České vysoké učení technické v Praze
Fakulta elektrotechnická
Katedra elektroenergetiky

Energetická rušení v distribučních a průmyslových sítích

A0M15EZS – Elektrické zdroje a soustavy

Kvalita elektrické energie a rušení

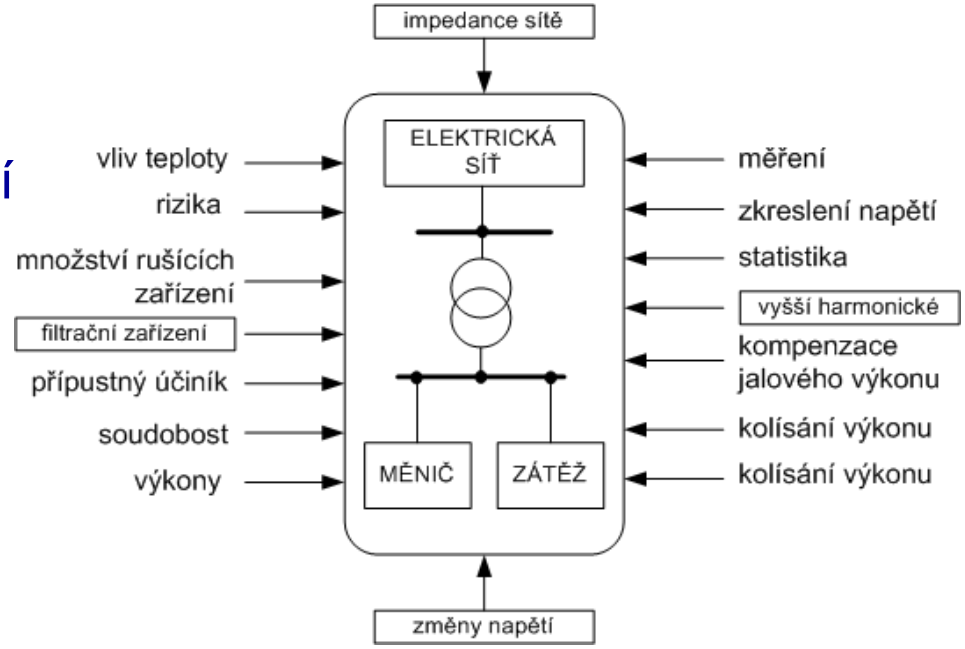
- energie, která slouží nejen pro vlastní spotřebu výrobce, ale i dalším odběratelům se stala zbožím a proto bylo nutné stanovit **měřítka pro posouzení její kvality**
- dříve byly kvalitativní parametry:
  - stabilní napětí
  - kmitočet
- s rozvojem techniky → snaha o **zvýšení hospodárnosti** používáním **úsporných zařízení a přístrojů**
- většina má **nelineární** nebo **proměnlivou provozní charakteristiku**
- stále více se uplatňují zpětné vlivy na DS, které může vést až k rušivému ovlivnění jiných přístrojů a zařízení
- rozdělení kmitočtových pásem rušení:
  - energetická
  - akustická
  - radiová
  - mezipásmo radiového a akustického rušení

Elektromagnetická kompatibilita

- pro posouzení rušivých vlivů je nutné stanovit:
  - do jaké míry smí být zařízení zdrojem rušení
  - jakému rušení musí být zařízení odolné
- přijetím určitých opatření lze omezit vliv elektromagnetického rušení na řídící, monitorovací, přenosová a další zařízení
- elektromagnetické **rušení** považuje jakýkoliv elektromagnetický jev, který může zhoršit funkci nějakého zařízení nebo systému, přičemž elektromagnetickým rušením může být elektromagnetický šum, nežádoucí signál nebo změna vlastností samotného prostředí, ve kterém dochází k šíření tohoto elektromagnetického jevu
- nařízení vlády č. 18/2003 Sb., §2, odst. 1
  - Přístroj může být uveden na trh nebo do provozu pouze tehdy, splňuje-li požadavky na ochranu, přičemž musí být proveden tak, aby za předpokladu, že je řádně instalován, udržován a využíván pro účely, pro které je určen,
  - a) elektromagnetické rušení, které způsobuje, nepřesáhlo úroveň přípustnou nebo stanovenou pro provoz radiokomunikačních a telekomunikačních zařízení či jiných přístrojů v souladu se zamýšleným účelem,
  - b) měl odpovídající odolnost vůči elektromagnetickému rušení, která mu umožní provoz v souladu se zamýšleným účelem.“

Elektromagnetická kompatibilita

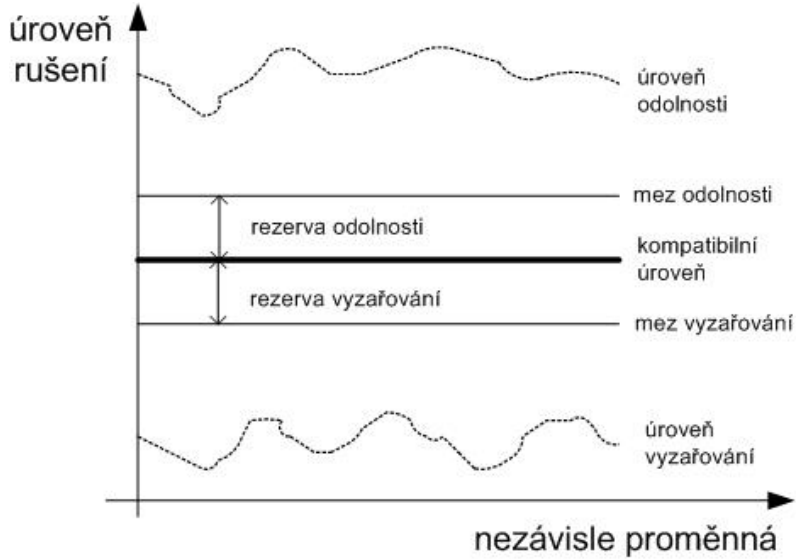
- mez rušení – nejvyšší úroveň rušení ke které jsou vztaženy ostatní hladiny
- kompatibilní úroveň – úroveň pokrytí 95 % případů rušení
- elektromagnetická slučitelnost = elektromagnetická kompatibilita (EMC)
  - *Schopnost zařízení nebo systému vyhovujícím způsobem fungovat ve svém elektromagnetickém prostředí bez vytváření nepřípustného rušení čehokoliv v tomto prostředí.* (z normy ČSN IEC 1000-2-1)
- dodržování směrnic pro EMC v rámci EU
- vztažná hodnota EMC – slouží ke koordinování a určování úrovní rušení v elektrických sítích a úrovni odolnosti různých typů zařízení



Elektromagnetická kompatibilita

- zařízení by měla mít úroveň odolnosti ≥ kompatibilní úroveň
- kompatibilní úroveň by měla sloužit k bezproblémové funkci rozvodné sítě, na níž jsou připojeni jednotliví nezávislí odběratelé
- rušivá veličina = veličina, která nežádoucím způsobem ovlivňuje elektrické zařízení
- přípustná hladina - výchozí hodnota pro určení mezní velikosti odolnosti proti rušení a meze vyzařování
- úrovně rušení:
  - statistické rozložení úrovně rušení
  - určená kompatibilní úroveň
  - úroveň odolnosti
  - statické rozložení úrovně citlivosti na rušení
- celkové rušení = souhrn několika veličin, které jsou závislé na čase, prostoru a i vzájemně

Elektromagnetická kompatibilita



V poslední době je tlak na 99 % kompatibilní úrovně, zejména u odchylek napětí. Jaký by to mělo praktický dopad?

- snížení počtu povoleného překročení mezí
  - distributor – zvýšení investic z důvodu dodržení kvality elektrické energie při provozu, manipulacích, údržbě, atd.
  - odběratel – přísnější dodržování kvalitativních parametrů v PCC

EMC z pohledu zákona

Zákon č. 22/1997 Sb. o technických požadavcích na výrobky

- v souvislosti se vstupem ČR do EU novelizován zákonem č. 226/2003 Sb.

- **Výrobce** - může jím být kdokoliv na světě
- **Dovozce** - ten, kdo uvede na trh výrobek z jiného než členského státu Evropské unie nebo uvedení takového výrobku na trh zprostředkuje

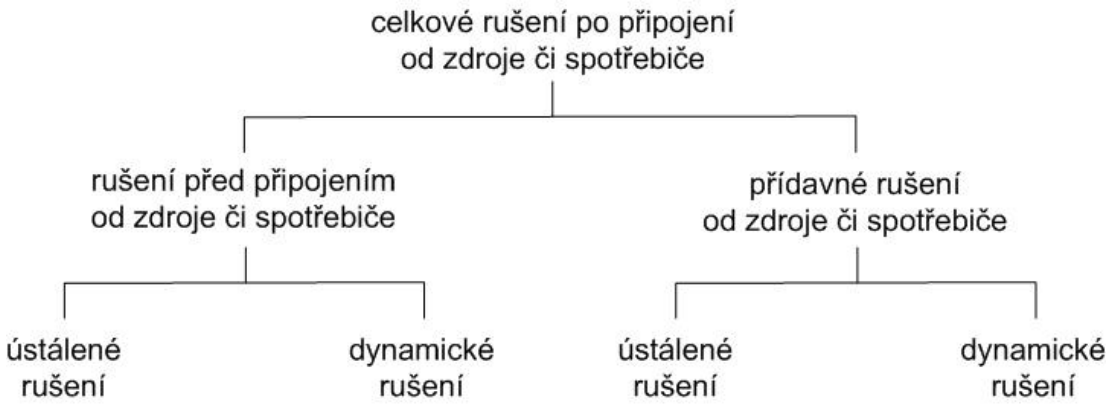
- **Zplnomocněný zástupce** - osoba usazená v členském státě Evropské unie, která je výrobcem písemně pověřena k jednání za něj se zřetelem na požadavky vyplývající pro výrobce z tohoto zákona

