



Kvalita elektrické energie



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 **měřítko 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

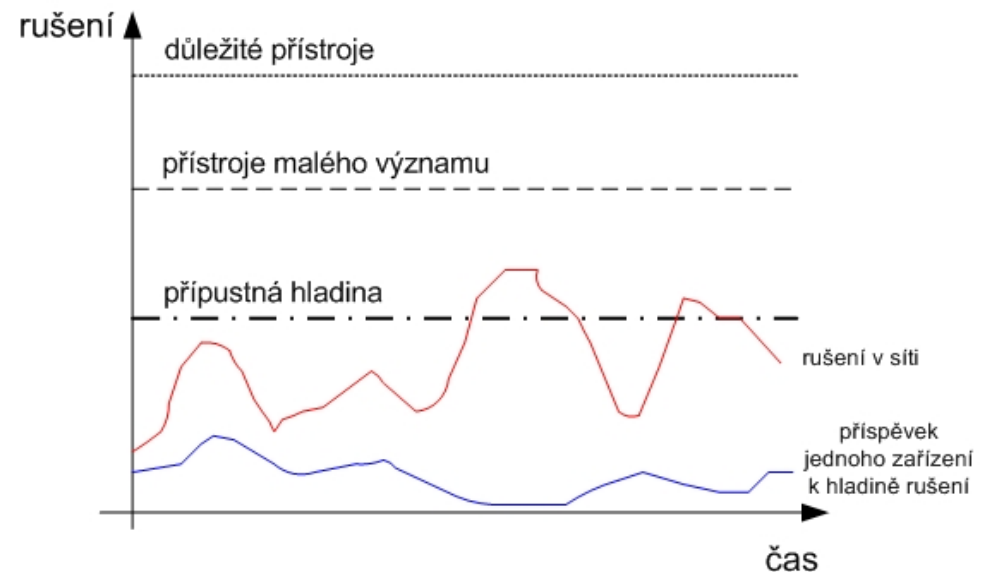
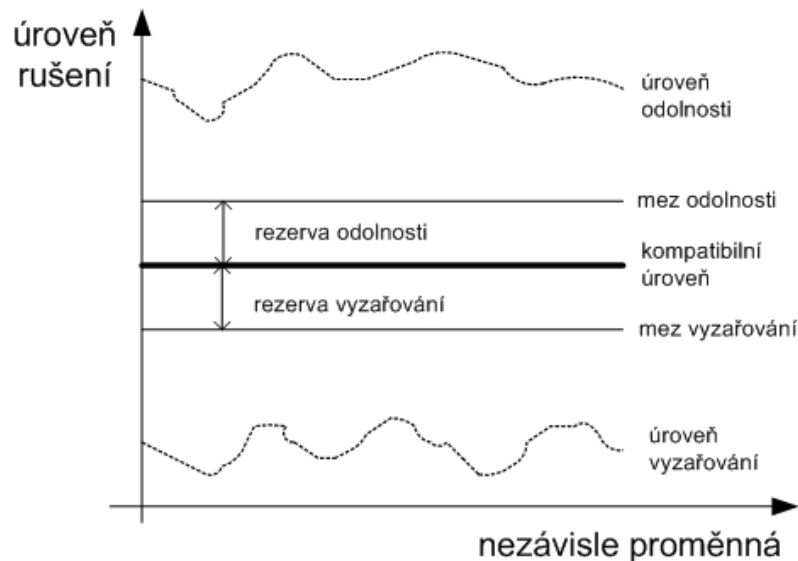


Elektromagnetická kompatibilita

- pro posouzení rušivých vlivů je nutné stanovit:
 - do jaké míry smí být zařízení zdrojem rušení
 - jakému rušení musí být zařízení odolné
- za elektromagnetické **rušení** se 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
- 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 nepřijatelného rušení čehokoliv v tomto prostředí.*
(z normy ČSN IEC 1000-2-1)



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



Vyšší harmonické a meziharmonické



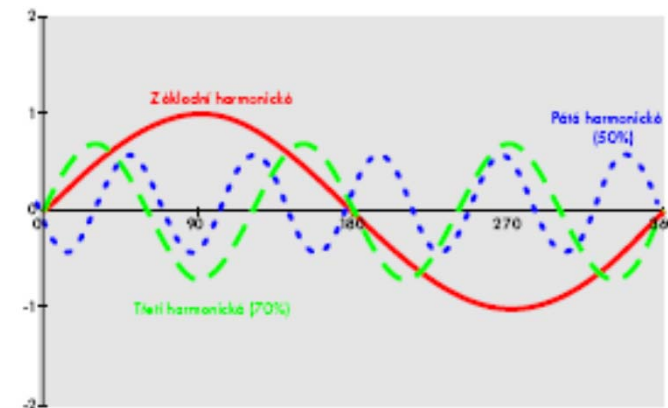
Definice a zdroje vyšších harmonických

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 řada – analytické vyjádření

- harmonické průběhy lze vyjádřit **nekonečnou řadou** složenou z konstanty a harmonických veličin o kmitočtech rovných celočíselným 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:

$$f(t) = \frac{A_0}{2} + \sum_{n=1}^{\infty} A_n \cos(n\omega t) + \sum_{n=1}^{\infty} B_n \sin(n\omega t)$$
$$A_0 = \frac{2}{T} \int_0^T f(t) dt$$
$$A_n = \frac{2}{T} \int_0^T f(t) \cdot \cos(n\omega t) dt \quad \text{pro } n = 0, 1, 2, 3, \dots$$
$$B_n = \frac{2}{T} \int_0^T f(t) \cdot \sin(n\omega t) dt \quad \text{pro } n = 1, 2, 3, \dots$$



Fourierova řada – analytické vyjádření

- spektrální tvar Fourierovy řady:

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

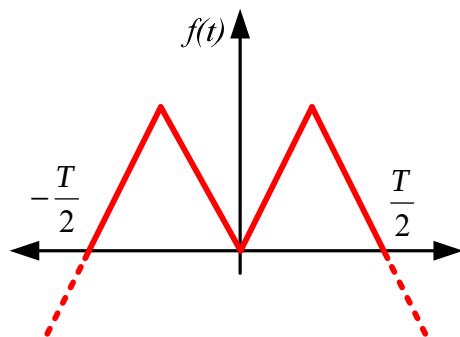
- C_n amplitudové spektrum
- φ_n fázové spektrum

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

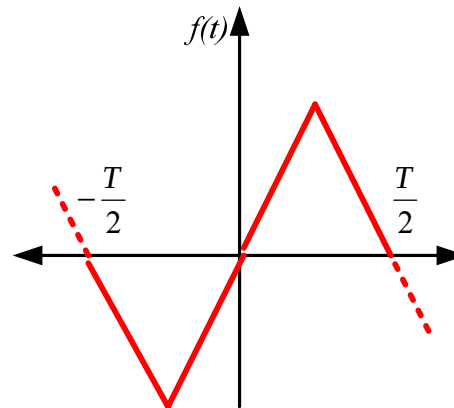
$$\varphi_n = \operatorname{arctg} \frac{B_n}{A_n}$$

- v praxi mnohé funkce splňují vlastnosti:

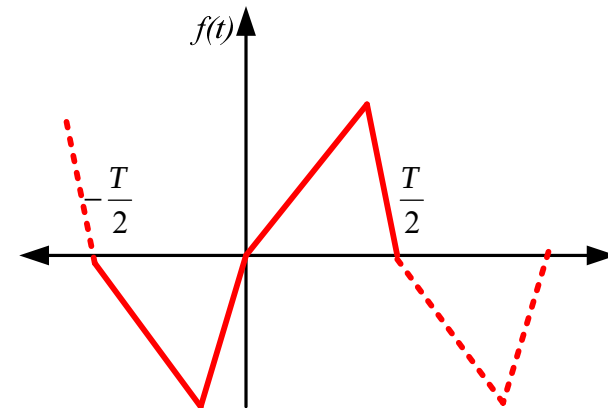
- pro sudou funkci platí $f(-t) = f(t)$ (řada obsahuje pouze cosinové členy)
- pro lichou funkci $f(-t) = -f(t)$ (řada obsahuje pouze sinové členy)
- další funkce mohou být aperiodické $f(t) = -f(t \pm T/2)$



sudá funkce



lichá funkce



aperiodická funkce

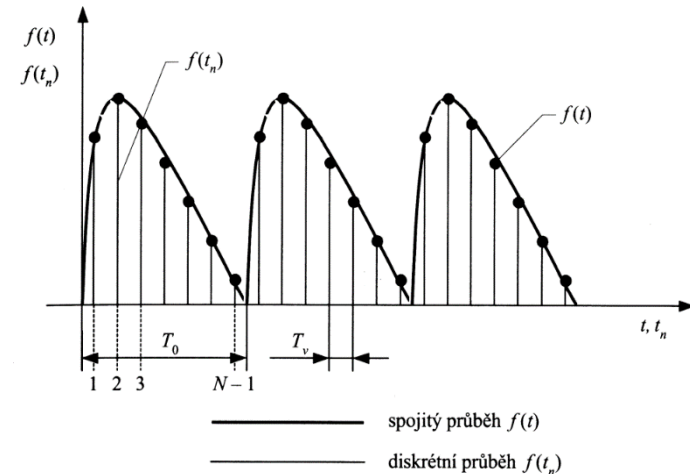


Fourierova transformace – numerické vyjádření

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

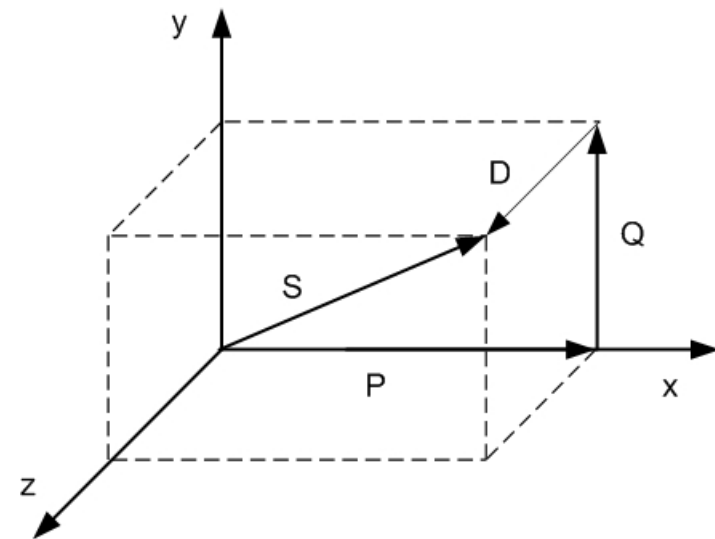
protože $S^2 \geq P^2 + Q^2$

- zavádíme deformační výkon D :

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

a opravdový účíník:
(Power Factor)

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





Zdroje vyšších harmonických

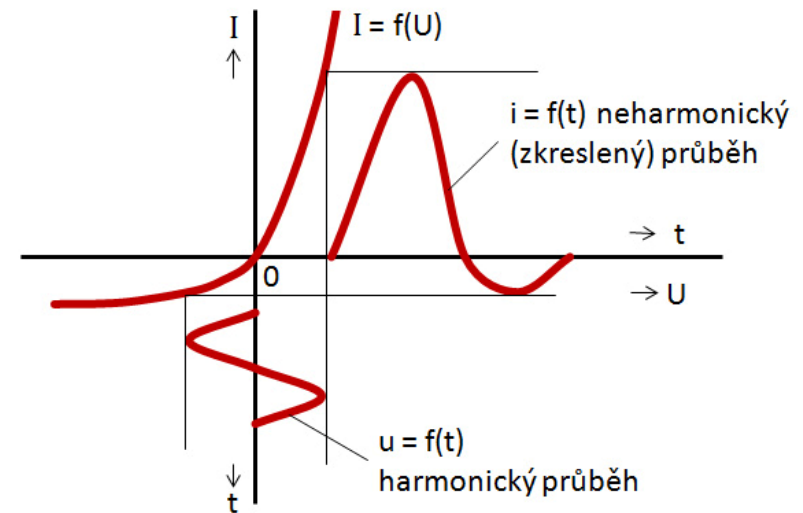
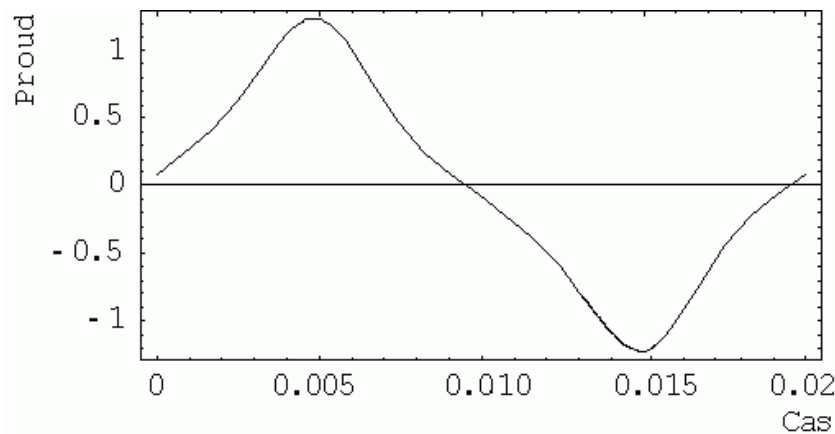
1. Zdroje vyšších harmonických napětí

- 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:



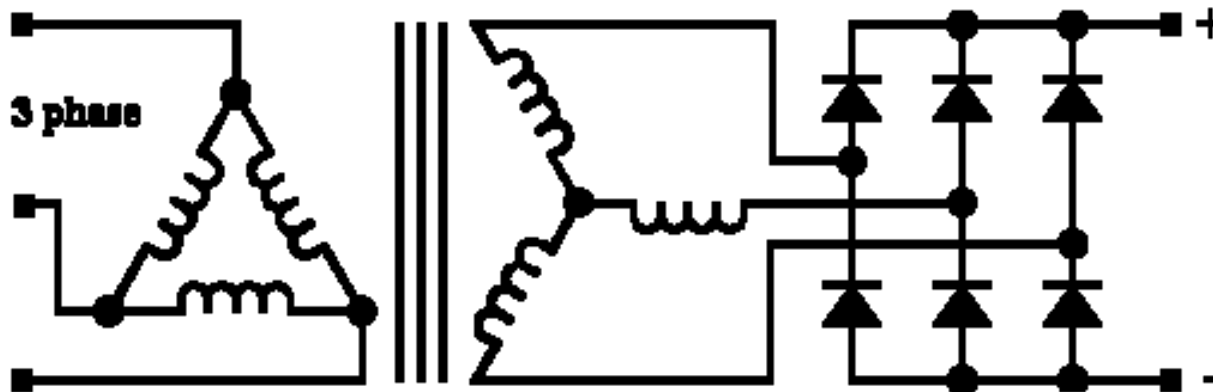


Zdroje vyšších harmonických

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:

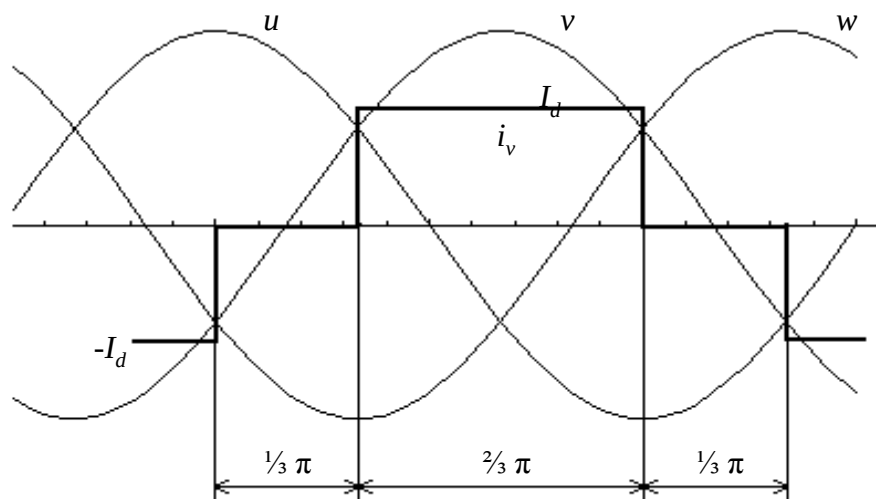




Proud usměrňovačem

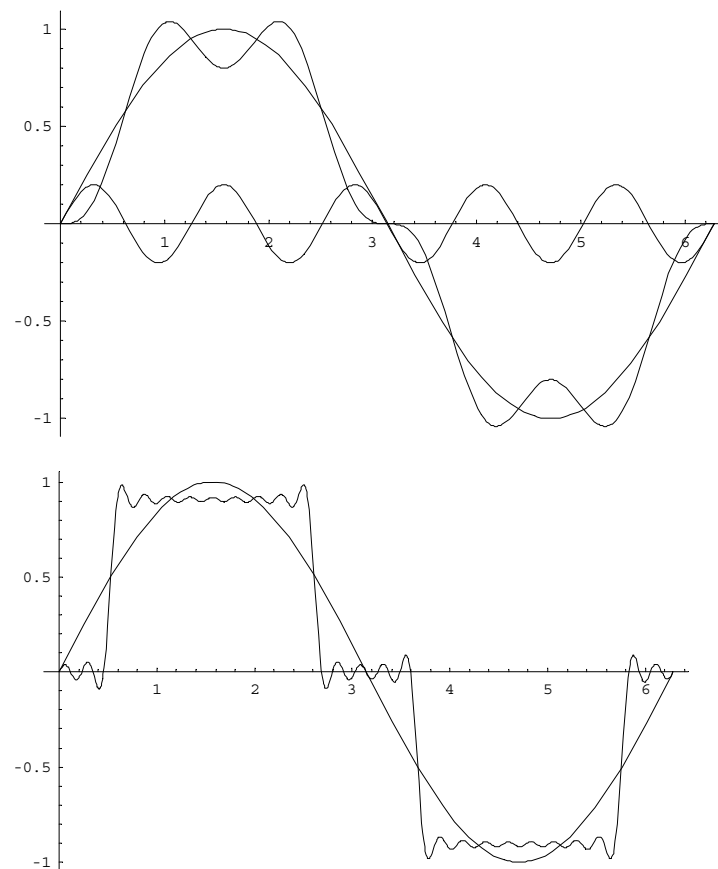
proud fáze v :

