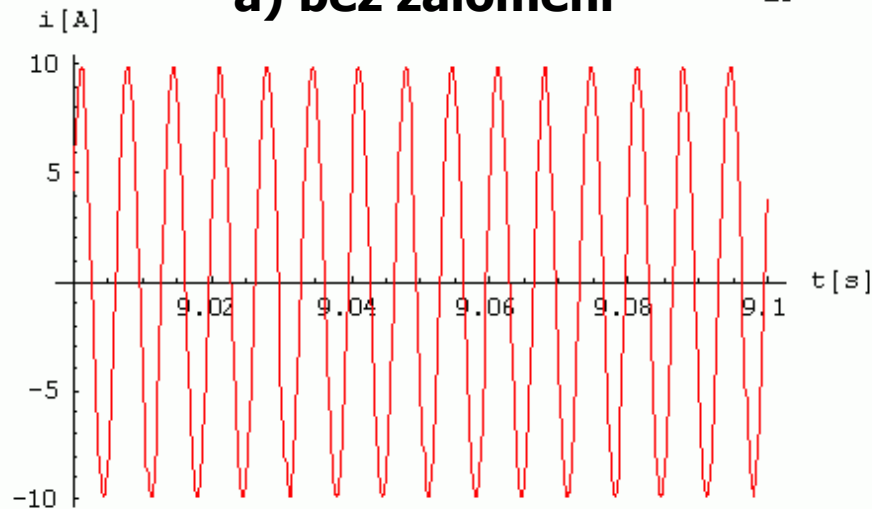
- při nezalomené první části vinutí nemůže být 3. harmonická kompenzovaná částí druhého vinutí