EMC - normalizace

- **IEC** – International Electrotechnical Commitee
  - problematika EMC - technická komise TC 77
  - příprava základních dokumentů (parametry specifikující prostředí, postupy zkoušek, …) - řada norem IEC 1000-X-Y, IEC YYY
- **CENELEC** – European Commitee for Electrotechnical Standartization
  - vydává evropské normy
  - přebírá normy IEC a předkládá požadavky na tvorbu nových
  - řady norem EMC (EN 50000, EN 55000, EN 60000, EN 61000)
- **ETSI –** European Telecommunications Standart Institute
  - vydává evropské normy v oboru telekomunikací
  - řady norem ETS 300 XXX
- **ČSN** – Česká technická norma
  - vychází ze zákona č. 22/1997 Sb. www.csni.cz
  - je dokument schválený pověřenou právnickou osobou pro opakované nebo stálé použití vytvořený podle tohoto zákona a označený písmenným označením ČSN, jehož vydání bylo oznámeno ve Věstníku Úřadu pro technickou normalizaci, metrologii a státní zkušebnictví.
  - technická norma není obecně závazná

Optimalizace elektromagnetického prostředí

- Rozdělením kompatibilních úrovní do tříd se optimalizuje návrh elektromagnetického prostředí a vyloučí se tak zbytečné a nákladné předimenzování systému.
- **Třída I:** chráněná napájení s kompatibilní úrovní nižší než je úrovně pro veřejné rozvodné sítě (zařízení velmi citlivého na rušení)
- **Třída II:** soustavy se společným napájecím bodem (PCC – point of coummon coupling), napájecím bodem uvnitř závodu (IPC – in-plant point of coupling) a všeobecně v průmyslovém prostředí
- **Třída III:** pouze soustavy s napájecím bodem uvnitř závodu (IPC) v průmyslovém prostředí, některé rušivé jevy vyšší kompatibilní úroveň než třída II. (měniče, svařovací agregáty, rozběh velkých AM)



České vysoké učení technické v Praze
Fakulta elektrotechnická
Katedra elektroenergetiky

Vyšší harmonické a meziharmonické

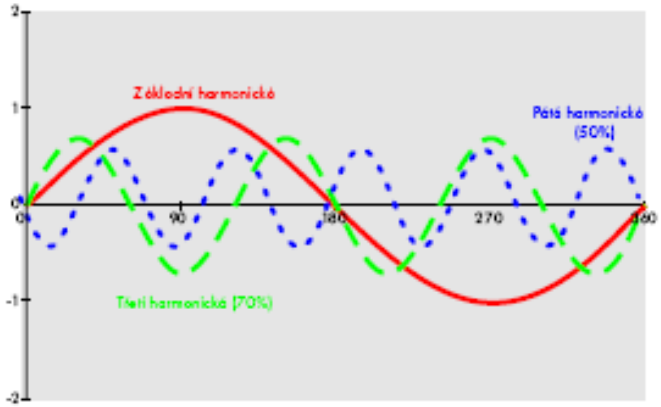
A0M15EZS – Elektrické zdroje a soustavy

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 < 0;T > jednoznačná
  - konečná
  - po částech spojitá
  - musí mít konečný počet maxim a minim
- Fourierova řada periodické funkce f(t) s úhlovým kmitočtem:

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

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

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

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

Fourierova transformace – analytické vyjádření

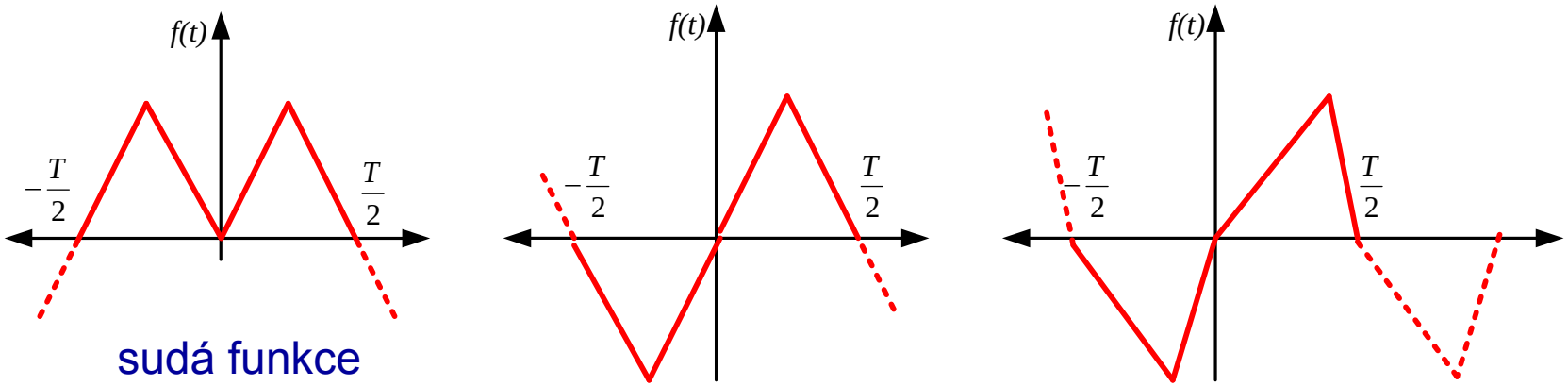
- spektrální tvar Fourierovy řady:

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

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

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

  - C_n…….. amplitudové spektum
  - 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 ± T/2)*



sudá funkce

lichá funkce

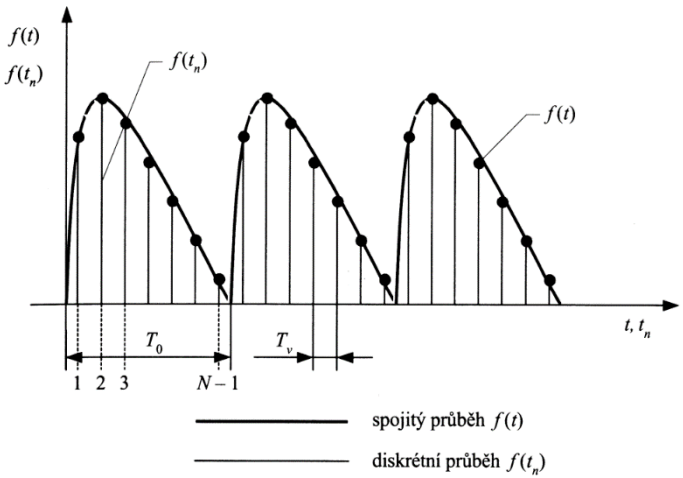
aperiodická funkce

Fourierova transformace – numerické vyjádření

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

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

  - T……doba mezi dvěma vzorky
  - N……počet vzorků za periodu
  - X_k……naměřená hodnota v čase kT



- při výpočtu DFT je počet úměrný N^2 → při velkém počtu N → dlouhá doba výpočtu → 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

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

- efektivní hodnota

definice:

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

<u>hodnocení míry rušení</u>

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

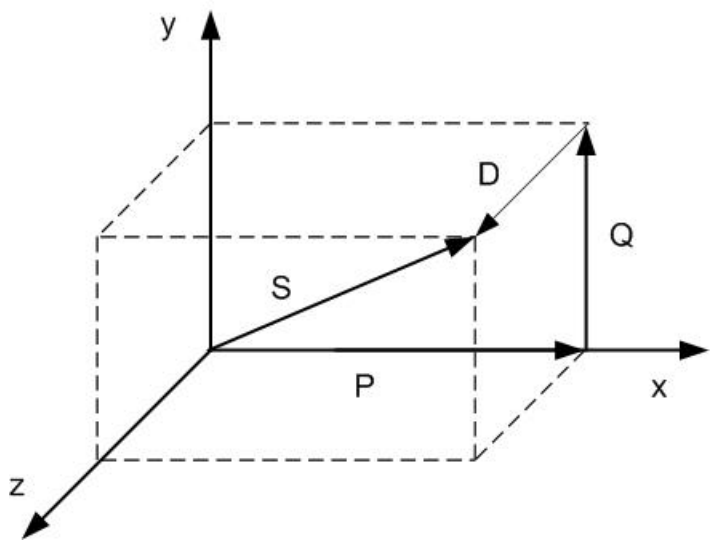
- Zdánlivý výkon: $$S = U.I = \sqrt{\left(U_0^2 + \sum_{k=1}^{\infty} U_k^2\right).\left(I_0^2 + \sum_{k=1}^{\infty} I_k^2\right)}$$

protože $$S^2 \geq P^2 + Q^2$$

- zavádíme deformační výkon *D*:

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

a opravdový účiník:
(Power Factor) $$\lambda = \frac{P}{S} = \cos\varphi_{ekv}$$

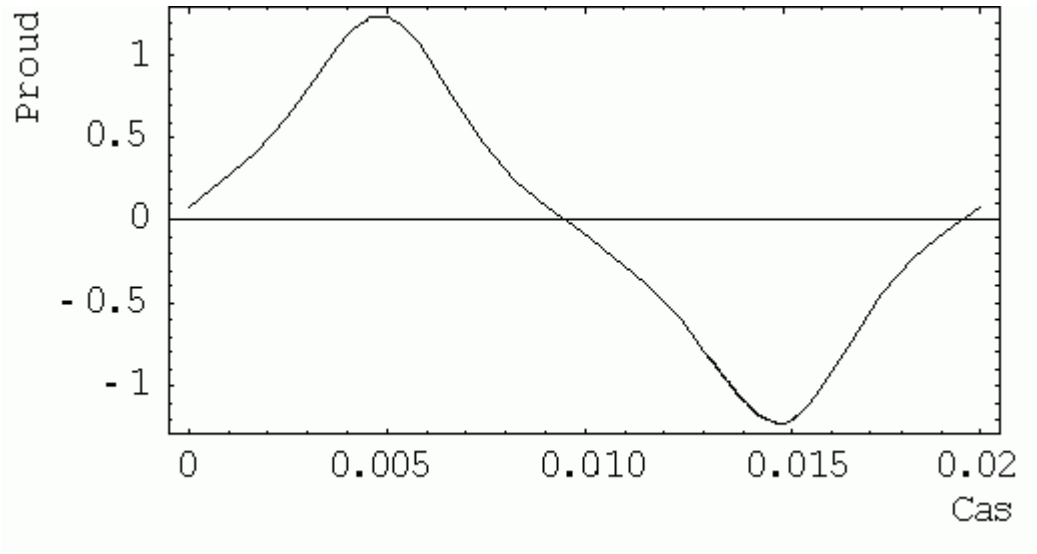


Zdroje vyšších harmonických

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:

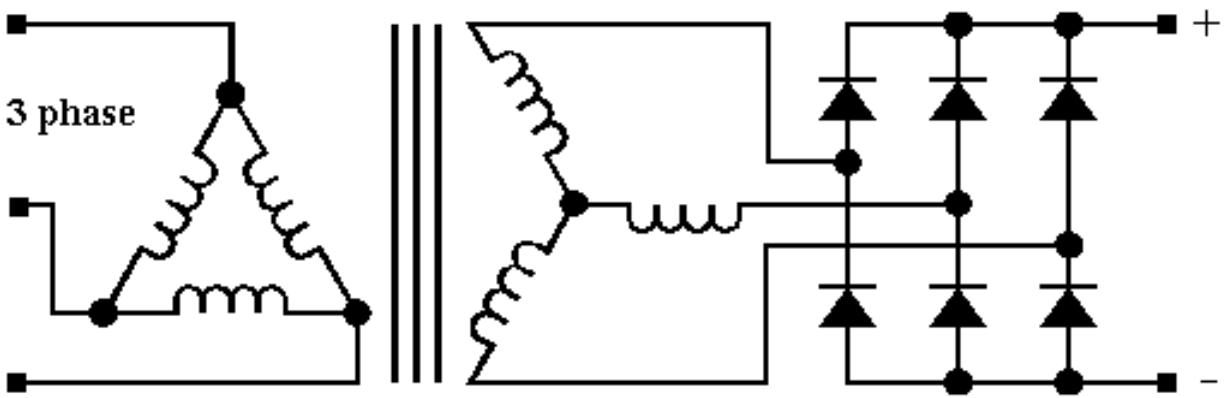


Zdroje vyšších harmonických

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

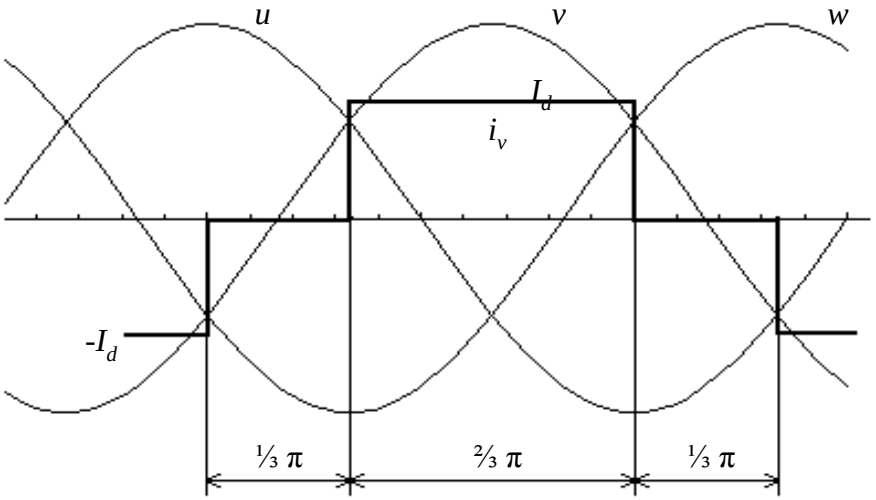
6-pulsní usměrňovač:

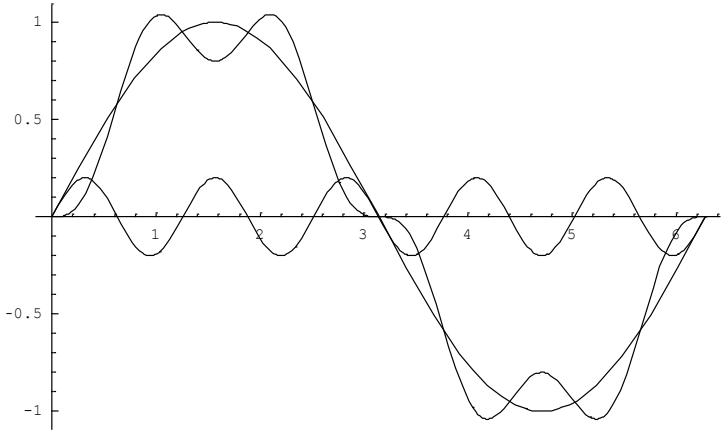


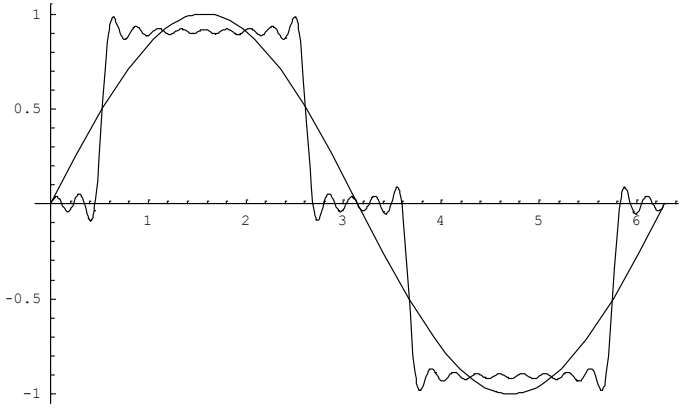
Proud usměrňovačem

proud fáze *v* :

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







$$n = 6k \pm 1$$

Proud usměrňovačem

platí tzv. Amplitudový zákon pro usměrňovač:

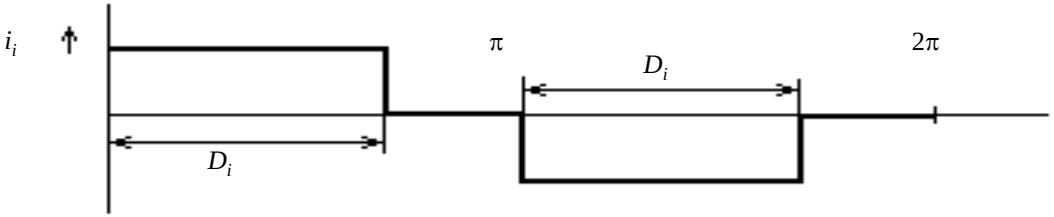
$$\frac{I_n}{I_1} = \frac{1}{n} \quad \text{pro} \quad n = 6k \pm 1$$

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

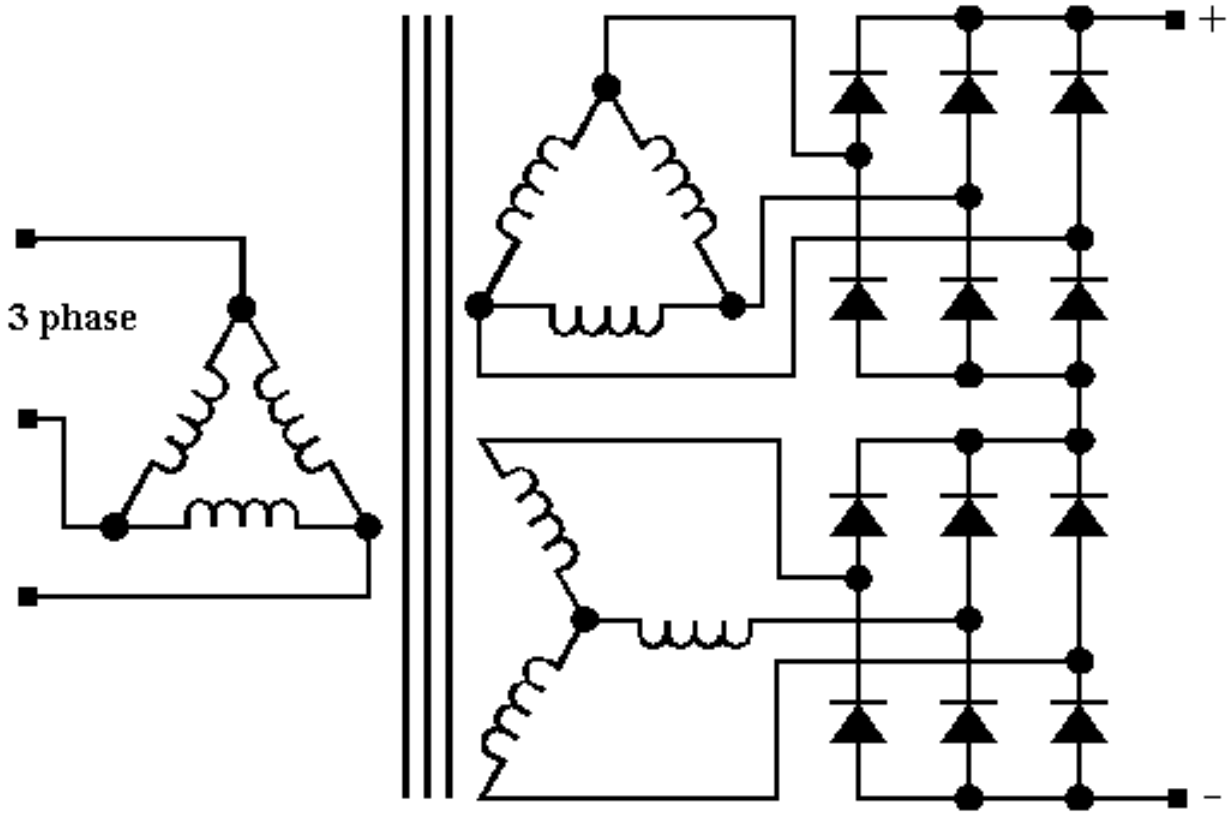
$$\frac{I_n}{I_1} = \frac{1}{\left(n - \frac{5}{n}\right)^{1,2}} \quad \text{pro} \quad n = 6k \pm 1$$

vliv nesymetrie:
je-li usměrňovač napájen nesymetrickým zdrojem napětí, není fázová délka otevření diody 2/3π, ale obecně pro *i*-tou fázi 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