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



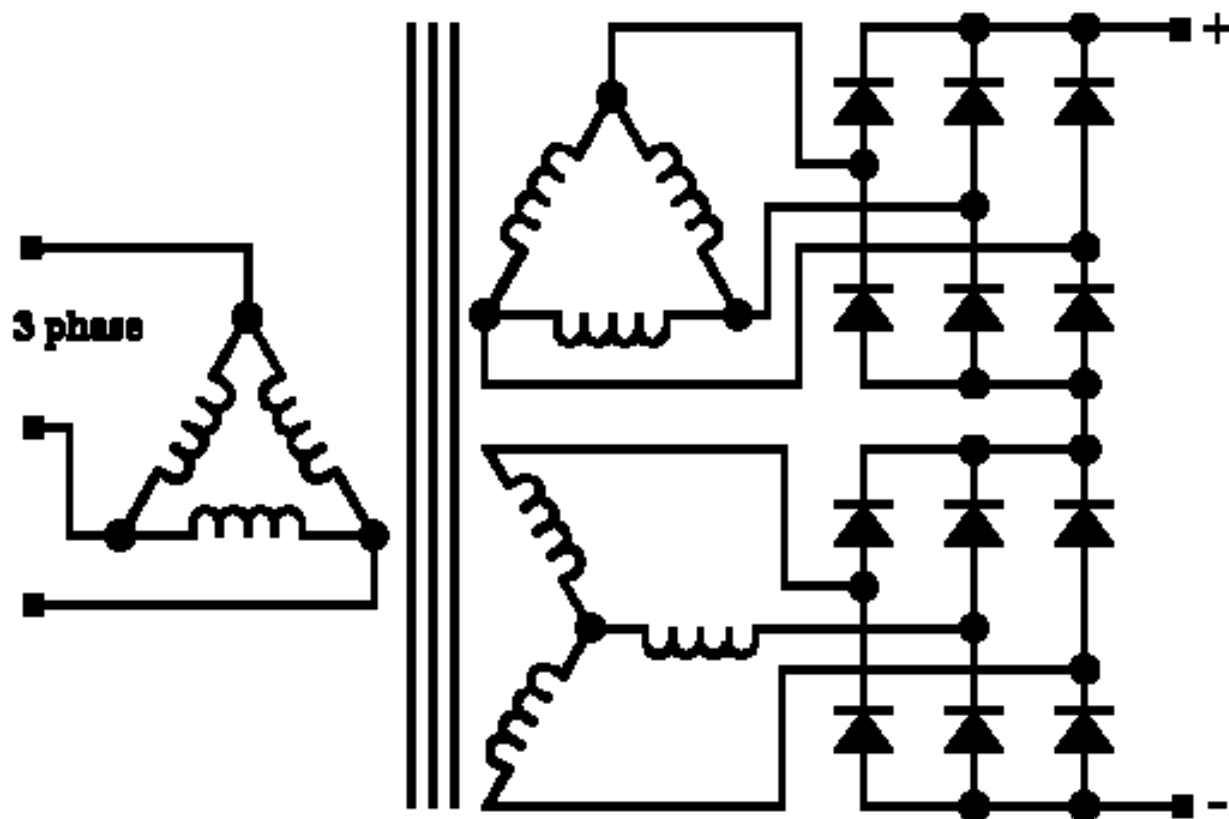
platí tzv. Amplitudový zákon pro usměrňovač:

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





12 – pulsní usměrňovač



Amplitudový zákon pro 12-pulsní usměrňovač:

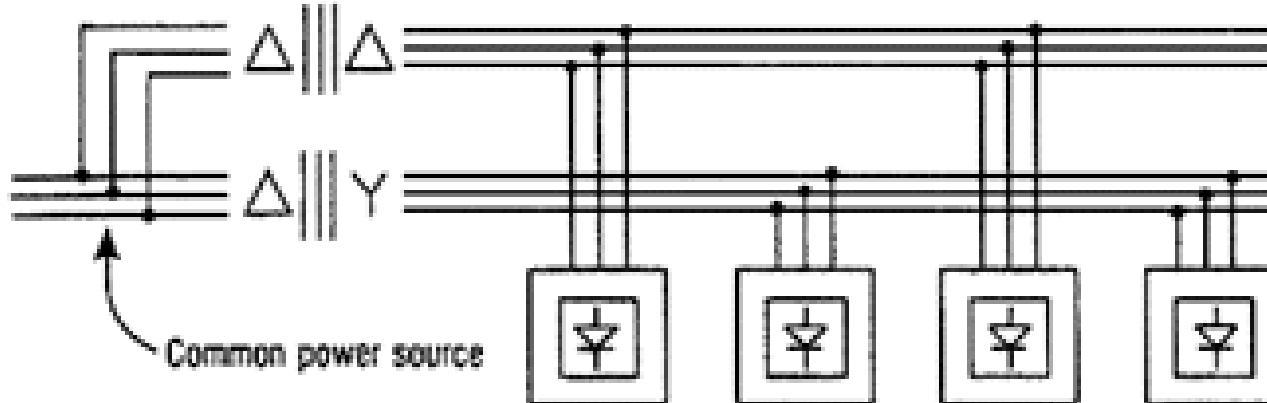
$$\frac{I_n}{I_1} = \frac{1}{n} \quad \text{pro} \quad n = 12k \pm 1$$



Oblouková pec

c) obloukové pece (OP)

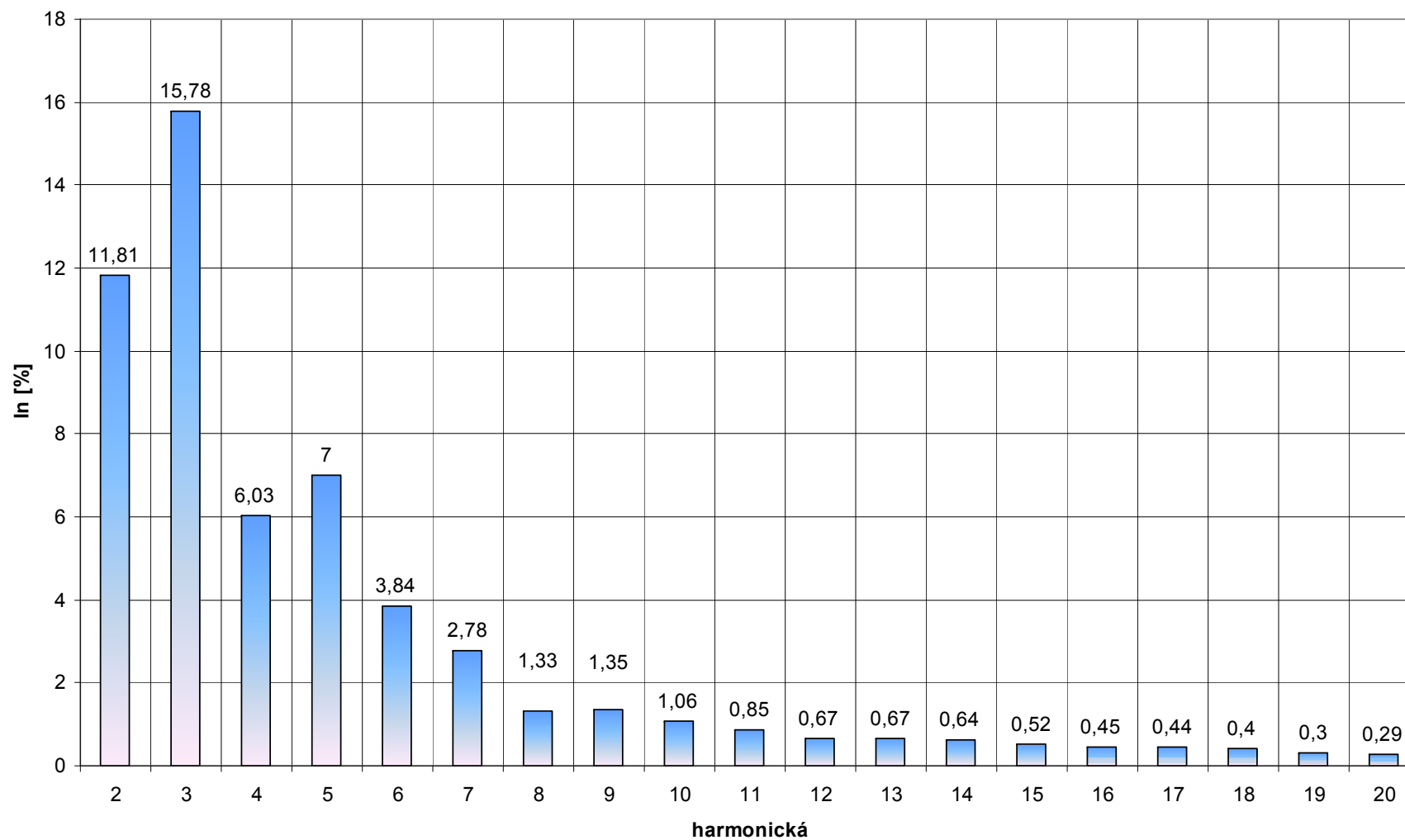
- nejhůře znečišťují sinusový průběhu
- produkují:
 - vyšší harmonické (liché i sudé !)
 - nesymetrie
 - subharmonické





Obloukové pece

Spektrum harmonických proudů, které produkuje EOP





Šíření vyšších harmonických v elektrické síti

Výpočet šíření vyšších harmonických od jejich zdroje

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

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

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

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

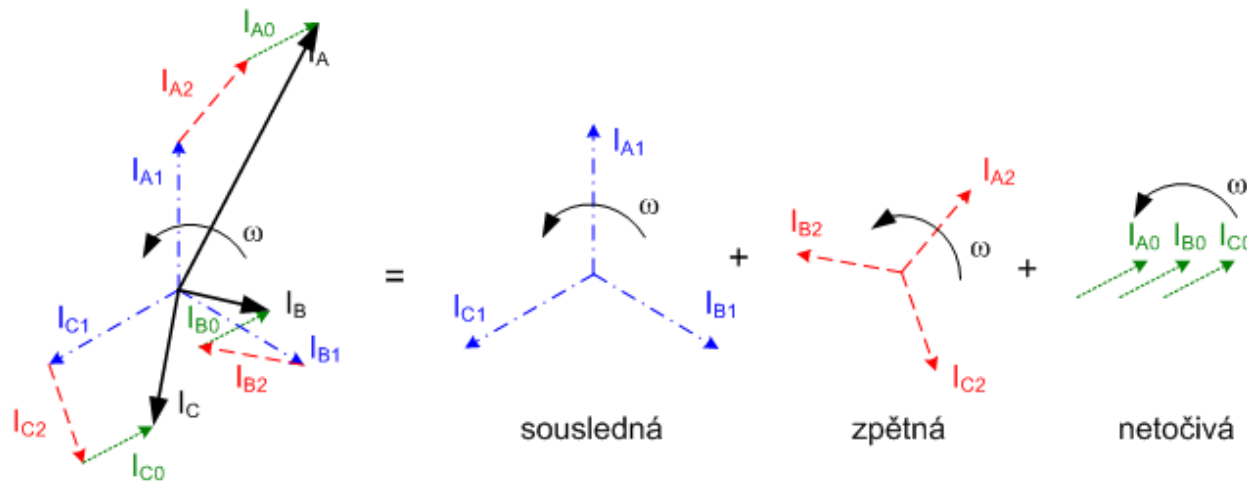
Tímto známe všechna uzlová napětí vyšších harmonických v soustavě

⇒ Porovnáme s normou a zjistíme jestli nejsou překročené limity



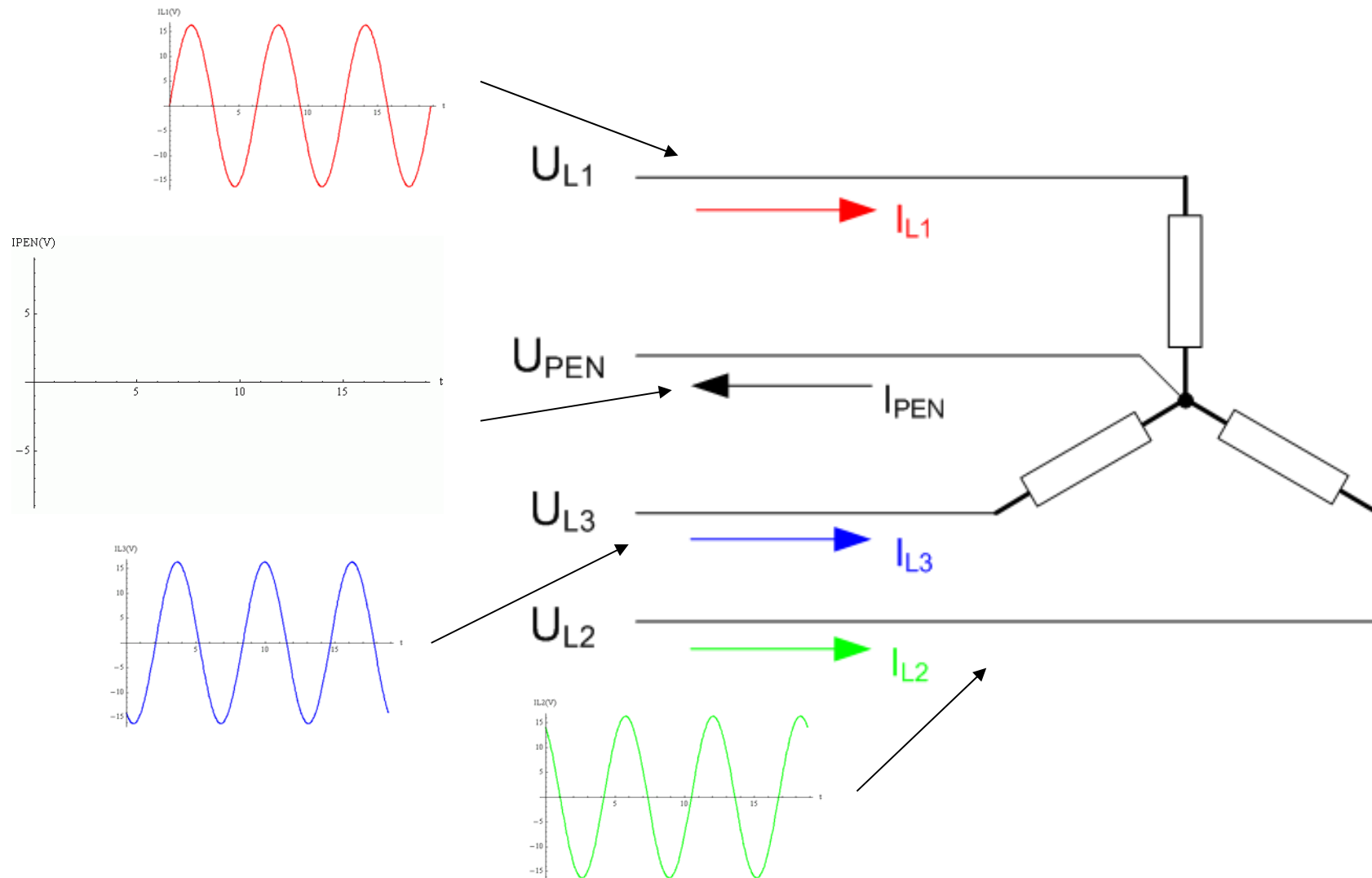
Čím může být způsobeno přetěžování PEN vodiče?