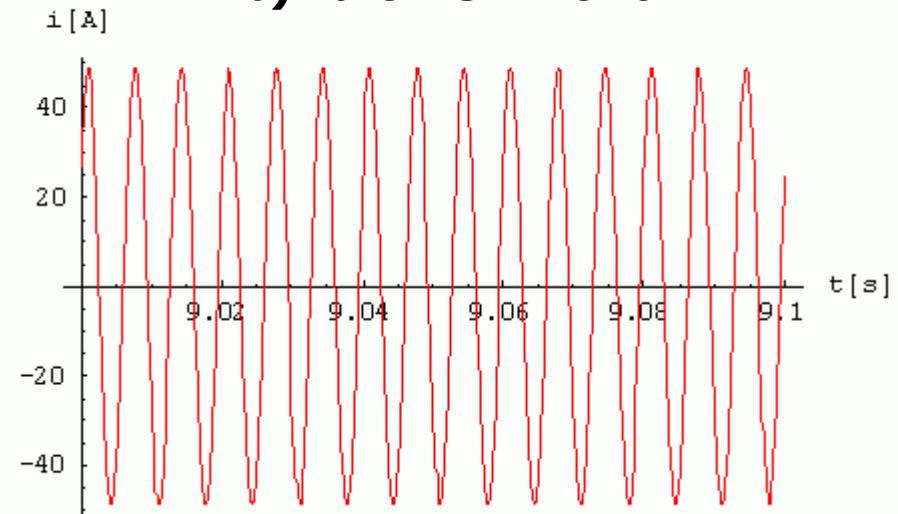


Symetrické napájení – proud v uzlu

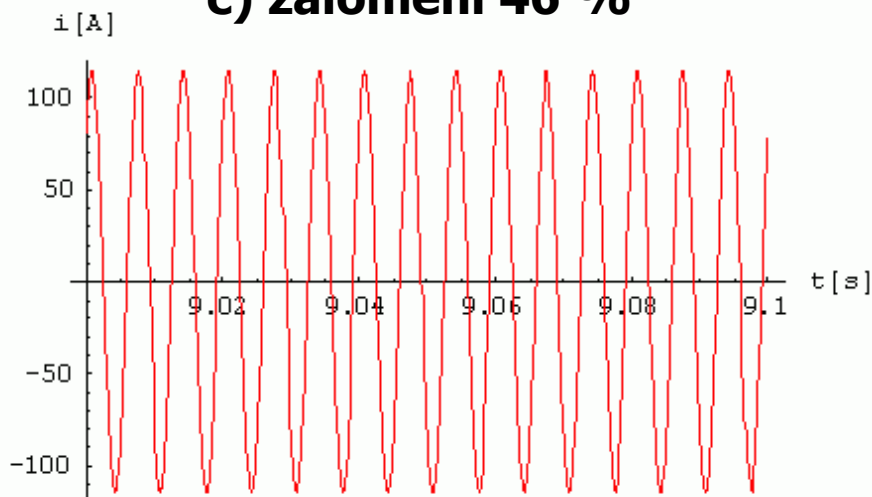
a) bez zalomení — i_{10}



b) zalomení 40% — i_{10}



c) zalomení 46 % — i_{10}



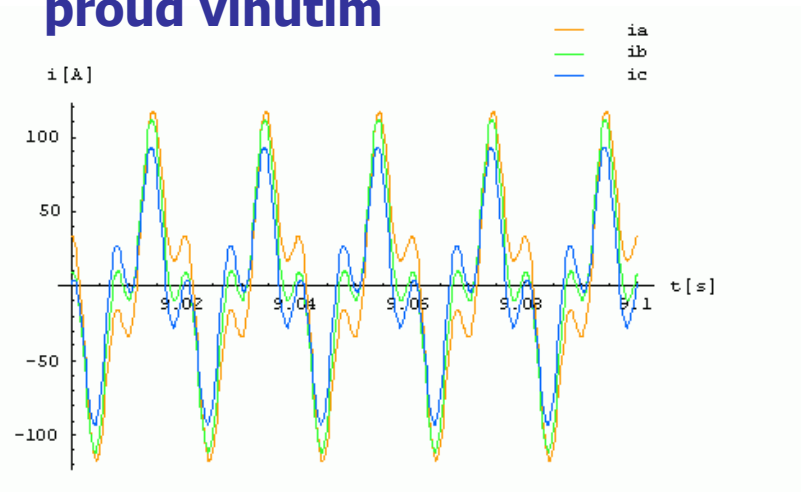
- při změně zalomení vinutí dochází ke zvýšení proudu v uzlu, což je způsobené zmenšením reaktance netočivé složky



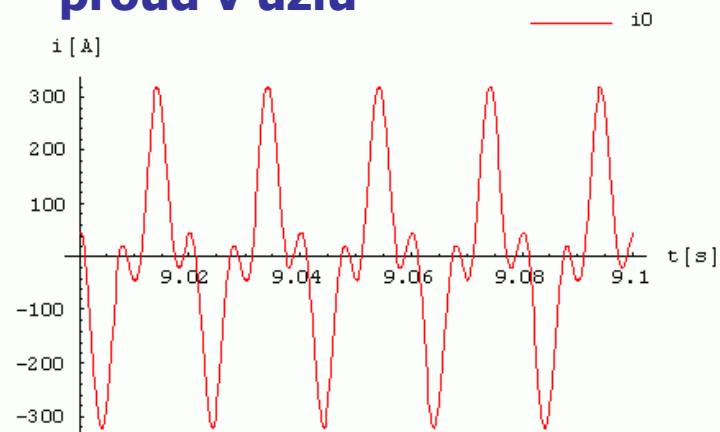
Nesymetrické napájení (zalomení 46 %)