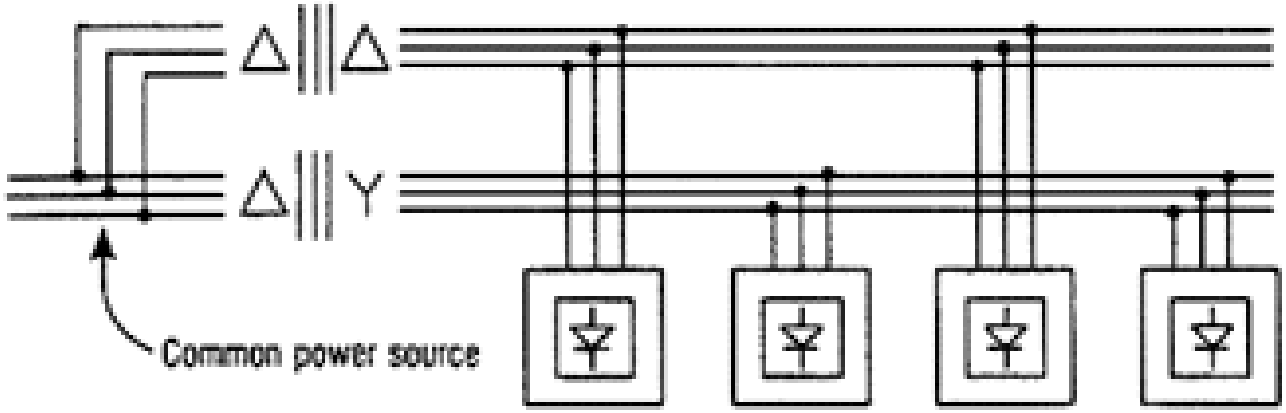
Amplitudový zákon pro 12-pulsní usměrňovač:

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

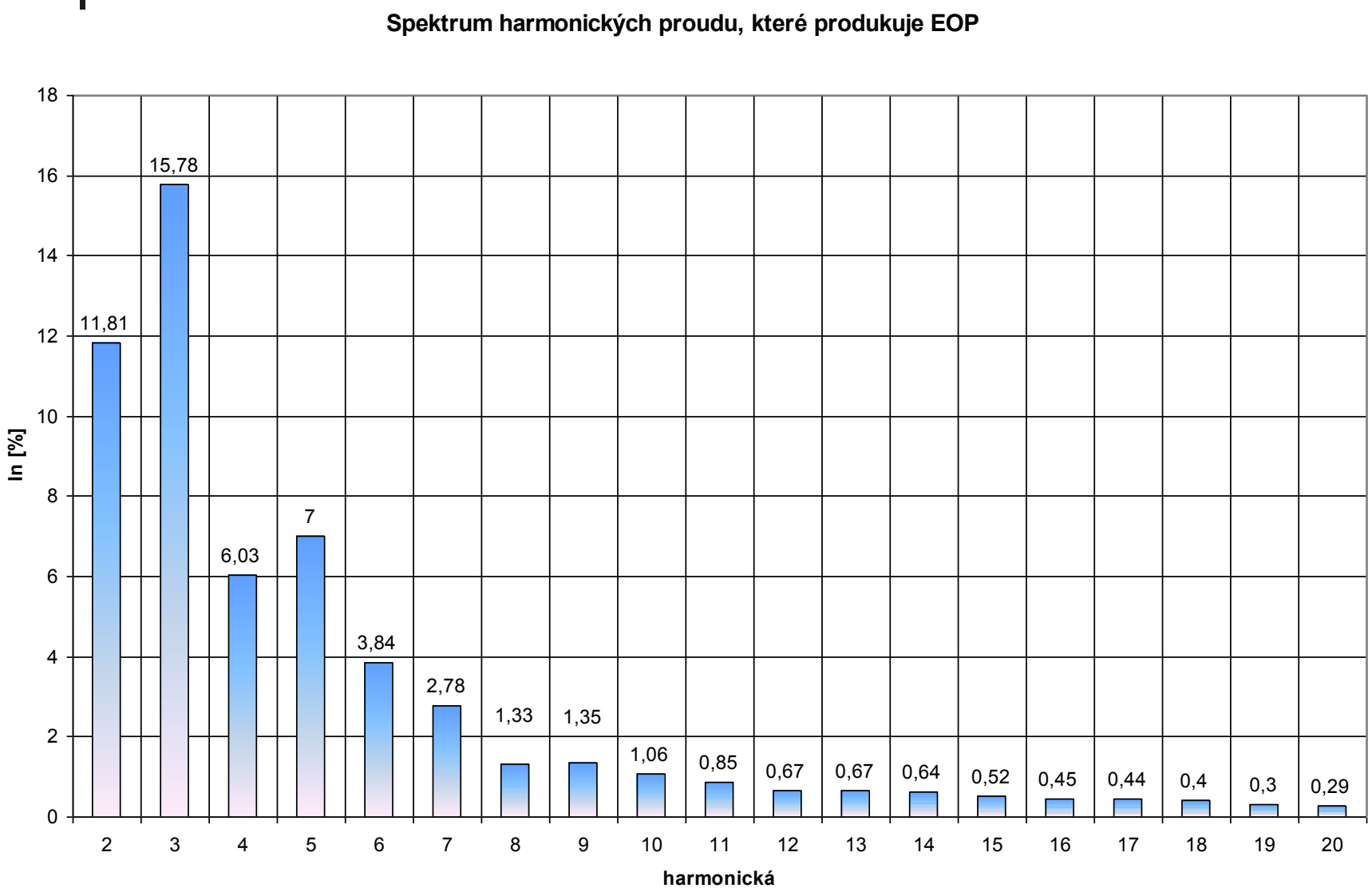
Oblouková pec

c) obloukové pece (OP)

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



Obloukové pece



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)

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

nediagonální prvky $\mathbf{y}_{kl} = \dfrac{1}{\mathbf{z}_{kl}}$ diagonální $\mathbf{y}_{kk} = -\dfrac{1}{\mathbf{z}_{kz}} - \sum_{\substack{i=1 \\ i \neq k}}^{n} \dfrac{1}{\mathbf{z}_{ki}}$

V blokovém vyjádření

$$\begin{bmatrix} [\mathbf{I_g}] \\ [\mathbf{0}] \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} [\mathbf{Y_{gg}}] & [\mathbf{Y_{gz}}] \\ [\mathbf{Y_{zg}}] & [\mathbf{Y_{zz}}] \end{bmatrix} . \begin{bmatrix} [\mathbf{U_g}] \\ [\mathbf{U_z}] \end{bmatrix}$$

Odtud redukovaná matice $[\mathbf{Y_{red}}]$

$$[\mathbf{I_g}] = \left\{ [\mathbf{Y_{gg}}] - [\mathbf{Y_{gz}}].[\mathbf{Y_{zz}}]^{-1}.[\mathbf{Z_{zg}}] \right\}.[\mathbf{U_g}] = [\mathbf{Y_{red}}].[\mathbf{U_g}]$$

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. <u>Výpočet šíření vyšších harmonických od jejich zdroje</u>

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*

$$\begin{bmatrix} \mathbf{Z_{11h}} & & \mathbf{Z_{1zh}} \\ & \dots & \\ \mathbf{Z_{z1h}} & & \mathbf{Z_{zzh}} \end{bmatrix} . \begin{bmatrix} 0 \\ \dots \\ 0 \\ \mathbf{I_{kh}} \\ 0 \\ \dots \\ 0 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \mathbf{U_{1h}} \\ \dots \\ \\ \mathbf{U_{kh}} \\ \\ \dots \\ \mathbf{U_{nh}} \end{bmatrix} = [\mathbf{Z_{zh}}].[\mathbf{I_h}] = [\mathbf{U_h}]$$

Šíření vyšších harmonických v elektrické síti

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

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

Tímto známe všechna uzlová napětí vyšších harmonických v soustavě

$\Rightarrow$ 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

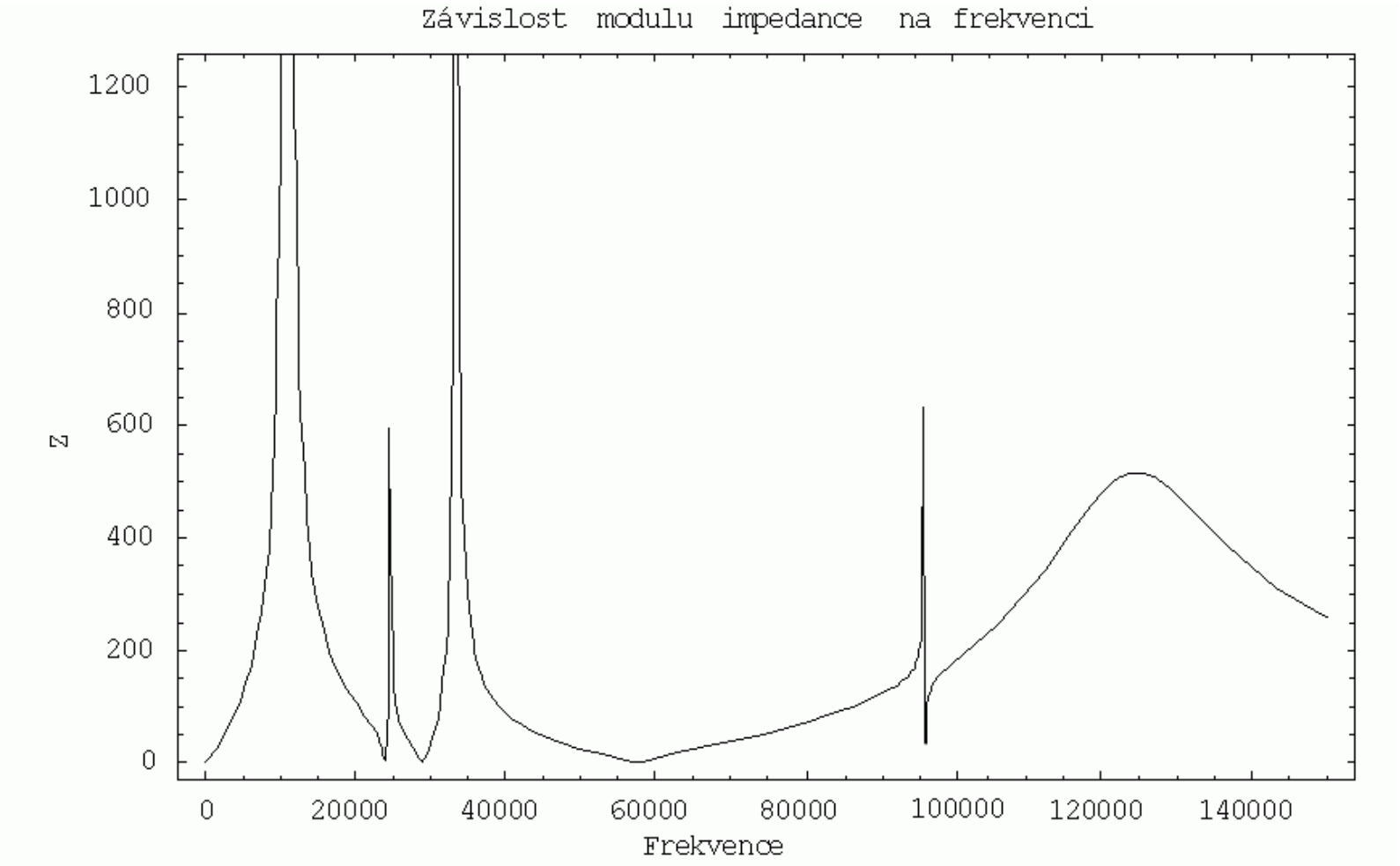
$$\left[\mathbf{Z}_{\mathbf{z}}(\omega)\right] = \left(\left[\mathbf{Y}(\omega)\right]^{-1}\right)_{z\times z}$$