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



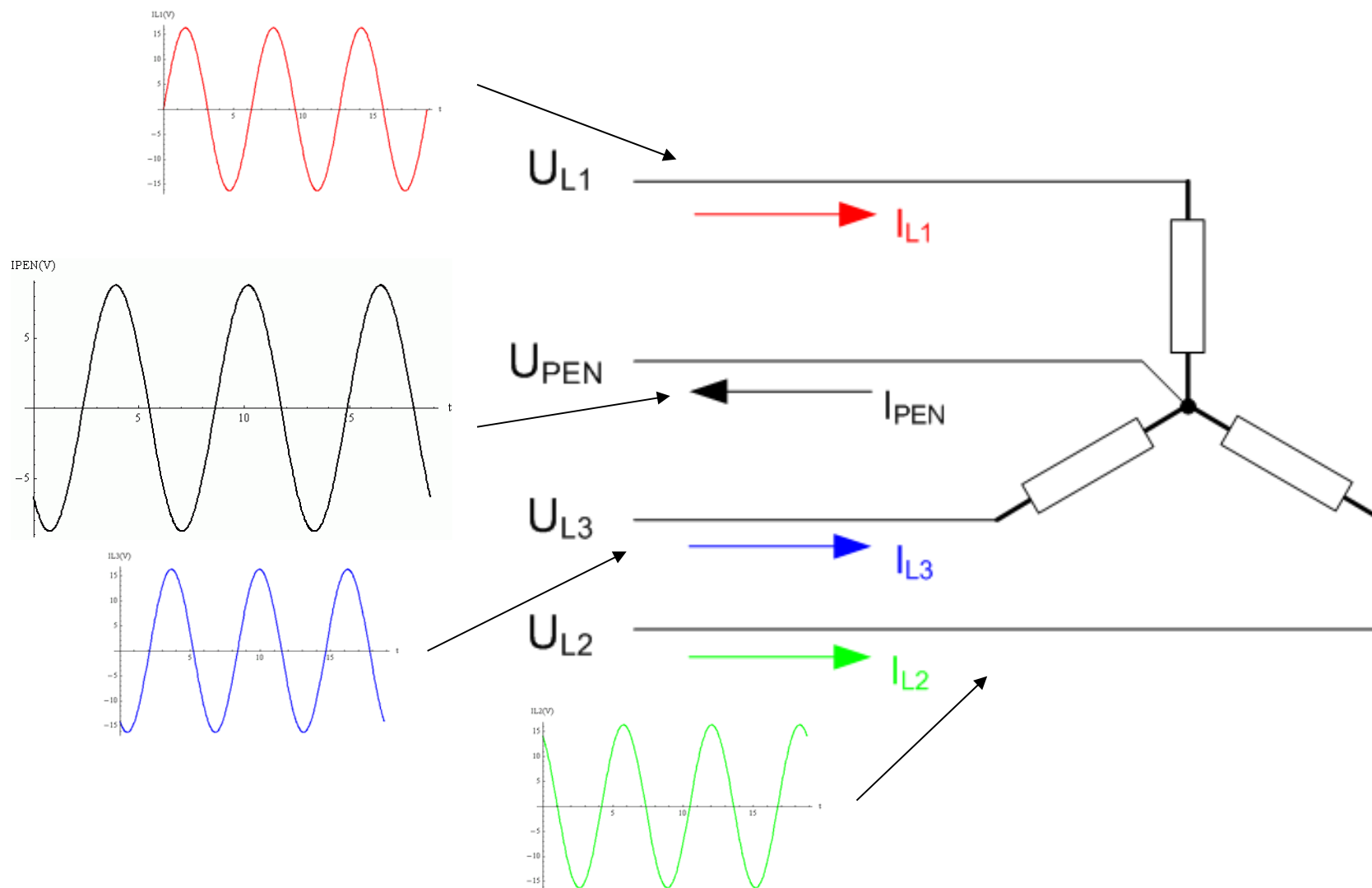


Čím může být způsobeno přetěžování PEN vodiče?



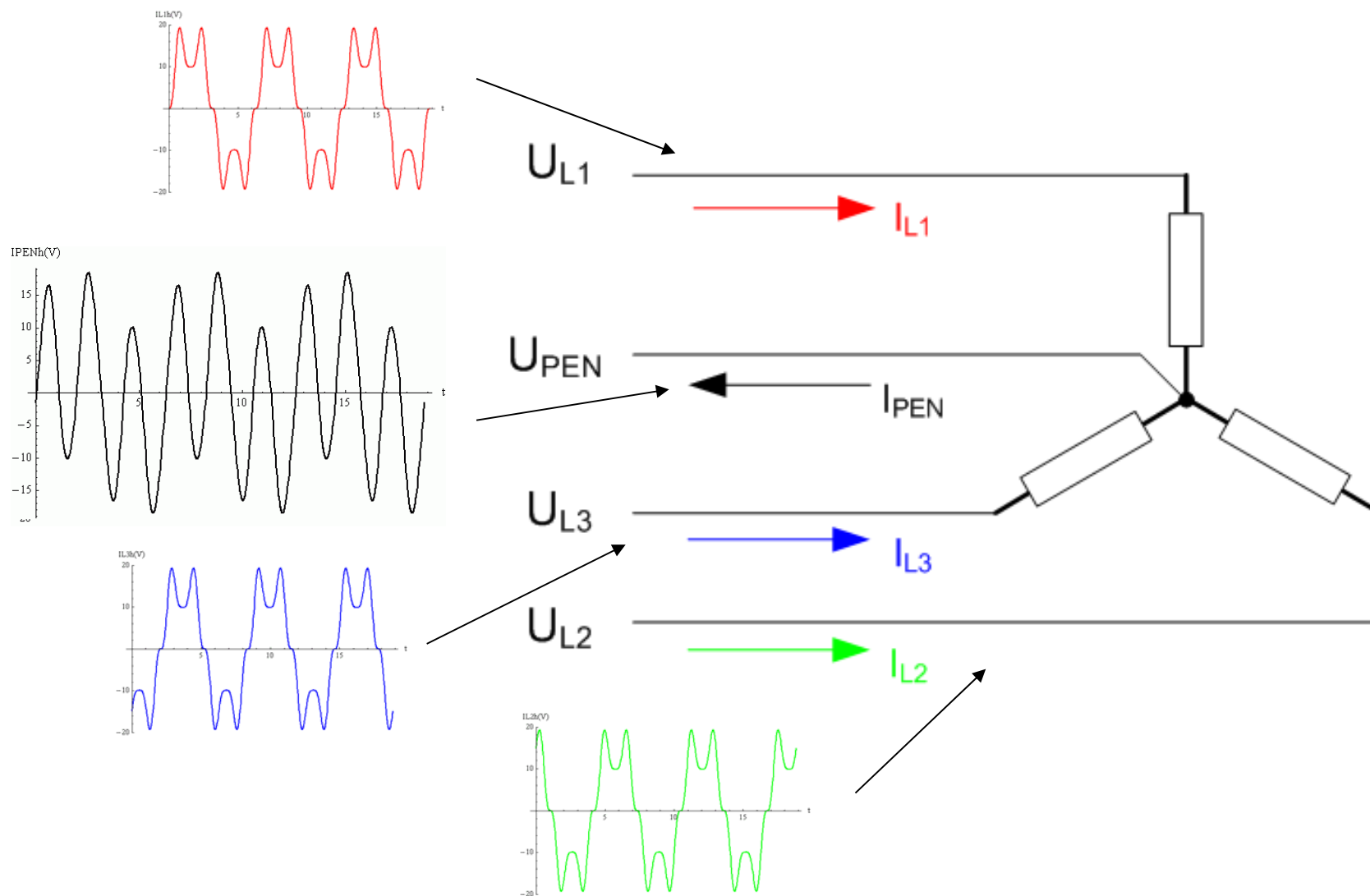


Čím může být způsobeno přetěžování PEN vodiče?





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)

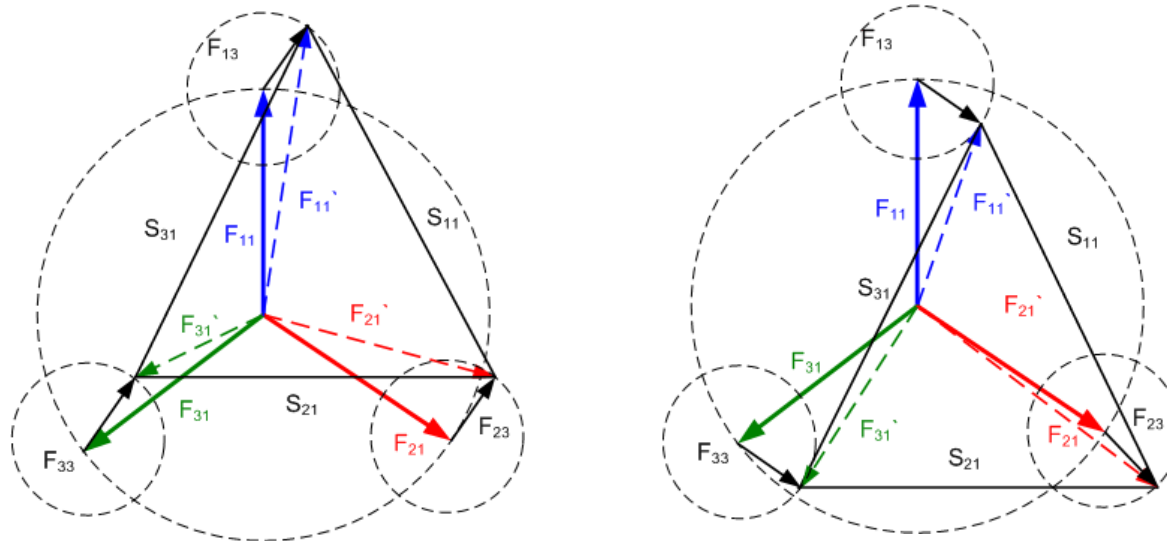


Třetí harmonická 1

- nesymetrická třífázová soustava => rozložení do složkových soustav (sousedná, zpětná, netočivá)
- u nesymetrického proudového zdroje se přes střední vodič uzavírají obecně všechny řady 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



Nejčastější výskyt

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

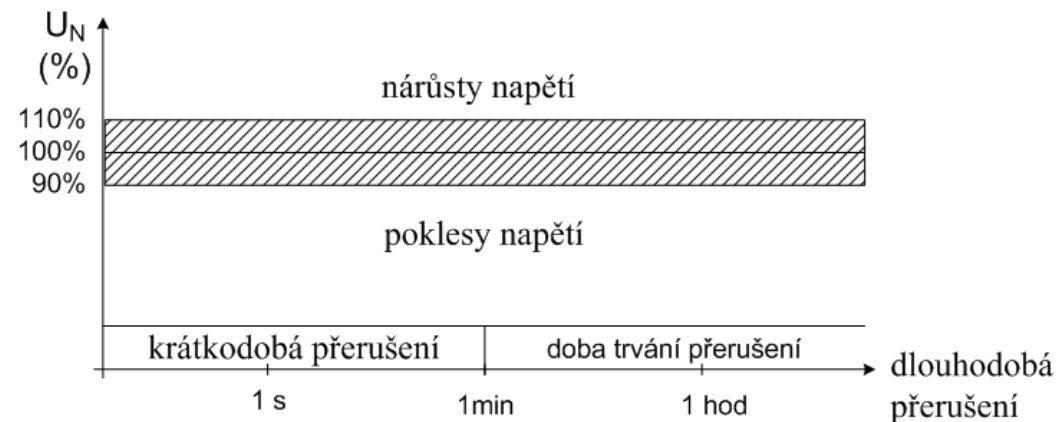


Kolísání napětí, flicker, napět'ová nesymetrie



Kolísání napětí – základní pojmy

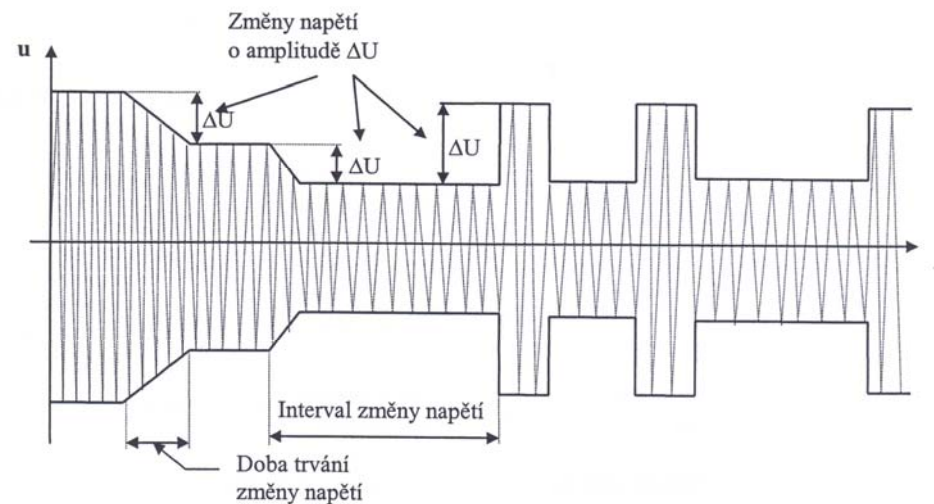
- **změna napětí** - změna efektivních (maximálních) hodnot napětí mezi dvěma sousedními úrovněmi napětí, mezi nimiž stoupá či klesá v nespecifikovaném čase
- **amplituda změny napětí** – rozdíl mezi efektivními (maximálními) hodnotami napětí před a po změně napětí
- **relativní změna napětí** – poměr amplitudy změny napětí ku specifikované hodnotě napětí
- **doba trvání změny napětí** – interval času, v němž napětí stoupá či klesá z počáteční na konečnou hodnotu





Kolísání napětí – základní pojmy

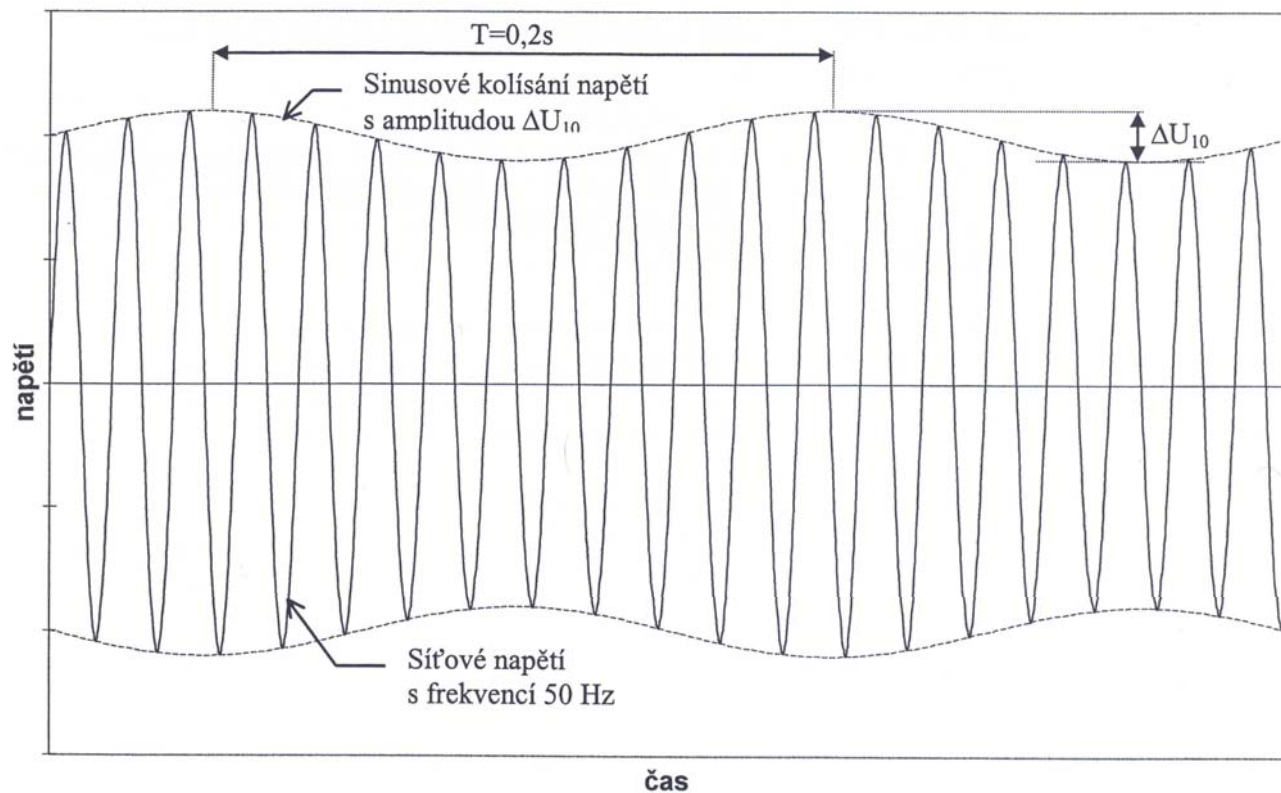
- **kolísání napětí** – série změn napětí nebo cyklická změna obálky napětí
- **sinusové kolísání napětí** – kolísání napětí, u níž je křivka kolísání sinusová
- **amplituda kolísání napětí** – rozdíl mezi maximální a minimální hodnotou napětí v průběhu kolísání napětí
- **četnost výskytu změn napětí** – počet změn napětí za jednotku času
- **blikání (flicker)** – subjektivní vjem blikání