- a) nesymetrie magnetického jádra (0,2 / 1 / 1,428 / 0,1) – $R_{mag1,2,3,0}$

proud vinutím



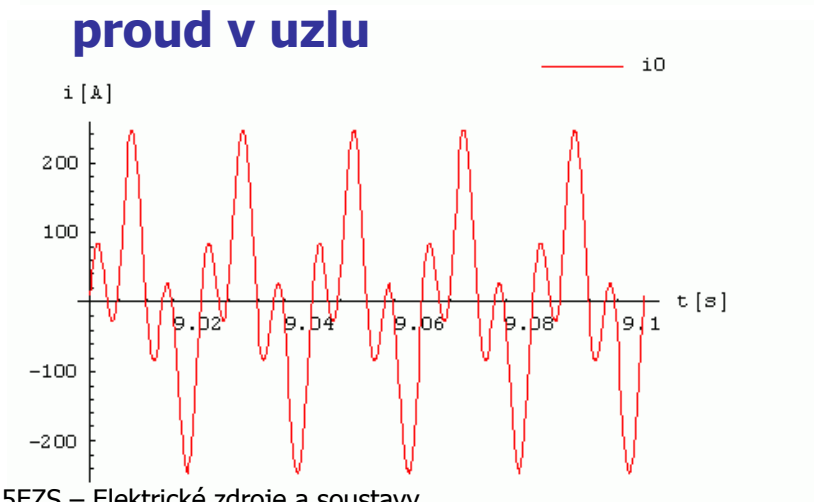
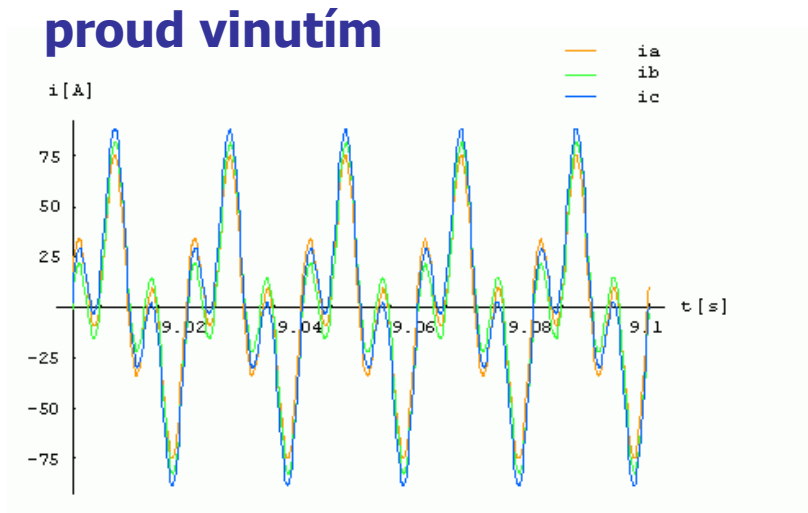
proud v uzlu





Nesymetrické napájení (zalomení 46 %)

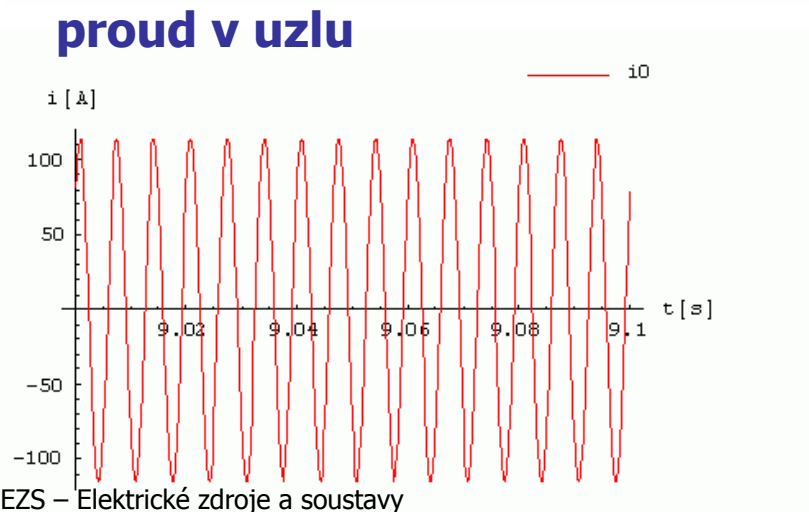
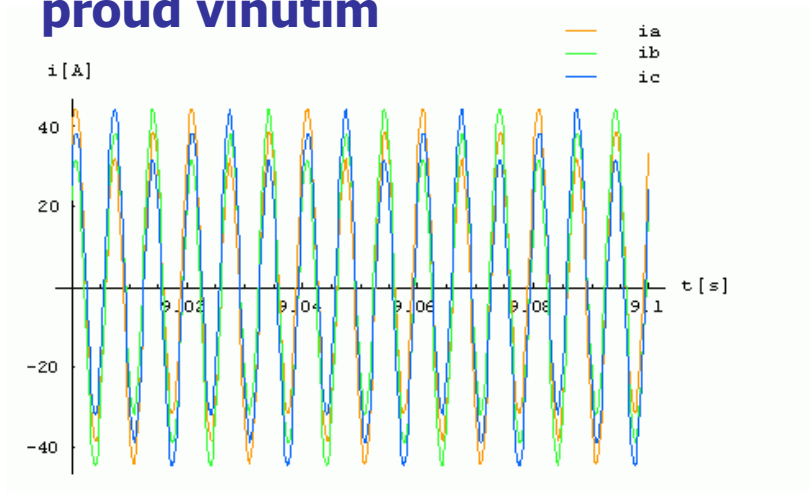
- b) nesymetrie 1. harmonické (1000, 1100, 900) – nesymetrie napájecího napětí UA1h, UB1h, UC1h