$$\mathbf{Z}_k(\omega) = \left[\mathbf{Z}_{\mathbf{z}}(\omega)\right]_{kk}$$

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

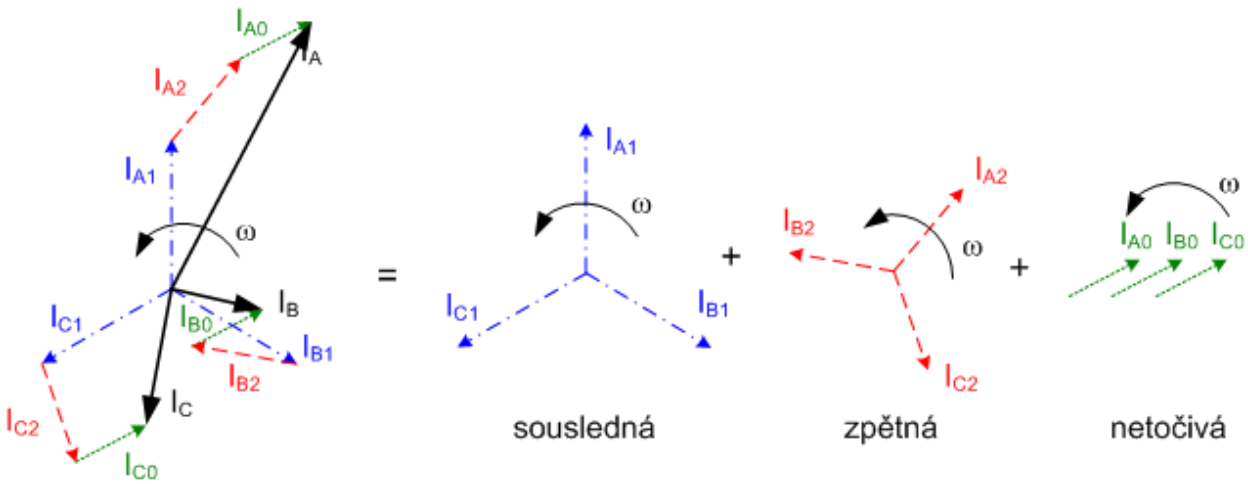
Šíření vyšších harmonických v elektrické síti

Příklad takto zjištěného průběhu (software Mathematica)

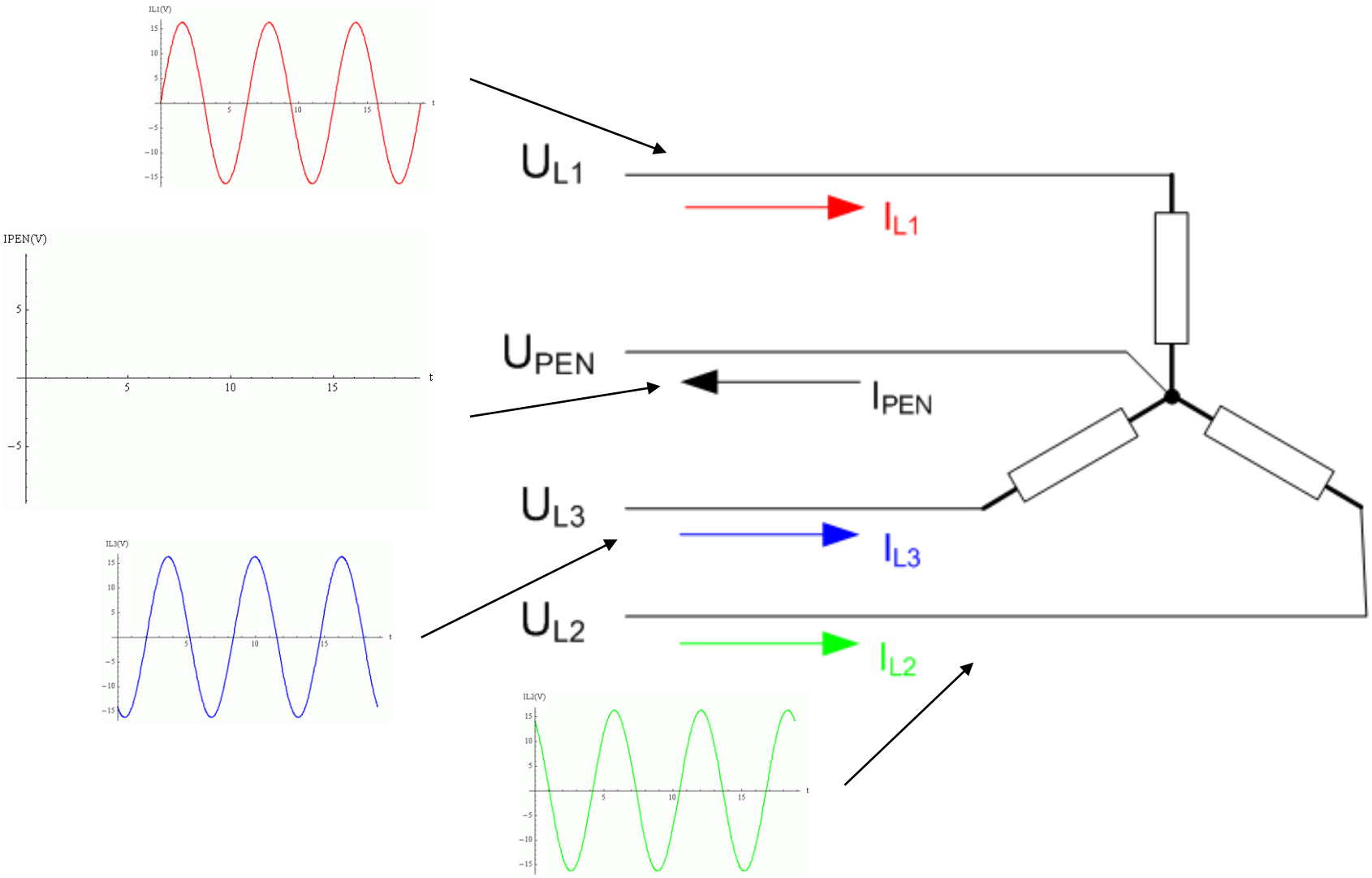


Čím může být způsobeno přetěžování PEN vodiče?

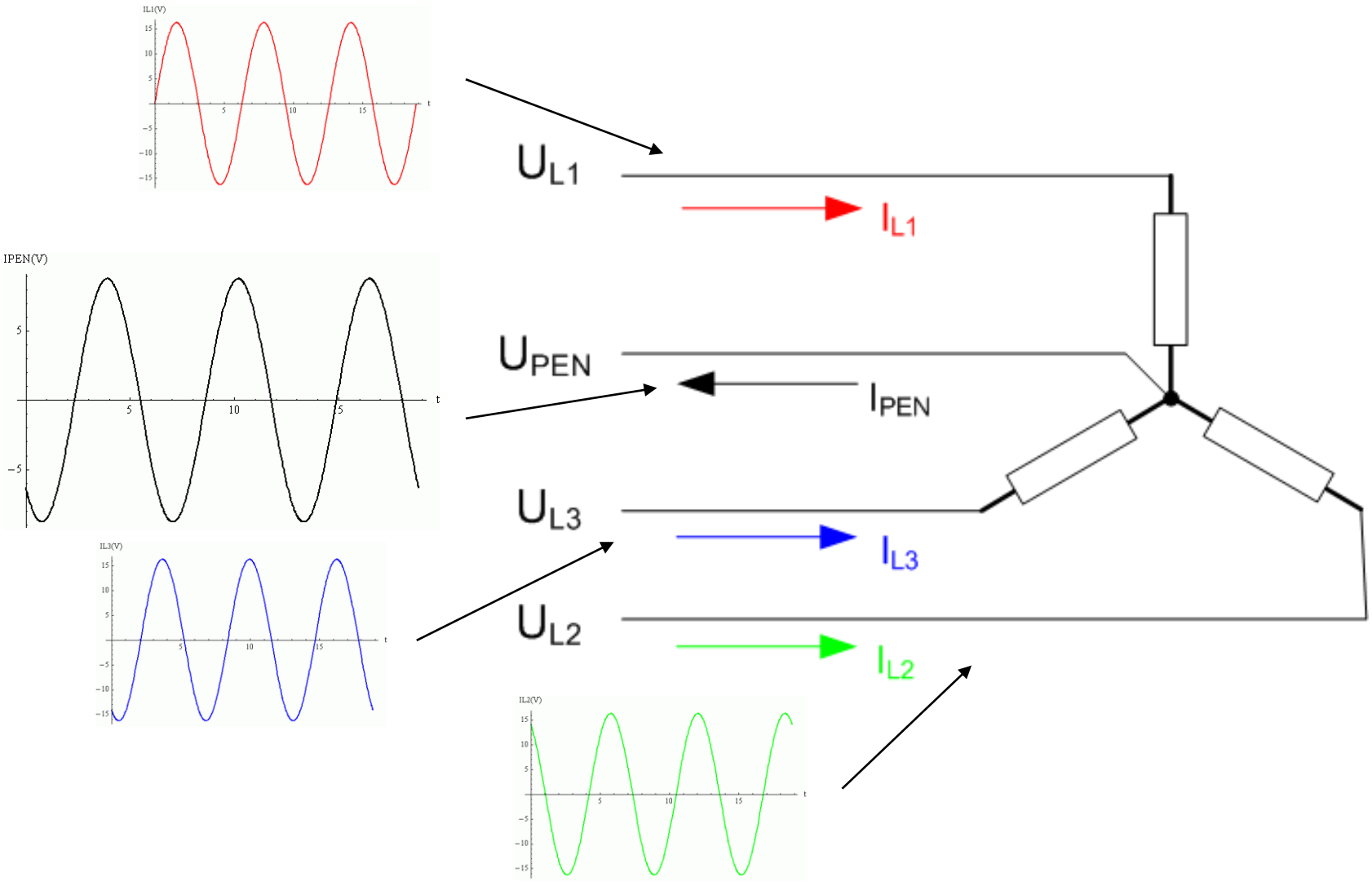
- sousledná složková soustava …….. 3k + 1
- zpětná složková soustava …….. 3k +2
- netočivá složková soustava…….. 3k