Flicker – základní pojmy

- opakované změny v napájení = kolísání (míhání) napětí
- napěťové změny jsou v reálných situacích často pod hranicí citlivosti běžných elektrických přístrojů





Důvody měření flickeru a mezní hodnoty

- kolísání napětí činí jen několik desetin procenta (pro frekvenci periodického kolísání 8,8 Hz cca 0,25 %) → může způsobit velmi nepříjemné změny ve světelném záření světelných zdrojů
- zejména při kolísání napětí s frekvencí 5 – 18Hz
- protože je lidské oko velice citlivé na změny světelného toku, musí být změny napětí udrženy na velmi úzkých mezích
- u zařízení jednotlivých odběratelů je nutné ověřit, zda změny zátěže, vyvolané zařízeními způsobující časté zapínání či vypínání velké zátěže, nevedou k nepřístupným hodnotám flickeru



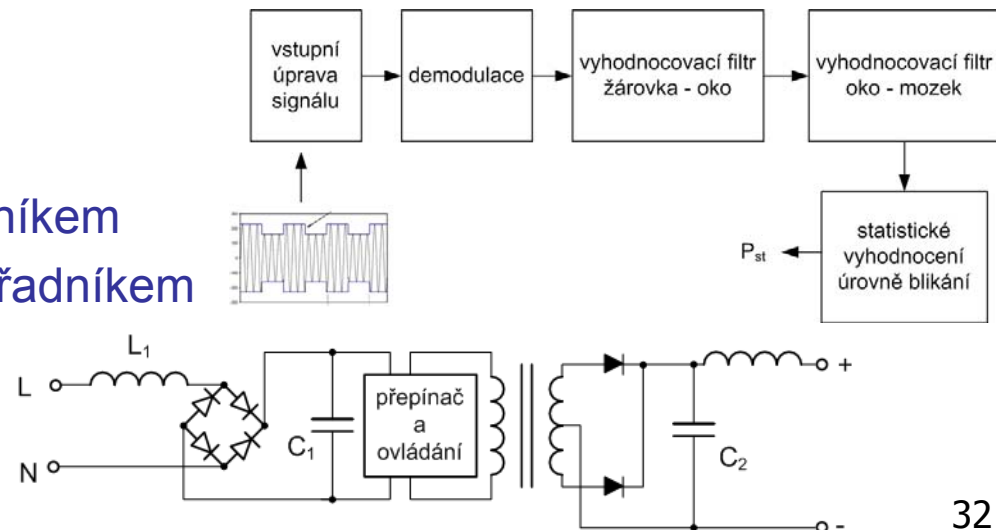
Hodnocení flickeru u žárovky

- Jakékoliv změny amplitudy napájecího napětí vedou ke změnám světelného toku Φ světelného zdroje, kdy tento subjektivní jev je označován jako flicker.
- Světelný tok Φ žárovky je velmi citlivý na změny napájecího napětí:

$$\Phi \approx U^y \quad y \rightarrow \text{od } 3,1 \text{ do } 3,7$$

- napěťová tolerance $\pm 10 \% U_N$:
 - $10 \% U_N \rightarrow 207 \text{ V} \sim 70 \% \Phi_N$
 - + $10 \% U_N \rightarrow 253 \text{ V} \sim 140 \% \Phi_N$

- další světelné zdroje:
 - zářivky s indukčním předřadníkem
 - zářivky s elektronickým předřadníkem
 - kompaktní zářivky
 - výbojky





Důvody vzniku flickeru

- k spínání velké zátěže
- rozběh velkých motorů
- proměnlivá zátěž (katr)
- svářecí stroje
- EOP – symetrické a nesymetrické zkraty (doba natavování vsázky)
- tyristorový měnič – různé otevírání ventilů



Výpočet relativní změny napětí

- k relativní změna napětí: $d = \frac{\Delta U}{U_N} \cong \frac{\Delta S_A}{S_k}$
 - ΔU amplituda kolísání napětí (změna) v napájecím bodě (V)
 - U_N amplituda kolísání napětí (změna) v napájecím bodě (V)
 - ΔS_A změna výkonu odběratele (VA)
 - S_k zkratový výkon v napájecím bodě (VA)
- přesnější výpočet pomocí impedance sítě Z_{kv} a připojeného zařízení Z_{odb} :

$$d = 1 - \operatorname{abs} \left[\frac{R_{odb.} + jX_{odb.}}{R_{kv} + R_{odb.} + j(X_{kv} + X_{odb.})} \right]$$

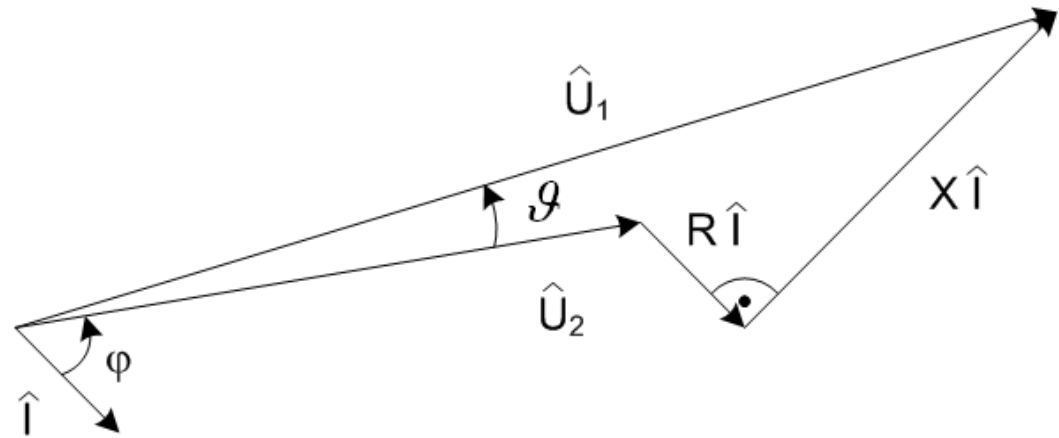
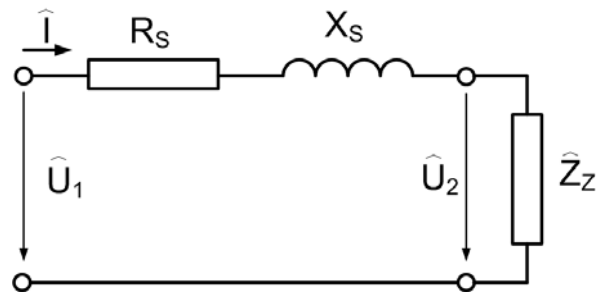
- relativní změna lze určit na základě změny činného a jalového výkonu:

$$d = \frac{1}{U_N^2} (R_{kv} \cdot \Delta P_A + X_{kv} \cdot \Delta Q_A)$$

- o jednofázovou zátěž, připojenou mezi dvě fáze: $d \cong \frac{\sqrt{3} \cdot \Delta S_A}{S_k}$



Matematický model flickeru



$$U_2 = |U_1| - (I_{\check{c}} \cdot R_s + I_j \cdot X_s) = |U_1| - \frac{1}{3 \cdot U^*} \cdot (P \cdot R_s + Q \cdot X_s)$$

$$\delta U \cong \frac{1}{3 \cdot U^*} \cdot (\delta P \cdot R_s + \delta Q \cdot X_s) = \Delta I_{\check{c}} \cdot R_s + \Delta I_j \cdot X_s = \delta(\Delta U)$$



Výpočet rušivého činitele flickeru

- činitel flickeru se určí jako součet trvání účinků flickeru, vztaženého na sledovaný časový interval, ve kterém se kolísání napětí vyskytuje:

$$A_{st} = \frac{\sum t_f}{10 \text{ min}} \quad A_{lt} = \frac{\sum t_f}{120 \text{ min}}$$

- A_{st} střední rušivý činitel flickeru během 10 minut (-)
 - A_{lt} dlouhodobý rušivý činitel flickeru během 120 minut (-)
 - t_f doba působení flickeru (min)
- činitelé rušení od různých zdrojů v síti se určí jako součet trvání účinku flickeru, vztaženého na sledovaný časový interval, ve kterém se kolísání napětí vyskytuje

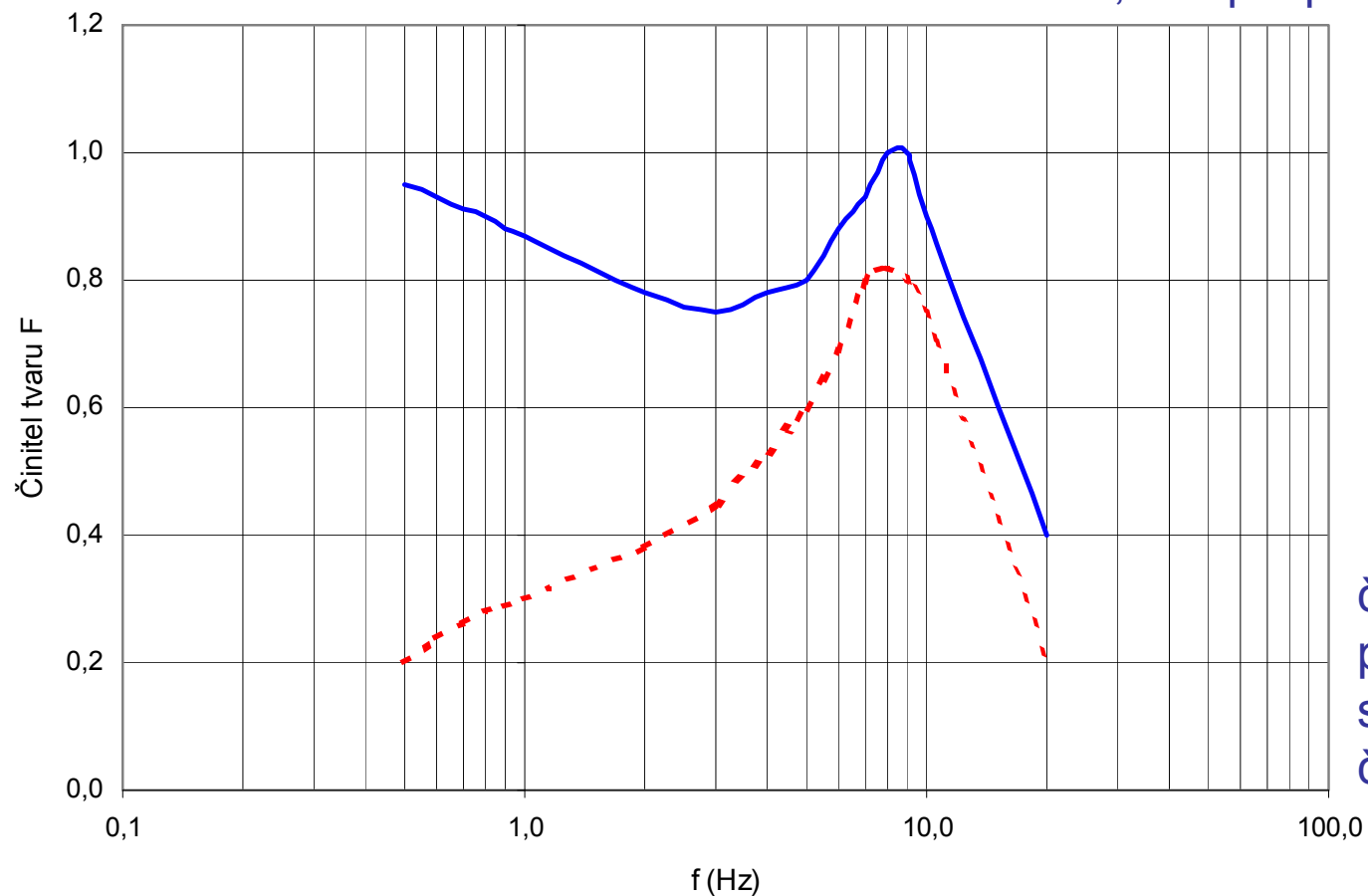
$$A_{celk.} = A_1 + A_2 + A_3 + \dots + A_N$$



Doba působení flickeru

$$t_f = 2,3 (100 \cdot d \cdot F)^3$$

- t_f doba působení flickeru (s)
- F činitel tvaru (-)
- d relativní změna napětí (-)
- 2,3.... přizpůsobovací koeficient (s)



činitele tvaru pro
pravoúhlé (plná čára) a
sinusové (čárkovaná
čára) kolísání napětí



Výpočet míry vjemu blikání

- Vztah mezi A_{st} resp. A_{lt} a P_{st} resp. P_{lt} je následující:

$$A_{st} = P_{st}^3 \quad A_{lt} = P_{lt}^3$$

P_{st} (P_{lt}).....krátkodobá (dlouhodobá) míra vjemu blikání

- Krátkodobá míra vjemu blikání P_{st} v intervalu 10 minut je vhodná pro ověření jednotlivých zdrojů rušení s krátkým pracovním cyklem.
- Pro ověření kombinovaných účinků skupiny zdrojů rušení pracujících náhodným způsobem nebo zdrojů rušení s dlouhým a nebo proměnlivým pracovním cyklem je nutné určení dlouhodobé míry vjemu blikání.
- Přípustné hodnoty relativních změn a činitele flickeru:

Přípustná velikost rušení		A_{lt}	A_{st}	P_{lt}	P_{st}	d
v síti	nn	0,4	1	0,75	1	-----
	vn	0,3	0,75	0,7	0,9	-----
	wn	0,2	0,5	0,6	0,8	-----
zařízení jednoho odběratele	nn	0,05	0,2	0,4	0,6	0,03
	vn	0,05	0,2	0,4	0,6	0,02
	wn	0,05	0,2	0,4	0,6	0,02

$$P_{lt} = \sqrt[3]{\sum_{i=1}^{12} \frac{P_{sti}^3}{12}}$$



Výpočet rušivého činitele flickeru

$$P_{st} = \sqrt{K_{0,1} \cdot P_{0,1} + K_{1s} \cdot P_{1s} + K_{10s} \cdot P_{10s} + K_{30s} \cdot P_{30s} + K_{50s} \cdot P_{50s}}$$

K_x váhový koeficient

P_x percentil úrovně překročení pro x % doby během jedné periody

Váhové koeficienty:

$K_{0,1}$	pro úroveň 0,1 % = 0,0314
K_{1s}	pro úroveň 1 % = 0,0525
K_{3s}	pro úroveň 3 % = 0,0657
K_{10s}	pro úroveň 10 % = 0,28
K_{50s}	pro úroveň 50 % = 0,08

$$P_{1s} = \frac{P_{0,7} + P_1 + P_{1,5}}{3}$$

$$P_{3s} = \frac{P_{2,2} + P_3 + P_4}{3}$$

$$P_{10s} = \frac{P_6 + P_8 + P_{10} + P_{13} + P_{17}}{5}$$

$$P_{50s} = \frac{P_{30} + P_{50} + P_{80}}{3}$$

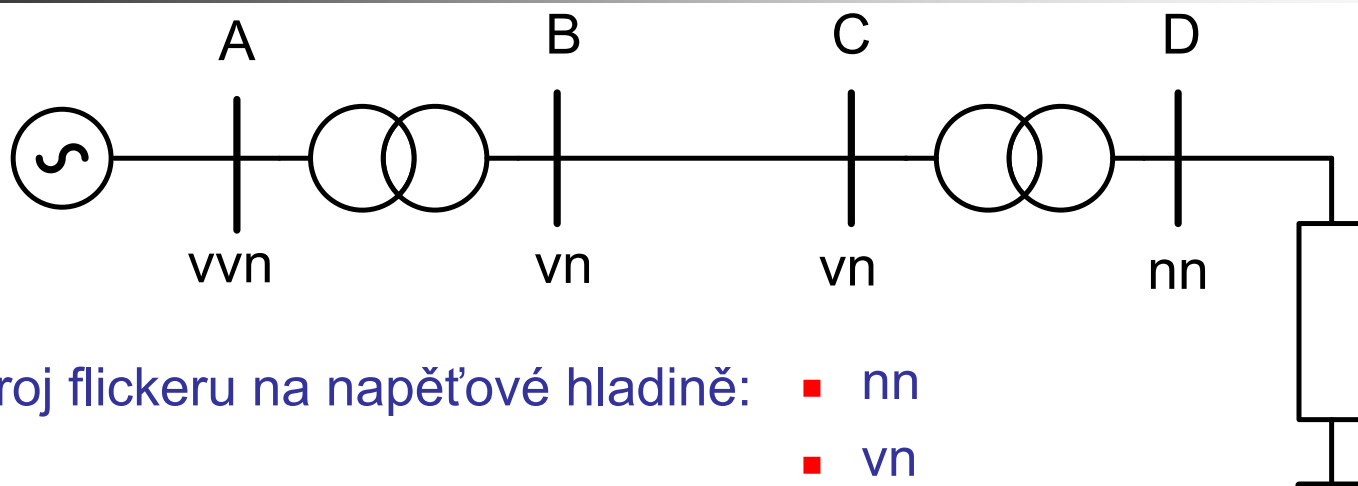


Opatření ke zmírnění flickeru

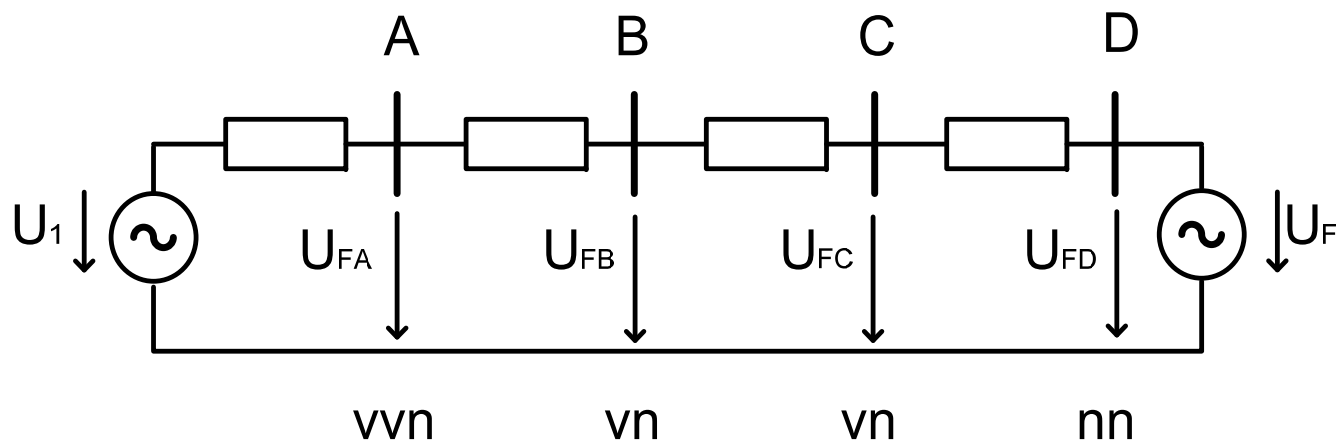
- připojení zařízení způsobující flicker do sítě s vyšším zkratovým výkonem
- zvětšení průřezu napájecího vedení
- snížení potřeby jalového výkonu
- kompenzace aktivními filtry
- připojení nového generátoru či synchronního kompenzátoru



Příklad šíření flickeru v ES



- zdroj flickeru na napěťové hladině: ■ nn
■ vn
■ vvn



$$U_{FA} : U_{FB} : U_{FC} = \frac{1}{S_K^{(A)}} : \frac{1}{S_K^{(B)}} : \frac{1}{S_K^{(C)}}$$



Napět'ová nesymetrie

- je dána nerovnoměrným rozložením zatížení na tři fáze
- má za následek vznik nesymetrických proudů
- tyto nesymetrické proudy vlivem impedance sítě způsobují nesymetrii napětí

Zdroje nesymetrie v sítích vn a vvn:

- indukčními pecemi pracující se síťovou frekvencí 50 Hz
- odporovými tavicími pecemi
- obloukovými ocelářskými tavicími pecemi
- odporovými svářečkami

Zdroje nesymetrie v sítích nn:

- jednofázové spotřebiče zapojené mezi fázový a střední vodič

Potlačení nesymetrie:

- při současném působení více jednofázových spotřebičů, provede se stejnoměrné rozdělení těchto odběrů na jednotlivé fáze

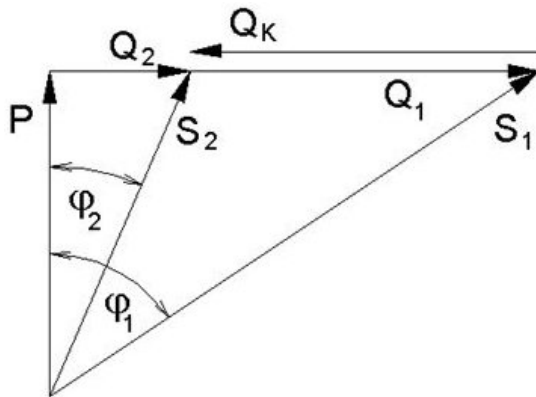


Kompenzace jalového výkonu



Důvody kompenzace

- většině případů jsou odběry induktivního charakteru
- definice účinníku (při zanedbání deformační, pulzační a skrytý):
- $\cos \varphi = \frac{P}{S} \quad P = S \cdot \cos \varphi \quad Q = S \cdot \sin \varphi$
- Kompenzací jalového výkonu pak rozumíme snížení odběru induktivního jalového výkonu pomocí dodatečných technických opatření na předepsanou hodnotu, tj. požadovaný účinník v rozmezí $\cos \varphi = 0,95-1$.



$$\cos \varphi = \frac{P}{S}$$

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





Spotřebiče jalového výkonu

■ Asynchronní motory

- jalový výkon je potřebný k vytvoření točivého magnetického pole statoru a k pokrytí rozptylového magnetického toku
- zvětšení odebíraného jalového výkonu a zhoršení účinníku s klesajícím zatížením motoru
- při chodu naprázdno (60-70% příkonu motoru při plném zatížení)

$$Q = Q_0 + Q_z \cdot \left(\frac{P}{P_N} \right)^2$$

■ Asynchronní generátory

- asynchronní generátory odebírají z rozvodné sítě značný jalový indukční výkon pro vytvoření magnetického pole





Spotřebiče jalového výkonu

■ Transformátory

- tvořen z jalového výkonu při chodu naprázdno ($1 - 3,5\% S_{TN}$)
- $Q = Q_0 + u_k \left(\frac{I}{I_N} \right)^2$
- při chodu transformátoru naprázdno $\cos\varphi_0 = 0,1 - 0,2$
- kompenzace se vyžaduje středo- a velkoodběratelů (na sekundární straně transformátoru)
- při průměrném zatížení $70\% S_N$ je celkový jalový výkon $4 - 6\% S_N$
- $Q = 0,01 \cdot I_0 \cdot S_{TN}$

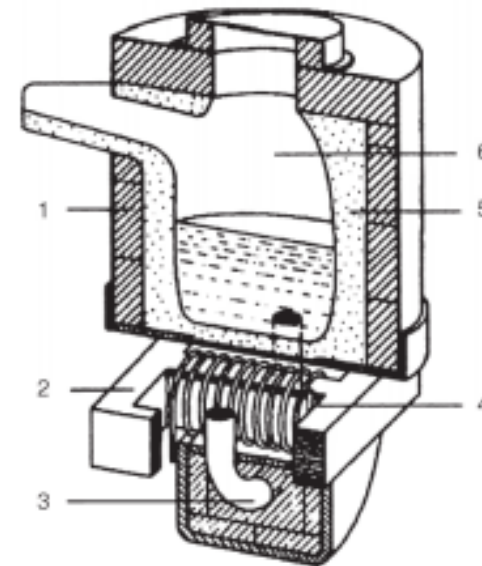




Obloukové a indukční pece



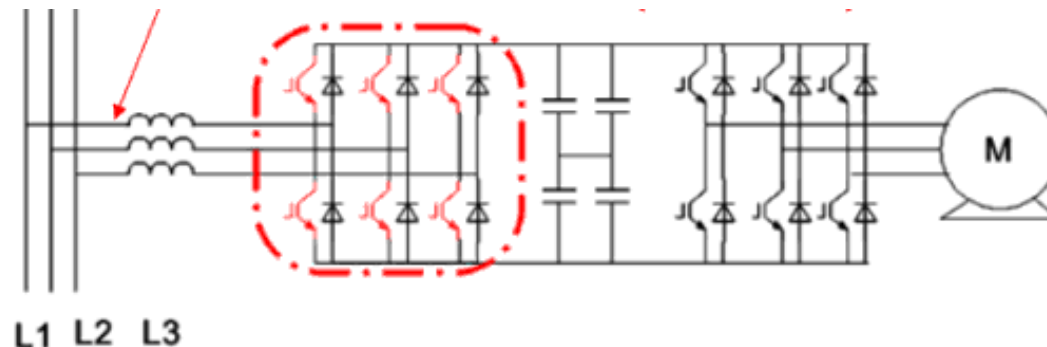
- zařízení je jedno z nejproblematictějších z hlediska jejich zpětných vlivů na síť
- kromě odběrů výkonů s nízkými hodnotami účinníku vykazují velkou proměnlivost odebíraného výkonu
- stabilní hoření a dosažení požadovaného výkonu na oblouku je podmíněno účinníkem mezi $\cos\varphi_0 = 0,7 - 0,86$





Výkonové polovodičové měniče

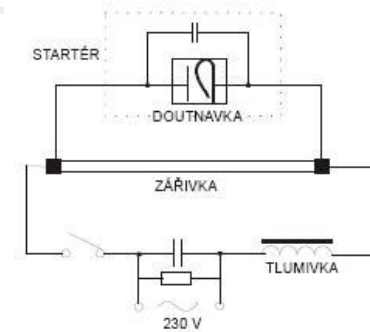
- řízené a neřízené usměrňovače, měniče frekvence se stejnosměrným meziobvodem, přímé měniče frekvence, fázově řízené střídavé spínače
- řízený polovodičový usměrňovač pro řízení ss motorů $\cos\varphi = 0,5$ a horší
- střídač s neřízeným usměrňovačem (ss meziobvod, PWM) $\cos\varphi = 0,95$
- Pro řízený polovodičový usměrňovač pro regulaci ss motorů platí, že účinník se zhoršuje s hloubkou regulace otáček a nepřímo s velikostí ss napětí naprázdno U_{d0} při úhlu řízení tyristorů $\alpha = 0$.





Spotřebiče jalového výkonu

- výbojková a zářivková svítidla



- svařovací transformátory
- zátěže s rychle se měnícím odebíraným jalovým výkonem (svařovací lisy, bodovky)
- reaktory pro omezení zkratových proudů





Venkovní a kabelová vedení

- u venkovních vedení (pod 200km) převládá indukční složka a kapacitní je zanedbatelná
- kabelových vedení převládá naopak vliv kapacity (kapacita roste čím větší je průřez žil)
- tato vlastnost kabelových sítí může vést při nesprávně provozovaných kompenzačních zařízeních k nebezpečnému nárůstu kapacitního výkonu hlavně v sítích VN





Důsledky odběrů se špatným účíníkem

- **zvýšení nákladů na prvky elektrizační soustavy**
tj. vedení, transformátory, elektrické rozvodny apod. musí být dimenzovány na velikost zdánlivého proudu, který je $1/\cos\varphi$ krát větší než proud činný
- **snížení využití generátorů** - jalový induktivní proud odběru zeslabuje buzení generátoru a je třeba zvýšit budící proud, tím dochází ke zvětšení tepelných ztrát v rotoru a budiči a ke zvýšení zkratového proudu při poruše. Opačná situace vzniká při překompenzování v odlehčené síti, neboť značně odbuzený stroj by mohl vypadnout ze synchronismu a způsobit zvýšení horní přípustné hodnoty napětí, proto je nutné pracovat s induktivním účíníkem $\cos\varphi = 0,95$ až $0,98$
- **zvýšení tepelných ztrát** v ohmických odporech prvků elektrické soustavy, které jsou závislé na druhé mocnině zdánlivého proudu, tj. rostou s druhou mocninou převrácené hodnoty účíníku (např. při $\cos\varphi = 0,7$ jsou dvakrát větší než při $\cos\varphi = 1$)
- **zvětšení úbytku napětí v síti** způsobený zdánlivým proudem I s fázovým posunem φ na impedanci sítě, tj. na činném odporu R a reaktanci X je
$$\Delta U = RI \cos\varphi + XI \sin\varphi$$
- **zhoršení zkratových poměrů v síti** způsobené zvýšením buzení generátorů, tj. dochází ke zvětšení nárazového zkratového proudu a nesymetrické ss složky a v důsledku toho ke zhoršení vypínacích podmínek a namáhání vypínačů



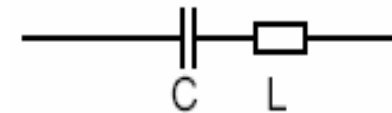
Způsoby zlepšování účinníku

- **správným návrhem a provozováním zdrojů, přenosové soustavy a spotřebičů:**
 - dimenzování transformátorů
 - volba jmenovitého napětí
 - využití synchronních motorů
 - správné dimenzování asynchronních motorů a omezení jejich chodu naprázdno
 - odstranění nevhodných regulačních pohonů
- **použitím kompenzačních zařízení, které jsou zdrojem jalového kapacitního výkonu**



Dělení kompenzačních zařízení

- **podle principu činnosti:**
 - **rotační** (synchronní kompenzátor)
 - **statické** (kondenzátor připojený přímo na síť nebo hrazený tlumivkou, kompenzační filtr tvořený sérioparalelním zapojením L – C, příp. i rezistorů)
 - **polovodičové** (např. proudový měnič s nucenou komutací a kondenzátorem ve ss obvodu – viz. aktivní filtry)

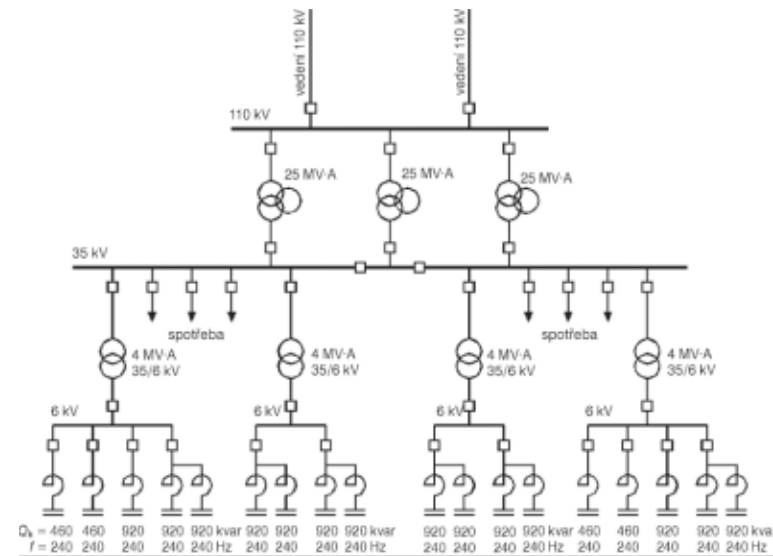




Dělení kompenzačních zařízení

■ podle způsobu regulace:

- **kompenzátory s konstantním výkonem**, tj. neregulované kondenzátorové baterie
- kompenzační filtry spínané samostatným spínačem nebo společně s kompenzovaným spotřebičem (individuální kompenzace asynchronních motorů nebo transformátorů)
- **kompenzátory se stupňovitou regulací**, tzn. samostatně spínané kondenzátory pomocí stykačů NN (speciální stykače pro spínání kapacit) ovládaných regulátorem účinníku moderní konstrukce nebo bezkontaktních polovodičových spínačů se speciální regulací pro omezení přechodných dějů při spínání kondenzátorů pro VN pomocí vakuových vypínačů nebo stykačů



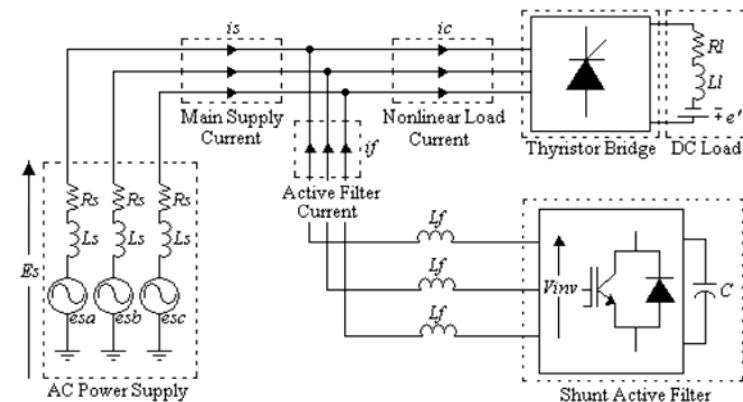
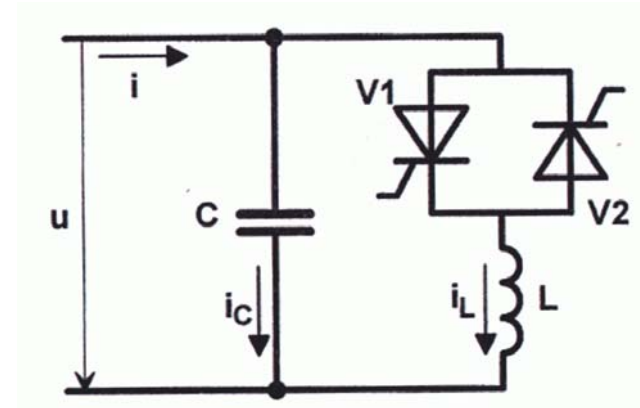
Obr. 4. Schéma připojení kompenzátorů do průmyslové sítě



Dělení kompenzačních zařízení

- **podle způsobu regulace:**

- **kompenzátory s plynulou regulací**
jedná se o synchronní kompenzátory, statické kompenzátory doplněné paralelně připojenou dekompenzační fázově řízenou tlumivkou
- **aktivní filtry** – nový technický prostředek umožňující eliminovat energetické rušení, zejména kolísání napětí v provozech s výraznými dynamickými odběry jalového výkonu (např. svařovny, obloukové pece apod.) a současně snižovat obsah harmonických.