Nesymetrické napájení (zalomení 46 %)

- c) nesymetrie 3. harmonické (110, 100, 90) – napěťová nesymetrie
proud vinutím
3. harmonické UA3h, UB3h, UC3h





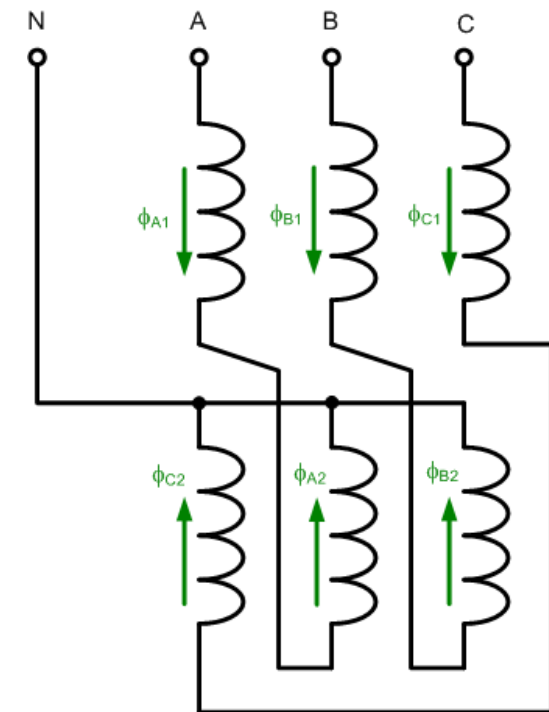
Simulace provedené na ZigZag tlumivce

mag. odpor (H^{-1})	napájecí napětí (V)			proud vinutím (A)		mag. tok (Wb)	
Rmag1,2,3,0	1. harm. napeti	3. harm. napeti	$k_{zal} (-)$	1.harm	3.harm	1.harm	3.harm
1/ 1/ 1/ 0,1	1000, 1000, 1000	100, 100, 100	1,000	3,19	3,29	3,19	0,1050
1/ 1/ 1/ 0,1	1000, 1000, 1000	100, 100, 100	0,900	3,91	4,11	3,73	0,1040
1/ 1/ 1/ 0,1	1000, 1000, 1000	100, 100, 100	0,800	4,83	5,47	4,42	0,1040
1/ 1/ 1/ 0,1	1000, 1000, 1000	100, 100, 100	0,600	6,95	16,23	6,06	0,1030
1/ 1/ 1/ 0,1	1000, 1000, 1000	100, 100, 100	0,550	7,28	31,26	6,32	0,0997
1/ 1/ 1/ 0,1	1000, 1000, 1000	100, 100, 100	0,540	7,32	38,04	6,35	0,0972
1/ 1/ 1/ 0,1	1000, 1000, 1000	100, 100, 100	0,510	7,32	85,37	5,83	0,0507
1/ 1/ 1/ 0,1	1000, 1000, 1000	100, 100, 100	0,501	7,27	99,43	4,90	0,0200
nesymetrie - zalomení 46 %							
0,2 / 1 / 1,428 / 0,1	1000, 1000, 1000	100, 100, 100	0,54	80,98	39,56	6,17	0,0964
1/ 1/ 1/ 0,1	1100, 1000, 900	100, 100, 100	0,54	39,18	38,05	6,59	0,0972
1/ 1/ 1/ 0,1	1000, 1000, 1000	110, 100, 90	0,54	7,32	38,01	6,35	0,0799
nesymetrie - zalomení 10 %							
0,2 / 1 / 1,428 / 0,1	1000, 1000, 1000	100, 100, 100	0,9	20,41	4,57	3,73	0,1040
1/ 1/ 1/ 0,1	1100, 1000, 900	100, 100, 100	0,9	10,30	4,11	4,07	0,1040
1/ 1/ 1/ 0,1	1000, 1000, 1000	110, 100, 90	0,9	3,91	4,11	3,73	0,1040