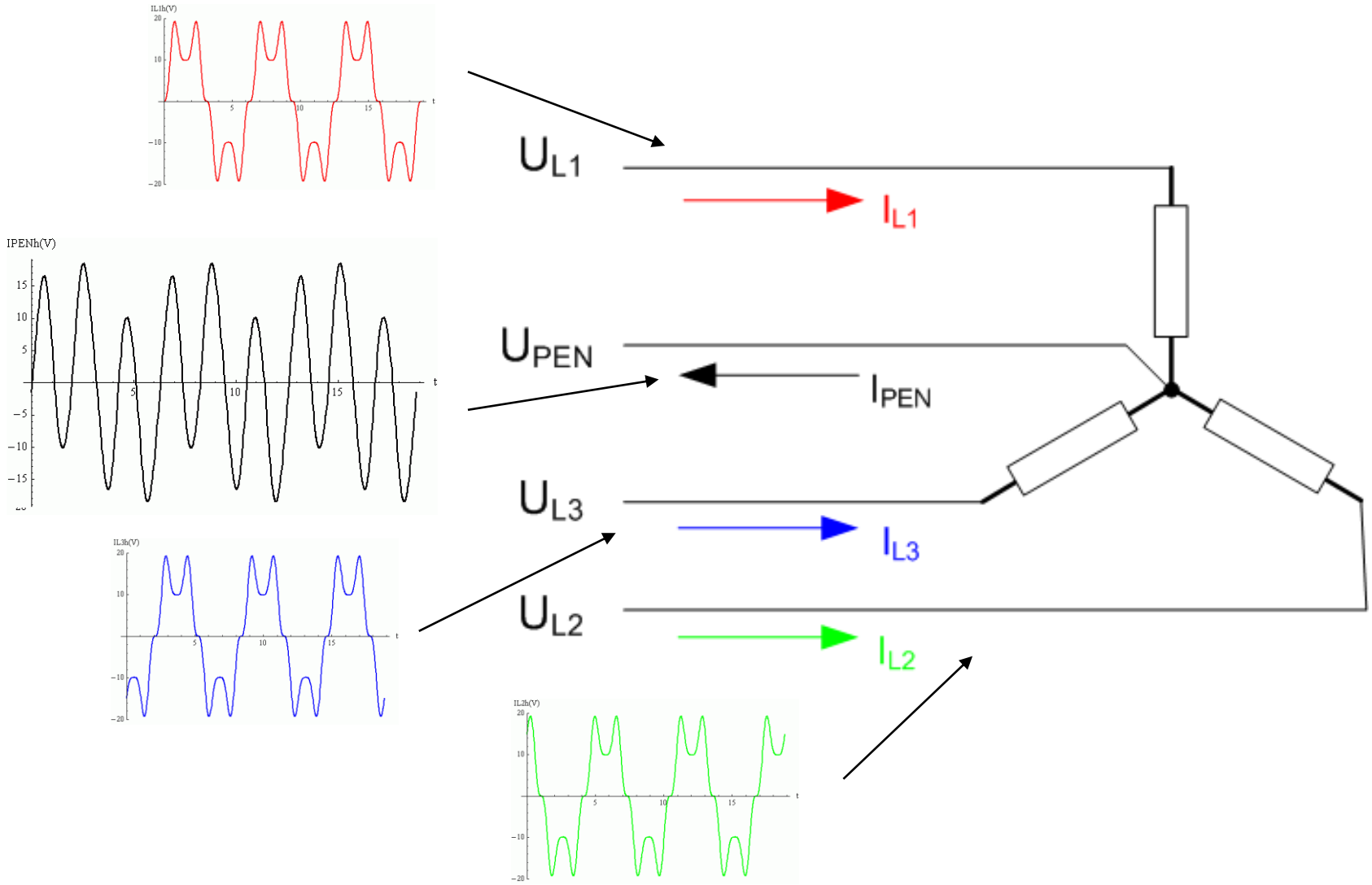
Čím může být způsobeno přetěžování PEN vodiče?



Čím může být způsobeno přetěžování PEN vodiče?



Čím 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 Yd, Ynd … (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

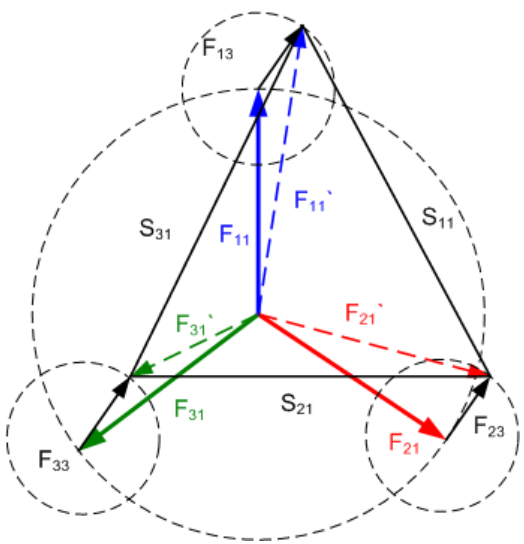
- bez přídavného zařízení (různé druhy zapojení měničů)
- s přídavným zařízením (pasivní a aktivní filtry)

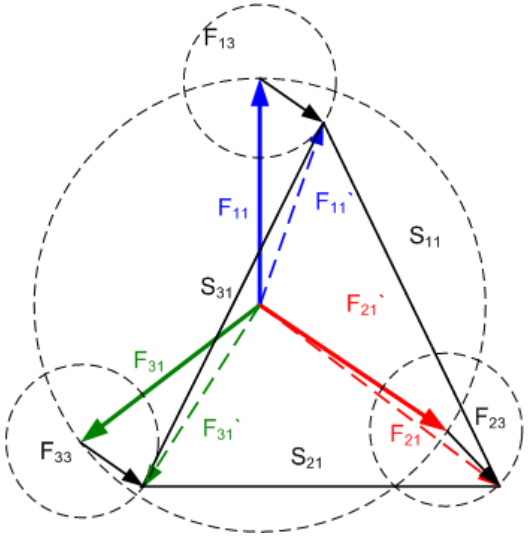
Třetí harmonická 1

- nesymetrická třífázová soustava => rozložení do složkových soustav (sousledná, 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 fázi vůči průběhu základní harmonické



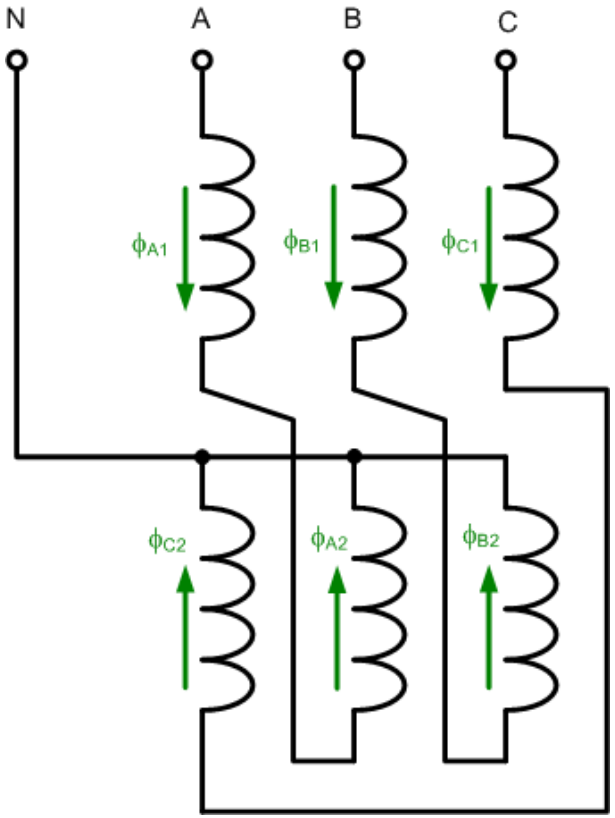


Nejčastější výskyt

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

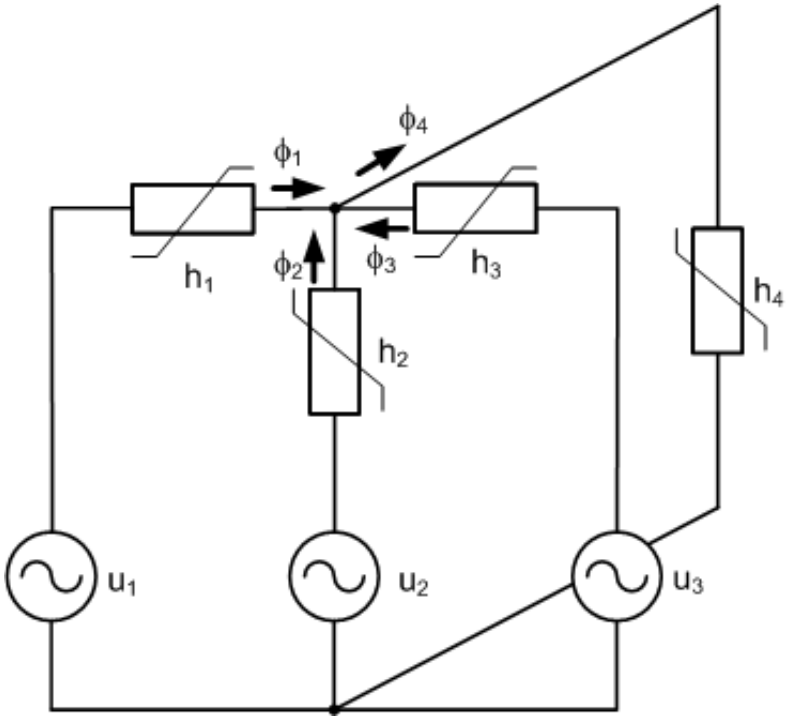
Omezení 3. harmonické

- 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 zádrž
- 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)