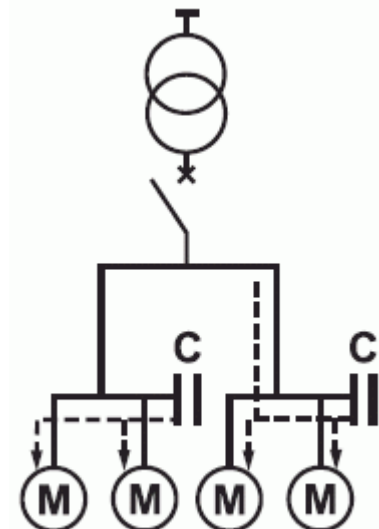
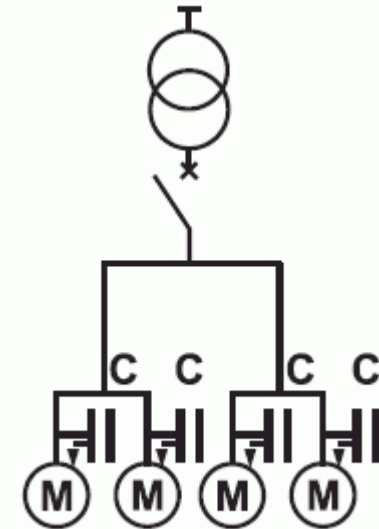




Dělení kompenzačních zařízení

■ podle umístění kompenzátoru:

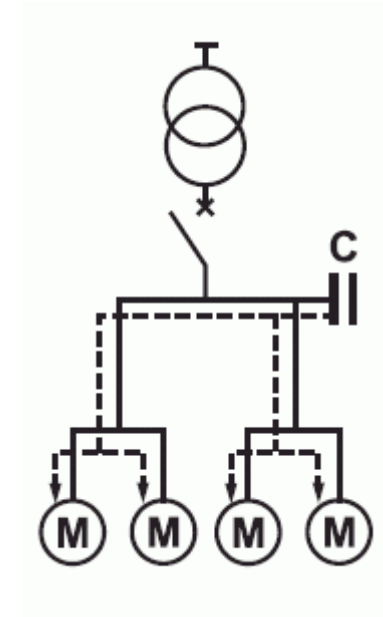
- **individuální**, kdy je kondenzátor připojen přímo na svorkách spotřebiče jalového výkonu nebo je společně s ním připínán k síti samostatným stykačem (vhodné pro velké motory, které pracují delší dobu nebo trvale) – nutná vhodná volba kompenzačního výkonu, nebezpečí samobuzení a přepětových jevů
- **skupinová**, kdy je regulovaný kompenzátor připojen na přípojnicih rozváděče skupiny spotřebičů, vzhledem k soudobosti chodu spotřebičů vychází kompenzační výkon menší





Dělení kompenzačních zařízení

- **podle umístění kompenzátoru:**
 - **centrální**, regulovaný kompenzátor je připojen na přípojnice vstupní trafostanice, vzhledem k soudobosti chodu spotřebičů vychází kompenzační výkon opět menší



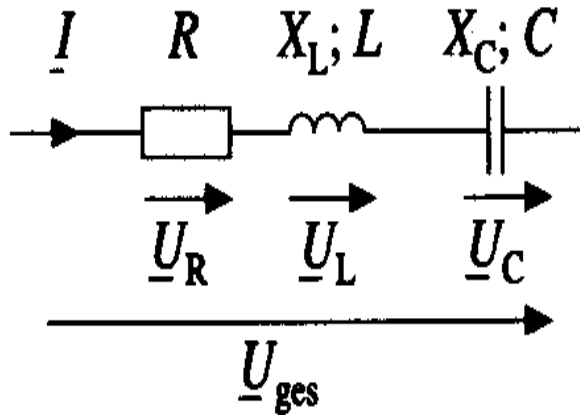
- **smíšená**, tj. kombinace dříve uvedených způsobů



Filtračně kompenzační prostředky

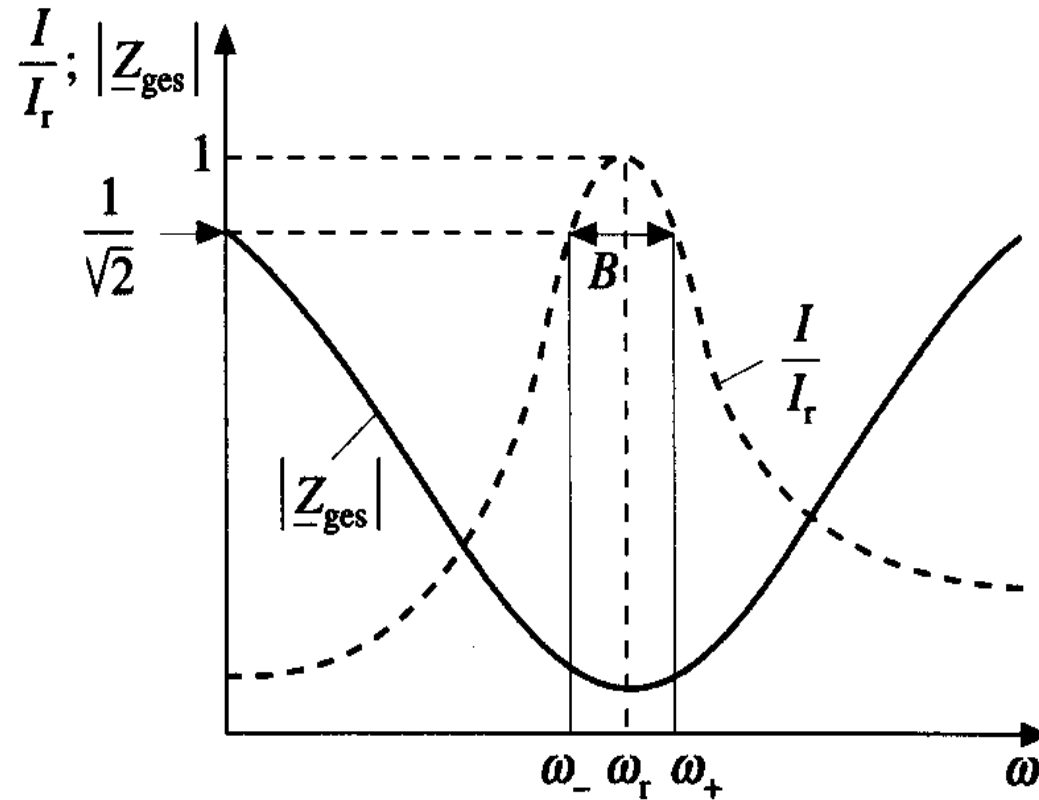


Sérový rezonanční obvod



$$\hat{Z} = R + j\omega L - j\frac{1}{\omega C}$$

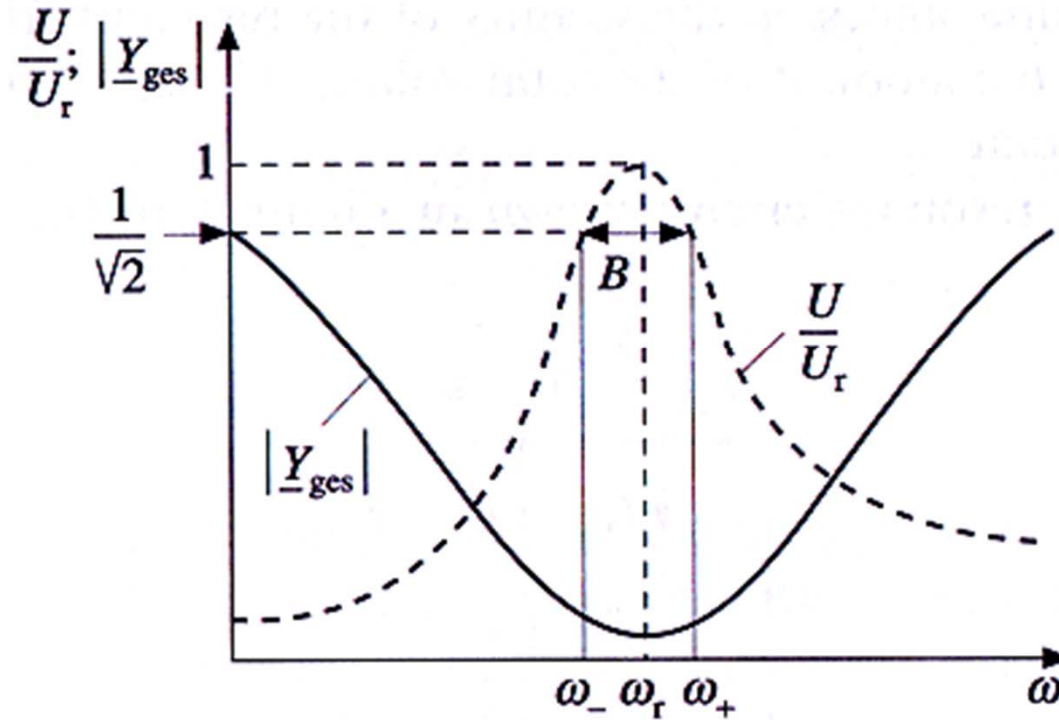
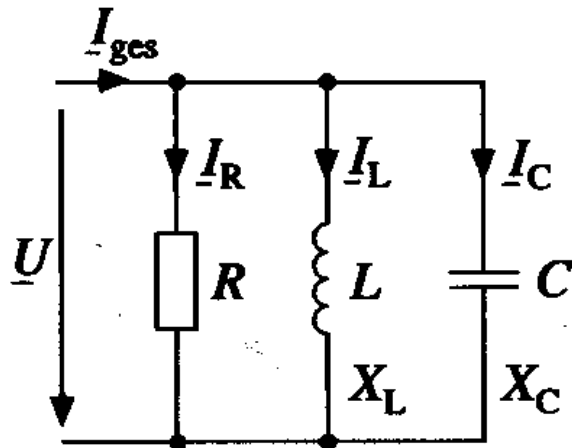
$$Q = \frac{\omega_{REZ} \cdot L}{R} = \frac{1}{\omega_{REZ} \cdot C \cdot R}$$



$$\omega_{res} = \frac{1}{\sqrt{LC}}$$



Paralelní rezonanční obvod

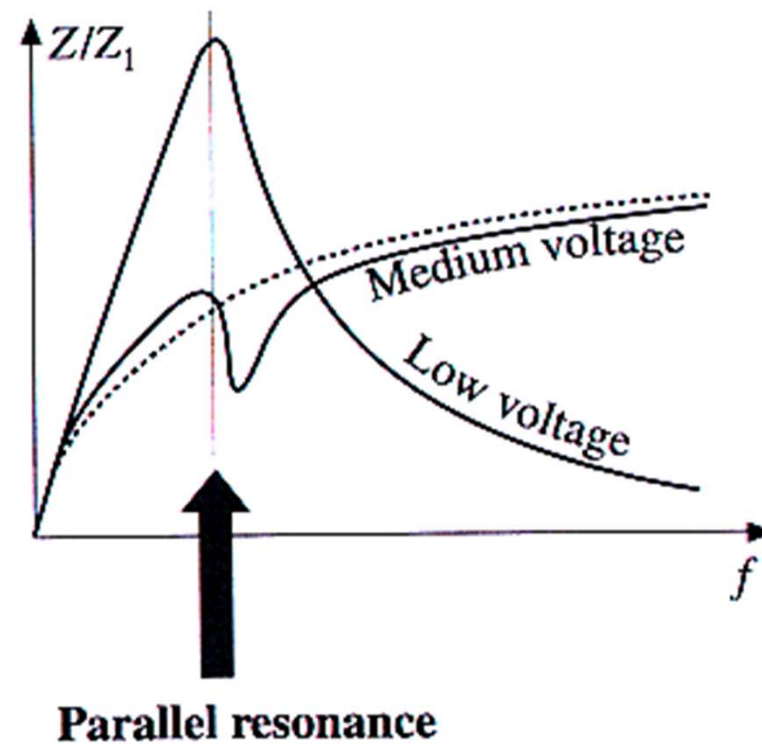
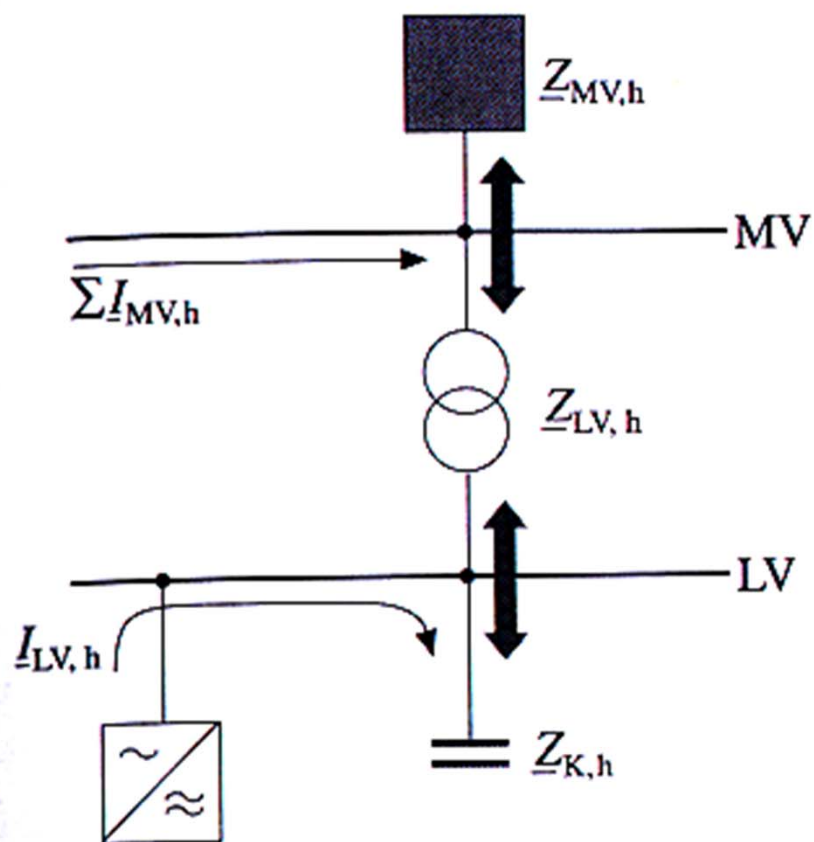


$$\hat{Y} = \frac{1}{R} + j\omega C - j\frac{1}{\omega L}$$

$$\omega_{\text{res}} = \frac{1}{\sqrt{LC}} \quad \omega_+ - \omega_- = \frac{R}{RC}$$