Závěrečné zhodnocení filtrace 3. harmonické

- při zalomení blížícím se 50 % je 3. harmonická magnetického toku plně kompenzována zalomenou částí druhého vinutí a přes plášť nádoby se uzavírá minimální magnetický tok
- impedance omezující 3. harmonickou proudů je tvořena pouze rozptylovou reaktancí a rezistancí vinutí (proud 3. harmonické je maximální)
- při zalomení vinutí 46 % dochází ke 10 násobnému zvýšení proudu v uzlu (zmenšení reaktance netočivé složky)





Kmitočty v elektrizační soustavě

Kmitočty v elektrizační soustavě $f_1 = \text{sít'ový kmitočet}$		
Harmonické	$f = h * f_1 \quad [Hz]$	$h > 0, h$ je celé číslo
Interharmonické	$f = h * f_1 \quad [Hz]$	$h > 0, h$ není celé číslo
Subharmonické	$f = h * f_1 \quad [Hz]$	$h < 1$
Stejnoseměrný systém	$f = h * f_1 \quad [Hz]$	$h = 0$



Matematický model

Časový průběh napětí:

$$u(t) = \sin(2\pi f t) + \sum_{i=1}^n a_i \cdot \sin(2\pi f_i t)$$

f - síťový kmitočet

a_i - amplituda i -tého interharmonického napětí

f_i - kmitočet i -té interharmonické

Efektivní hodnota:

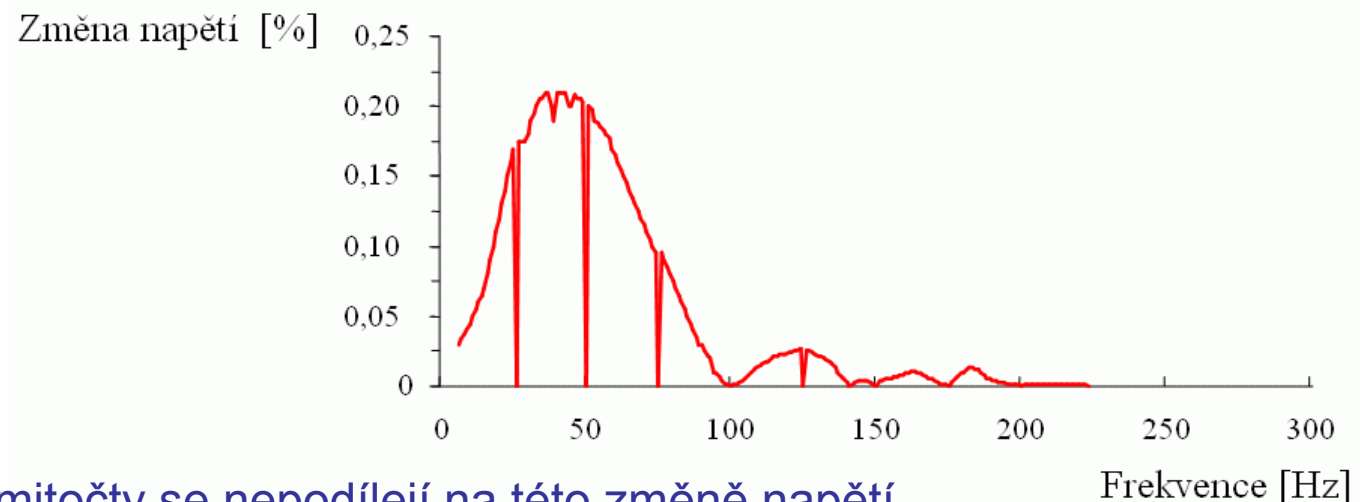
$$U = \sqrt{\frac{1}{T} \int_0^T u(t)^2 dt} \quad T = \frac{1}{f_1}$$