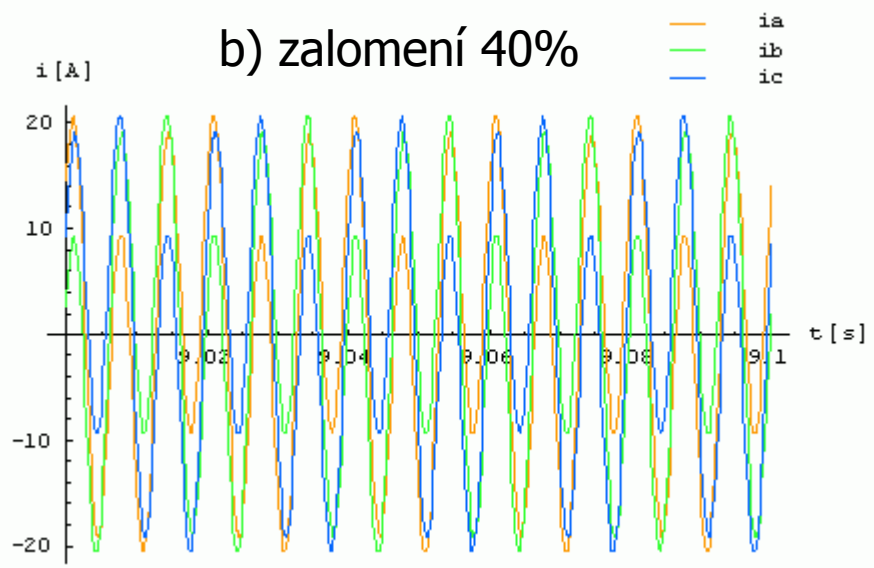


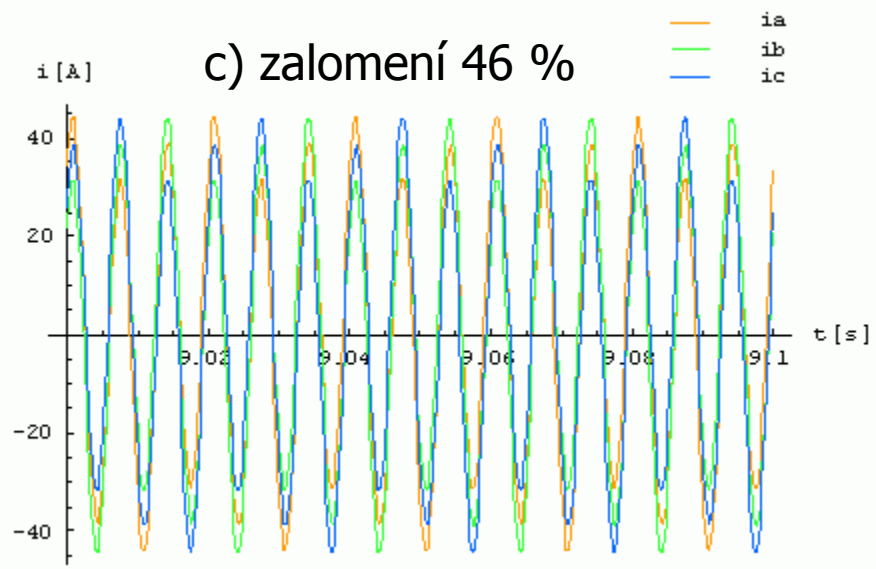
Model ZigZag tlumivky

- 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

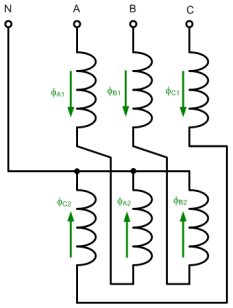


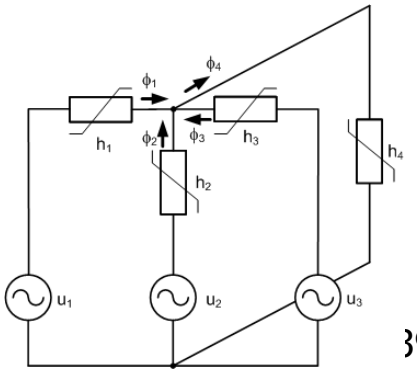
Symetrické napájení – proud vinutím





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

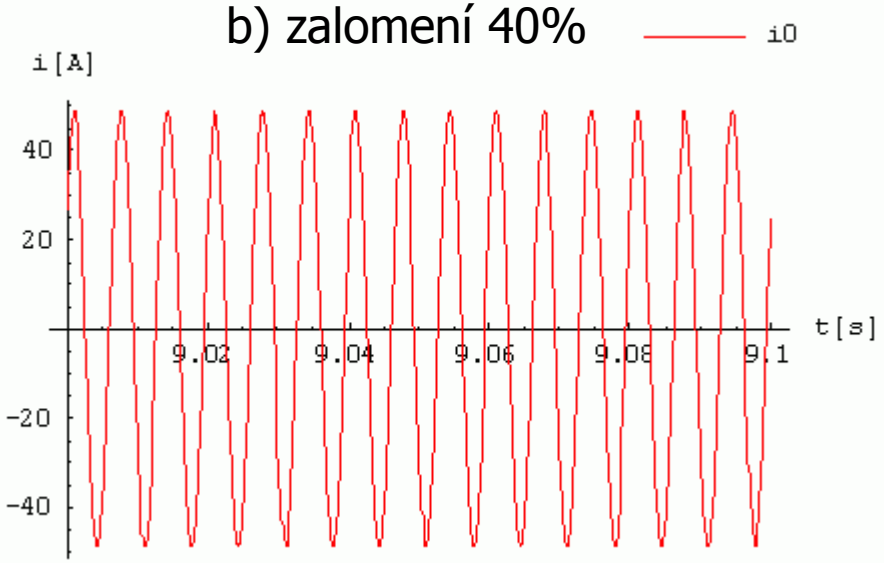




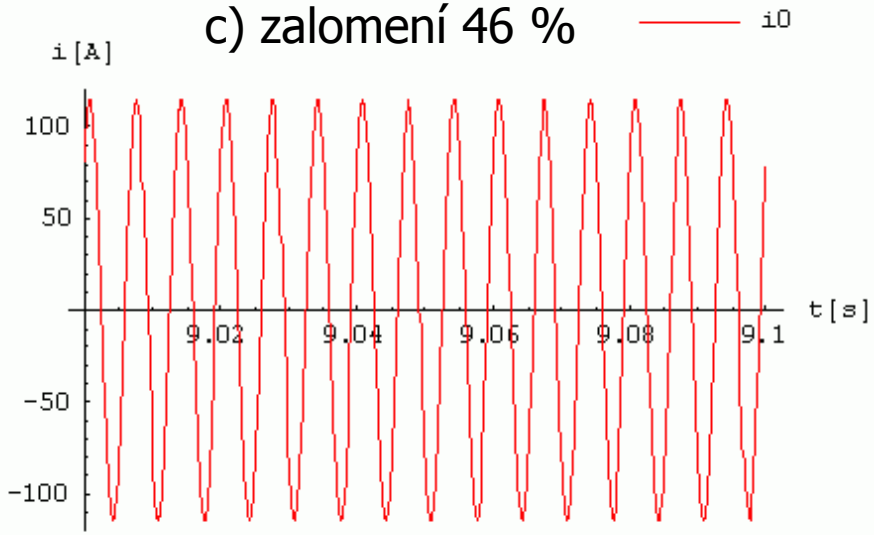
Symetrické napájení – proud v uzlu

a) bez zalomení

b) zalomení 40%



c) zalomení 46 %

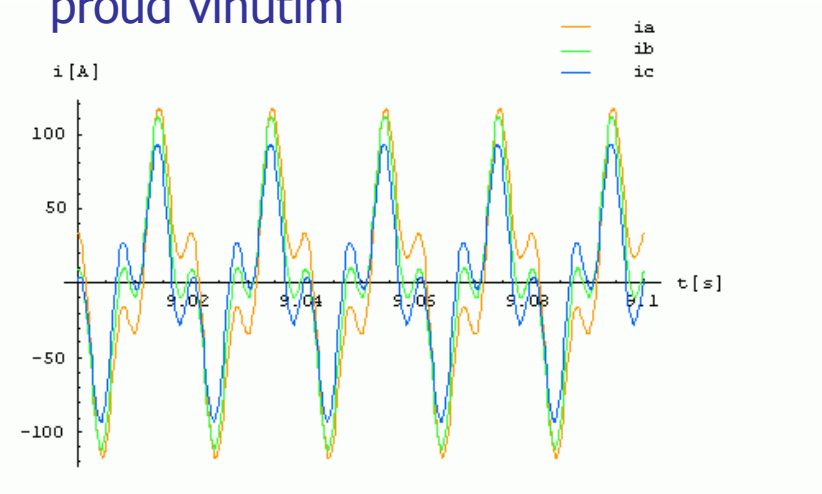


- při změně zalomení vinutí dochází ke zvýšení proudu v uzlu, což je způsobené zmenšením reaktance netočivé složky

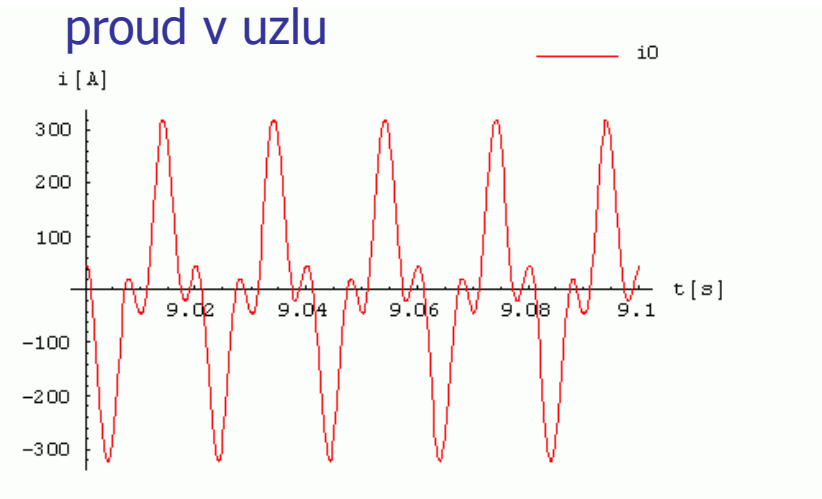
Nesymetrické napájení (zalomení 46 %)