Rezonanční jevy v elektrické síti

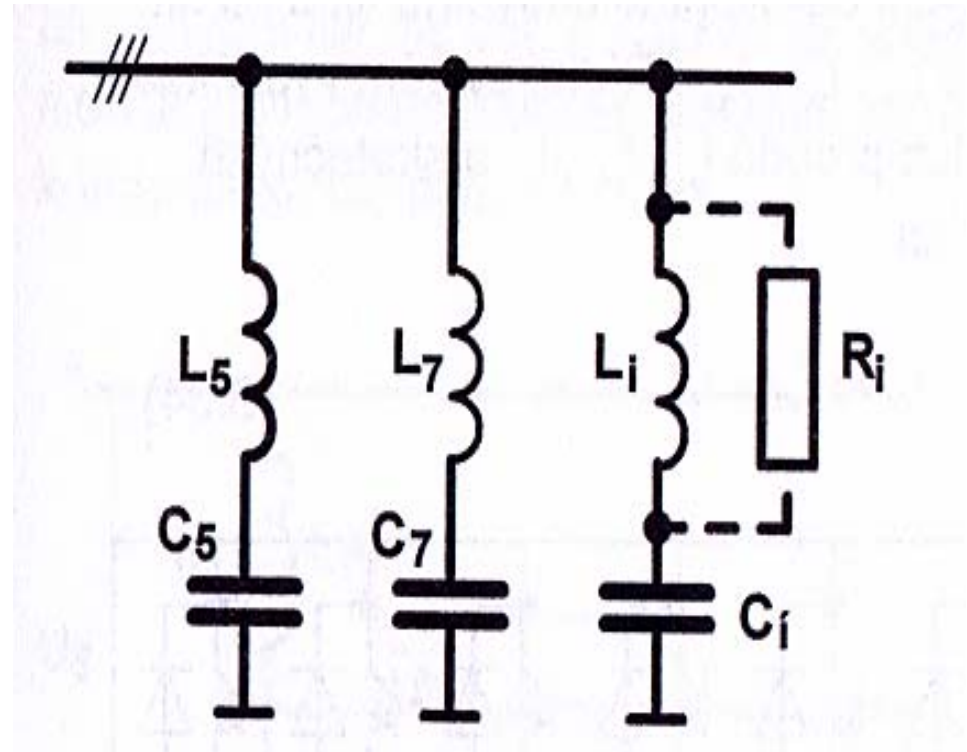




Pasivní LC filtr

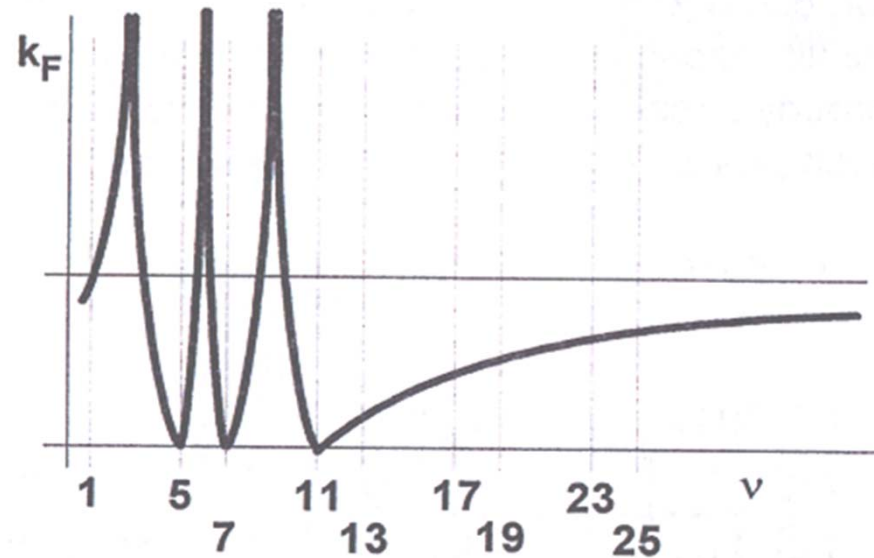
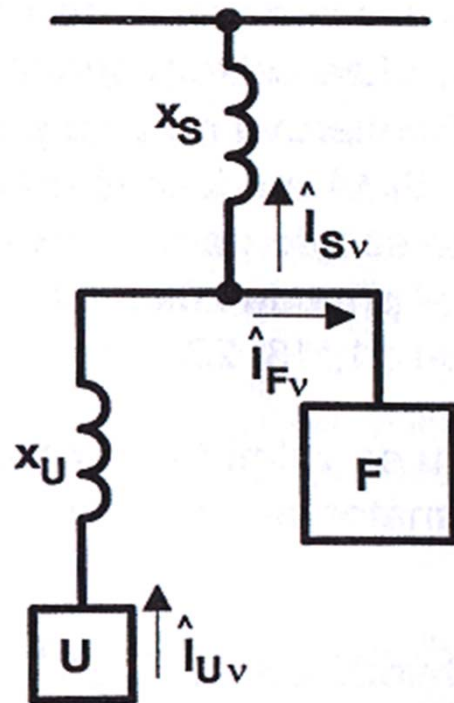
- Filtr naladěn na vlastní frekvenci

$$Z(\nu) = j\nu\omega L + \frac{1}{j\nu\omega C}$$





Koeficient filtrace k_F



$$k_F(v) = \left| \frac{\hat{I}_{Sv}}{\hat{I}_{Uv}} \right| = \left| \frac{\hat{Z}_{F(v)}}{\hat{Z}_{F(v)} + jvX_S} \right|$$



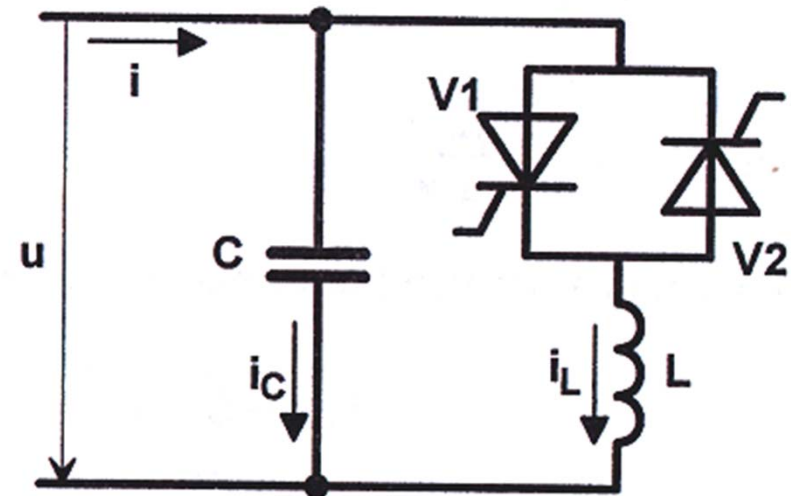
Pasivní LC filtry

- Snadná konstrukce, zkušenosti
- Velké objemy LC filtru
- Vlastnosti filtrace závisí na parametrech naladění filtru
- Vliv na rezonanční kmitočet vlivem změny parametrů filtru
- Vliv parametrů zátěže a sítě na vlastnosti filtrace
- Vznik rezonance mezi sítí a filtrem



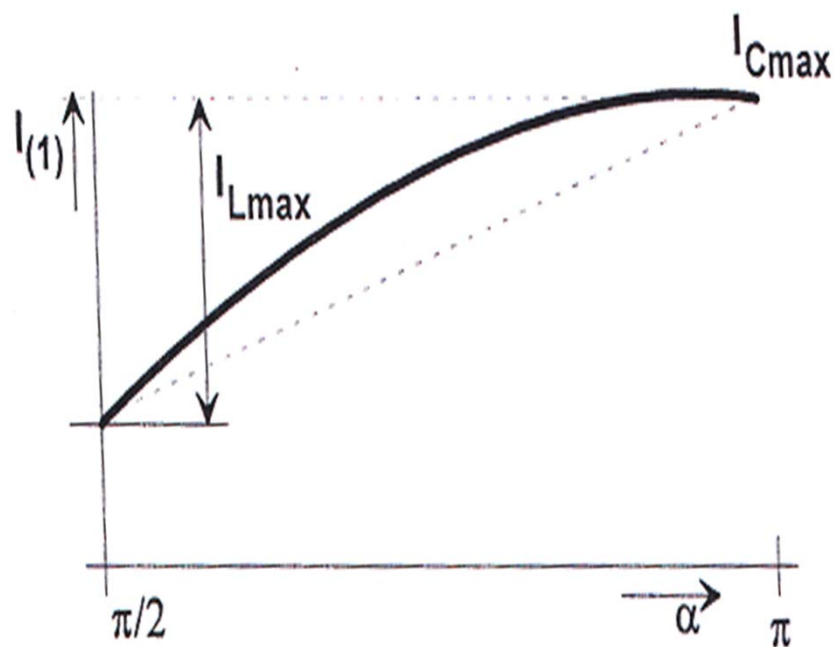
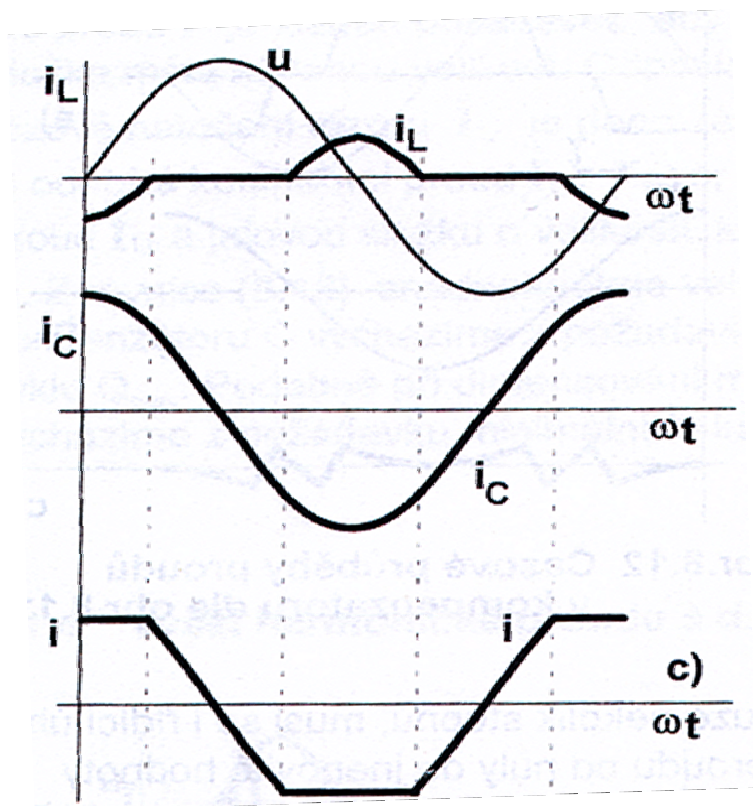
Řízený kompenzátor

- $Q_{\max}$ pro $\alpha = \pi$
- $Q_{\min}$ pro $\alpha = 90^\circ$
- Plynulé a rychlé řízení jalového výkonu
- Velký rozsah řídicího úhlu (90°)



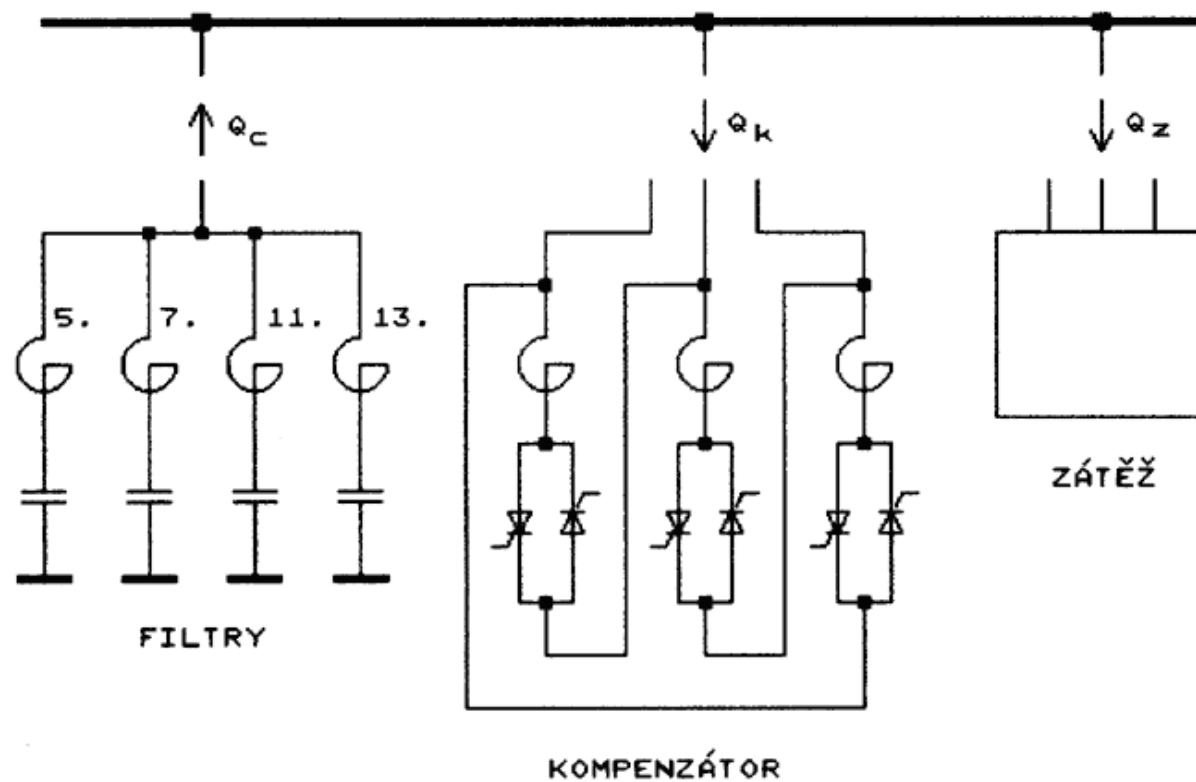


Řízený kompenzátor





Filtračně kompenzační zařízení





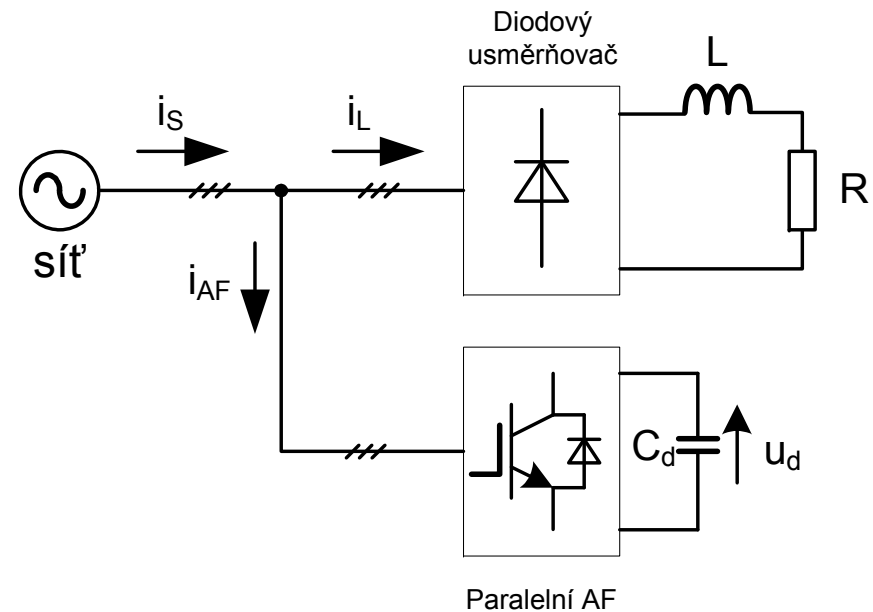
Aktivní filtry

- Filtrace vyšších harmonických proudů
- Selektivní filtrace zvolených harmonických
- Kompenzace jalového výkonu
- Kompenzace proudu nulovým vodičem
- Vyvážení proudů nesymetrické zátěže