- při superpozici základního kmitočtu sítě a interharmonické frekvence se objevuje kolísání napětí



Matematický model

- největší změna napětí neharmonického průběhu napětí pak odpovídá amplitudě přičítané interharmonické
- efektivní hodnota veličiny je závislá na amplitudě i fázi interharmonické frekvence
- největší vliv na deformaci křivky mají nižší hodnoty kmitočtu
- hraniční bod mezi frekvencemi s výraznými a menšími vlivy je druhá harmonická



- harmonické kmitočty se nepodílejí na této změně napětí



Zdroje meziharmonických

Cyklokonvertor

- přímý měnič kmitočtu (vhodně řízený čtyřkvadrantový usměrňovač)
- připojují se do sítích n_n a v_n
- do výkonu až 10 MVA (střední a těžký průmysl)

Frekvenční spektrum usměrňovače

$$f_i = (p * n \pm 1) f_{fun}$$

Frekvenční spektrum cyklokonvertoru

$$f_i = (p_1 * m \pm 1) f_{fun} \pm p_2 * n * f_0$$

i řád interharmonické

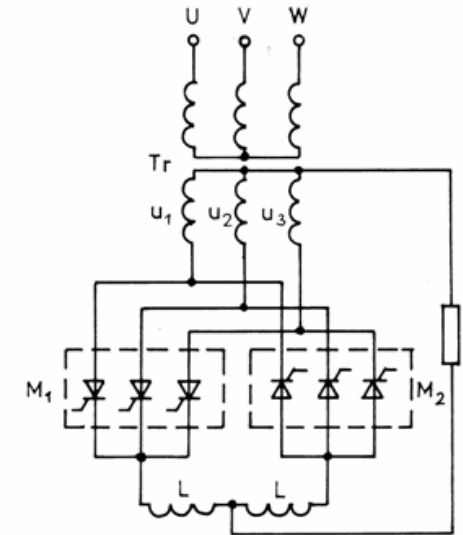
p_1 počet pulsů vstupního členu

p_2 počet pulsů výstupního členu

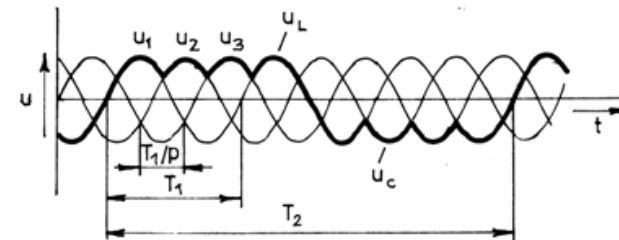
m, n ... 0, 1, 2, 3, ...

f_0 výstupní frekvence

f_{fun} ... síťový kmitočet



a)



b)



Zdroje meziharmonických

Statické frekvenční měniče

- skládá se ze vstupního p-pulsní usměrňovače a výstupního invertoru
- vstupní napájecí proud celého měniče je ovlivňován vlastnostmi vstupní a výstupní jednotky, které jsou vázány stejnosměrnou vazbou
- spojení usměrňovače a cyklokonvertoru

Obloukové pece a svářečky

- vyznačují se širokým frekvenčním spektrem, kde jsou výrazně zastoupeny i nižší kmitočty
- tyto nižší frekvence jsou spojeny s flickerem
- tato zařízení jsou většinou napájena ze soustavy vn, čímž jsou kladeny vysoké požadavky na parametry soustavy v připojovacím bodě systému (PCC)

Indukční motory

- rušící charakter je dán nepravidelným magnetizačním proudem souvisejícím s drážkami ve statoru i rotoru a saturací železa



Monitorování meziharmonických

- mají mnoho společných znaků s harmonickými, avšak v některých vlastnostech je mezi těmito jevy zásadní rozdíl
- interharmonické spojitě vyplňují spektrum kmitočtů mezi navzájem sousedícími harmonickými a pro jejich sledování jsou běžně používány metody diskrétní nebo rychlá Fourierova transformace
- pro monitorování lze využít diskrétní Fourierovu transformaci DFT

$$\Delta f = f_w = \frac{1}{T_w} = \frac{1}{NT_s} = \frac{f_s}{N} \approx \frac{f_{fund}}{K}$$