- a) nesymetrie magnetického jádra (0,2 / 1 / 1,428 / 0,1) – Rmag1,2,3,0

proud vinutím



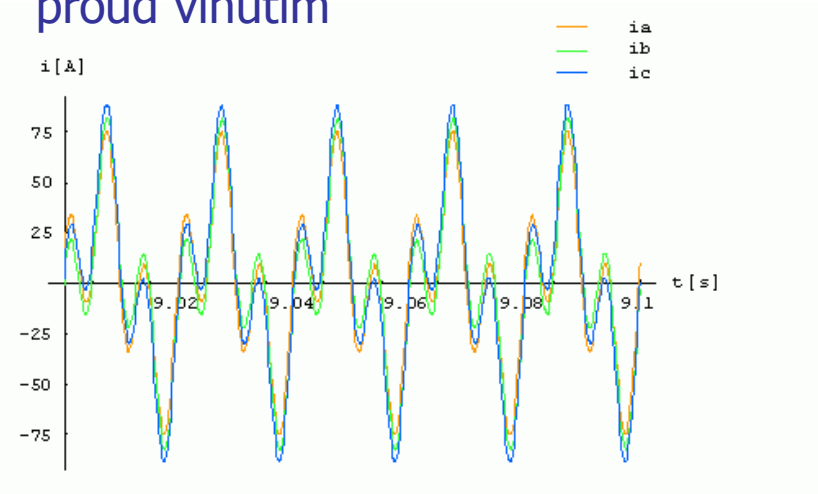
proud v uzlu



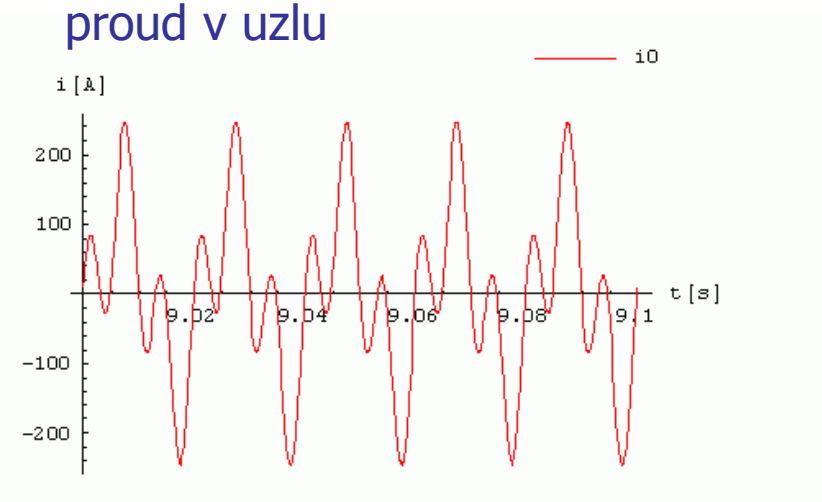
Nesymetrické napájení (zalomení 46 %)

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

proud vinutím



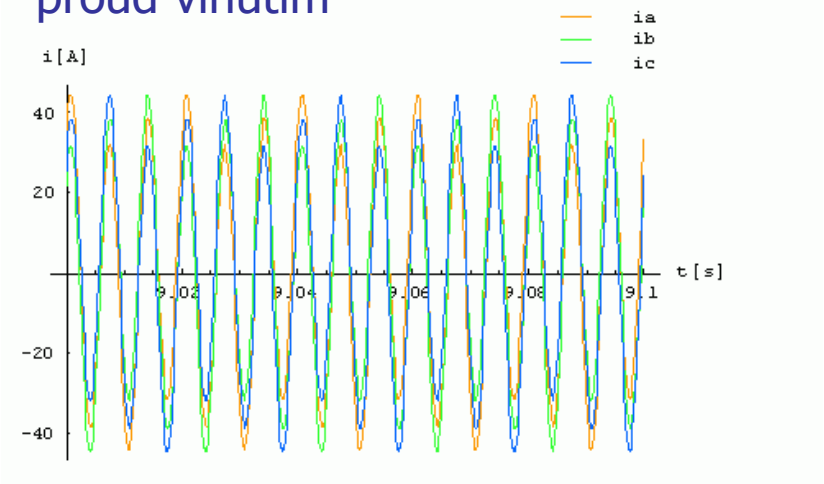
proud v uzlu



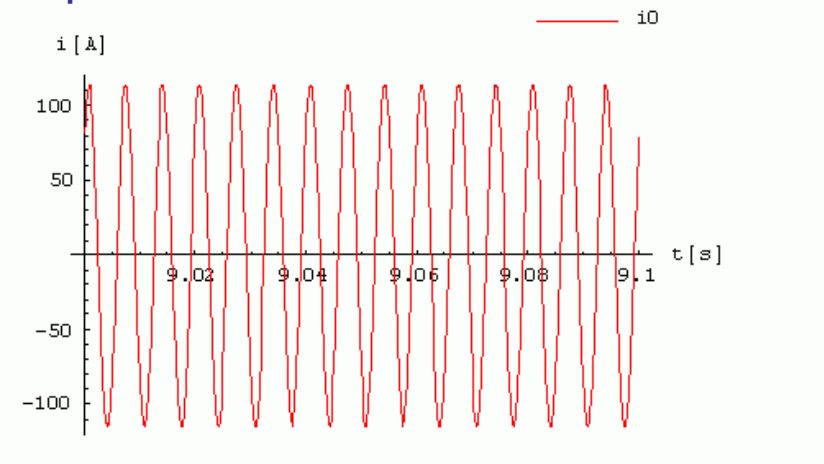
Nesymetrické napájení (zalomení 46 %)

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

proud vinutím



proud v uzlu

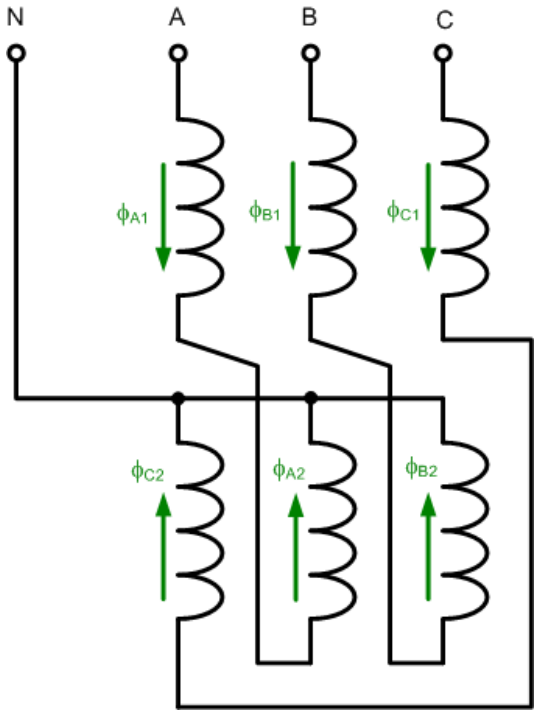


Simulace provedené na ZigZag tlumivce

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 proudu 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 = síťový 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	$f = h * f_1 \quad [Hz]$	$h < 1$
Stejnosměrný 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:

$$U = \sqrt{\frac{1}{T}\int_0^T u(t)^2\, dt} \qquad \mathrm{T} = \frac{1}{\mathrm{f}_1}$$

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

Matematický model

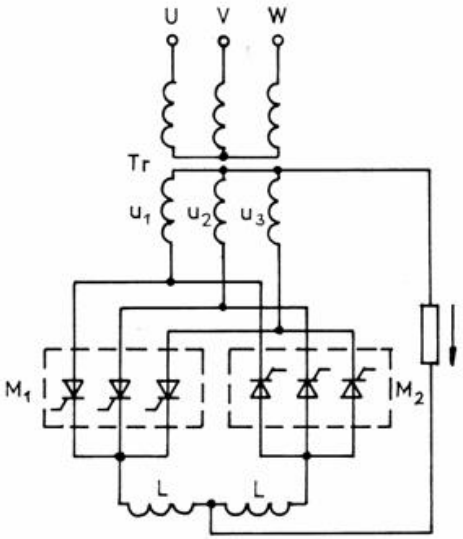
- největší změna napětí neharmonického průběhu napětí pak odpovídá amplitudě přičítané interharmonické
- efektivní hodnota veličiny je závislá na amplitudě i fázi interharmonické frekvence
- největší vliv na deformaci křivky mají nižší hodnoty kmitočtu
- hraniční bod mezi frekvencemi s výraznými a menšími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

- harmonické kmitočty se nepodílejí na této změně napětí

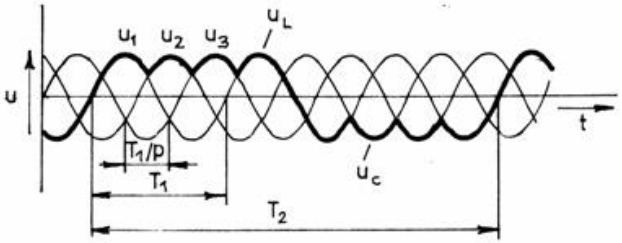
Zdroje meziharmonických

Cyklokonvertor

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



a)



b)

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

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 monitorovaní lze využít diskrétní Fourierovu transformaci DFT

$$\Delta f = f_w = \frac{1}{T_w} = \frac{1}{NT_S} = \frac{f_S}{N} \cong \frac{f_{fund}}{K}$$

T_w …šířka časového okna DFT
f_s …vzorkovací frekvence
N …počet vzorků v časovém okně
f_{fund} …základní harmonická (síťový kmitočet)
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_{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 snižováním 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_μ = 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