T_w ...šířka časového okna DFT

f_s ...vzorkovací frekvence

N ...počet vzorků v časovém okně

f_{fund} ...základní harmonická (síťový kmitočt)

K ...konstanta vzorkování



Monitorování meziharmonických

- výsledek způsobu aplikace DFT je velmi závislý na poměru síťového kmitočtu a vzorkování
- optimalizací vstupních parametrů lze dosáhnout velmi vysoké přesnosti
- např. $K = 10$, $f_{\text{fund}} = 50$ Hz lze analyzovat spektrum s frekvenčními diferencemi 5 Hz, tj. 55 Hz, 60 Hz, 65 Hz atd. (platí zásada: interval mezi dvěma sousedícími frekvencemi musí být větší, než-li aplikované časové okno)
- monitorování spojitosti spektra je vysoce náročné na technické vybavení a lze ji dodržet snížením velikosti intervalů sousedících kmitočtů

Metody analýzy meziharmonických

- Discrete-time Fourier transformation (DTFT)
- Nulování period v časovém okně
- ZOOM transformace
- Kvazi-synchronní algoritmus



Mezilehlé harmonické

- všechny sinusové průběhy napětí a proudu jejichž frekvence nejsou celočíselným násobkem síťové frekvence
- napětí těchto frekvencí způsobují přídavné zkreslení napěťové křivky a nejsou periodická vůči frekvenci 50 Hz
- zdroje mezilehlých harmonických:
 - měniče s meziobvodem
 - přímé měniče
 - podsynchronní usměrňovací kaskády
 - elektronická cyklová zařízení (připínání a odpínání jednotlivých sinusovek)
 - pohony s excentrem, kovářské lisy (spíše flicker)
- mezilehlé harmonické je nutné brát v úvahu, protože mohou být na frekvenci využívané k přenosu signálu HDO
- úměrně k zatížení sítě vyššími harmonickými mohou vznikat postranní pásma mezilehlých harmonických s odstupem 100 a 200 Hz



Hodnocení rušivého vlivu mezilehlých harmonických

- pro hodnocení se používá vztažné hodnoty napětí mezilehlé harmonické

$$u_{\mu} = \frac{U_{\mu}}{U}$$

U_{μ} ... velikost napětí mezilehlé harmonické

U ... velikost napětí jmenovitého napětí sítě

- hlavní důvody omezení vlivu mezilehlých harmonických:
 - možnost vzniku flicker efektu (při nepříznivé frekvenci a trvání vlivu mezilehlé harmonické může teoreticky již při hodnotách $u_{\mu} = 0,15\%$ dojít k ruš. vlivu)
 - možnost rušení přijímačů HDO
- vzhledem k rušení HDO byla zvolena přípustná úroveň HDO na 0,2 %
- při překročení této hodnoty je třeba dbát na to, aby vzniklé frekvence nepřekročily kritéria pro flicker a neležely v oblasti frekvencí HDO (± 100 Hz od frekvence HDO)



Snižování mezilehlých harmonických

- u měničů frekvence s meziobvodem lze dosáhnout zlepšením vyhlazení v meziobvodu
- usměrňovače s vyšším počtem pulsů, které snižují úrovně určitých harmonických (5., 7. u 12-ti pulsního měniče) vedou současně ke zmenšení amplitudy, od. frekvencí těchto harmonických
- zvolení odběrového místa s vyšším zkratovým výkonem (meziharmonická napětí se nepřímo úměrně s poměrem zkratového výkonu)
- při rušení signálu HDO, lze použít hradící člen



Doporučená literatura

Literatura

- Tlustý J.: Energetická rušení v distribučních a průmyslových sítích
- <http://www.lpqi.org/>
- Kůs V.: Vliv polovodičových měničů na napájecí síť, BEN 2002
- Santarius P., Gavlas J., Kužela M.: Kvalita dodávané elektrické energie v sítích nízkého napětí
- Pavelka J., Čeřovský, Z.: Výkonová elektronika, ČVUT 2002