APF – Paralelní filtr

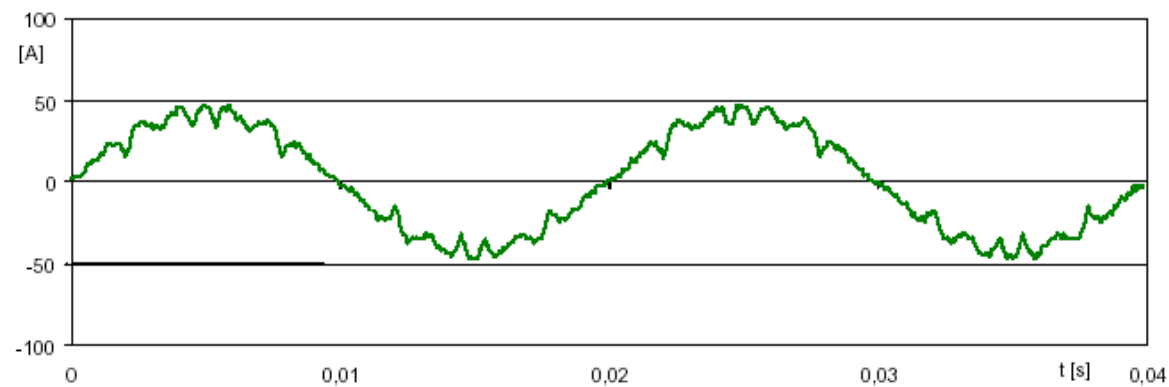
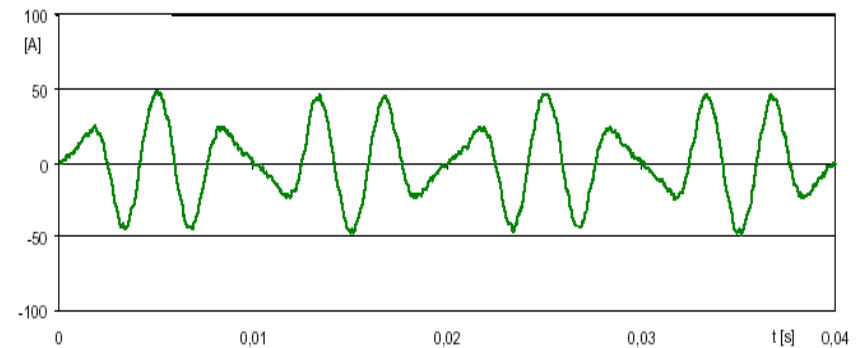
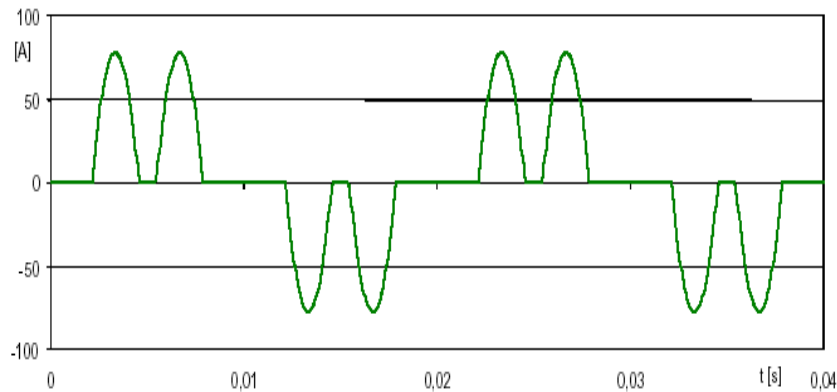
- Filtrace vyšších harmonických proudů
- Kompenzace jalového výkonu
- Kompenzace nesymetrického odběru proudu
- Kolísání napětí





APF – Paralelní filtr

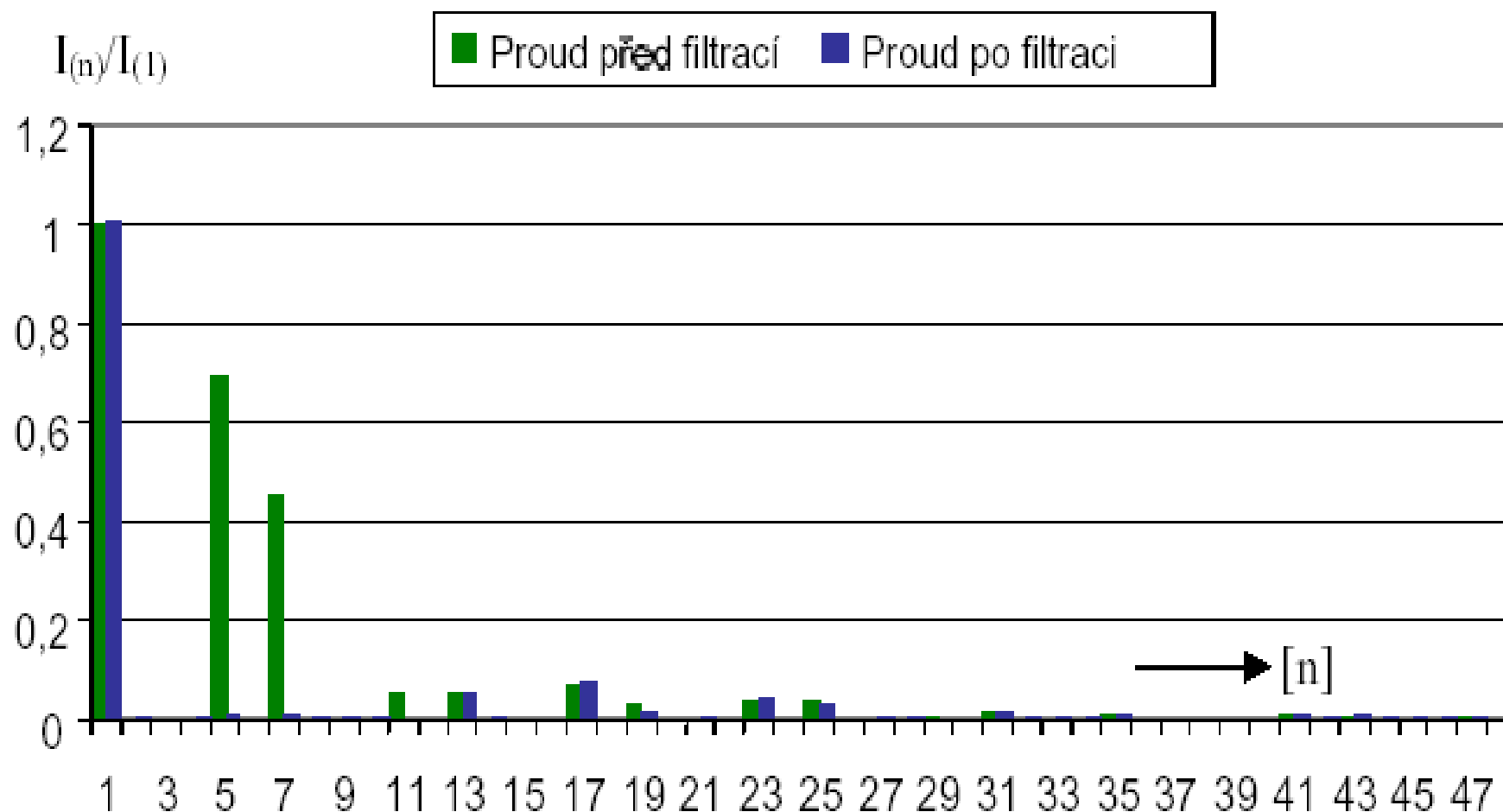
■ Filtrace proudu neřízeného usměrňovače s C zátěží





APF – Paralelní filtr

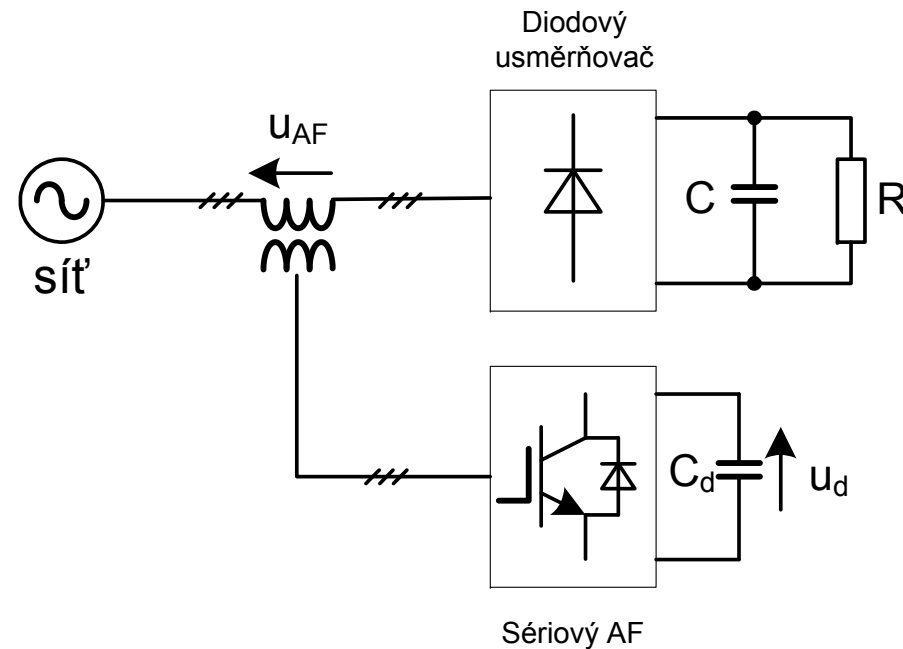
- Filtrace proudu neřízeného usměrňovače s C zátěží





APF – Sériový filtr

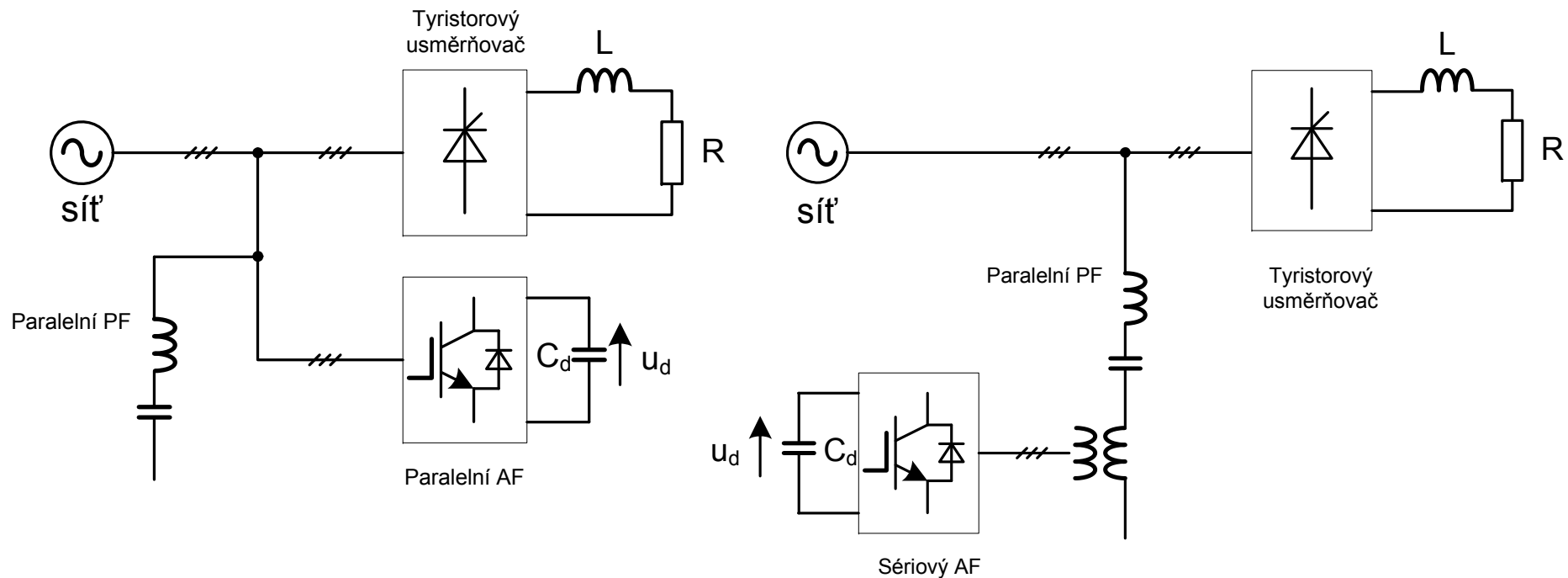
- Odstranit vyšší harmonická napětí
- Udržovat amplitudu napětí
- Dodávat energii (potřeba vlastního zdroje)
- Kompenzovat špičky a poklesy
- Symetrizace napětí





APF – hybridní filtry

- APF kompenzace vyšší harmonických
- Kompenzace jalového i činného výkonu
- Kompenzace nesouměrného zatížení





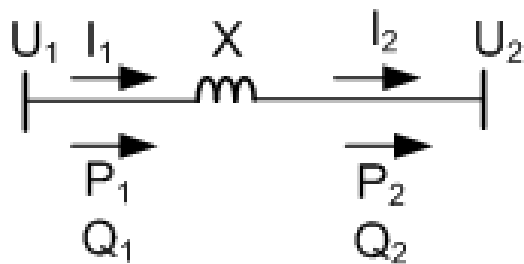
Charakteristické vlastnosti filtrů

Pasivní filtr	Paralelní aktivní filtr	Kombinovaný sériový aktivní a pasivní filtr
Vysoká cena inž. řešení	Velmi malé náklady návrhu	Střední náklady řešení inž.řešní
Problémy interakce se sítí	Vyšší harmonické vyvolané PŠM	Změny impedance sítě neovlivní filtraci
Nutné naladění na místě	Možné paralelní řazení	Vyšší harmonické jiných spotřebičů neovlivňují LC filtr
Menší účinnost		Pasivní filtr umožňuje kompenzovat Q
Citlivost na spínací děje		Výkonové dimenzování APF 5-8% výkonu zátěže
		Cena vazebního transformátoru
		LC filtr ladit na místě



Zařízení FACTS

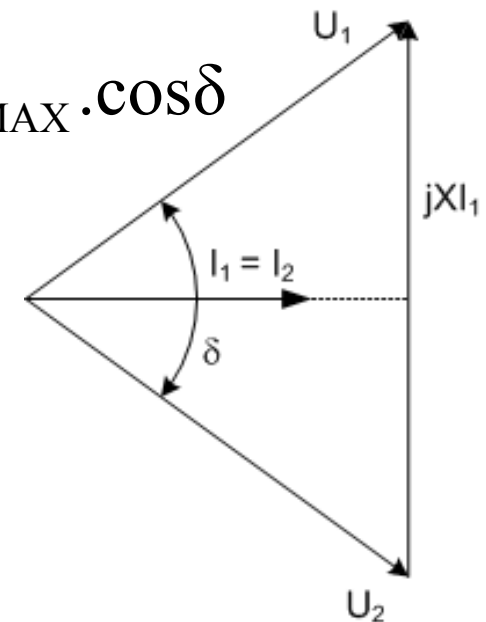
- umožňují pomocí řízení reaktance, napětí a fázového úhlu napětí řídit tok výkonů
- nemají schopnost trvalého generování činného výkonu a proto je lze použít zejména při přechodných dějích a po odeznění přechodného děje lze regulovat síť klasickými způsoby



$$P_1 = P_2 = \frac{U_1 \cdot U_2}{X} \cdot \cos \delta = P_{\text{MAX}} \cdot \cos \delta$$

$$Q_1 = \frac{U_1}{X} \cdot (U_1 - U_2 \cdot \cos \delta)$$

$$Q_2 = \frac{U_2}{X} \cdot (U_1 \cdot \cos \delta - U_2)$$





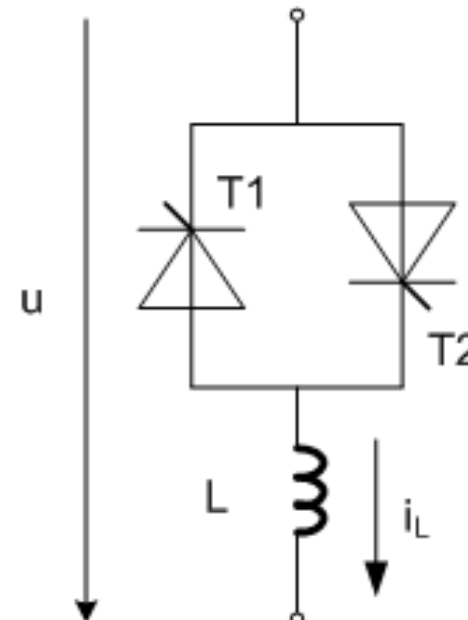
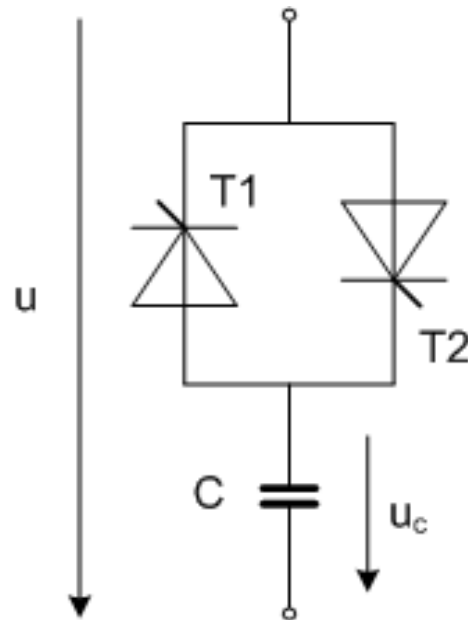
Dělení zařízení FACTS

- paralelní (shunt):
 - TSC, TCC – Thyristor Switched (Control) Capacitor
 - TSR, TCR – Thyristor Switched (Control) Reactor
 - SVC – Static VAR Compensator
 - STATCOM – Static Synchronous Compensator
- sérové
 - SSSC - Static Synchronous Series Compensator
 - TCSC – Thyristor Controlled Series Compensator
- kombinované (univerzální)
 - UPFC – Unified Power Flow Controller
 - UPQC – Unified Power Quality Conditioner



TSC, TCC a TSR, TCR

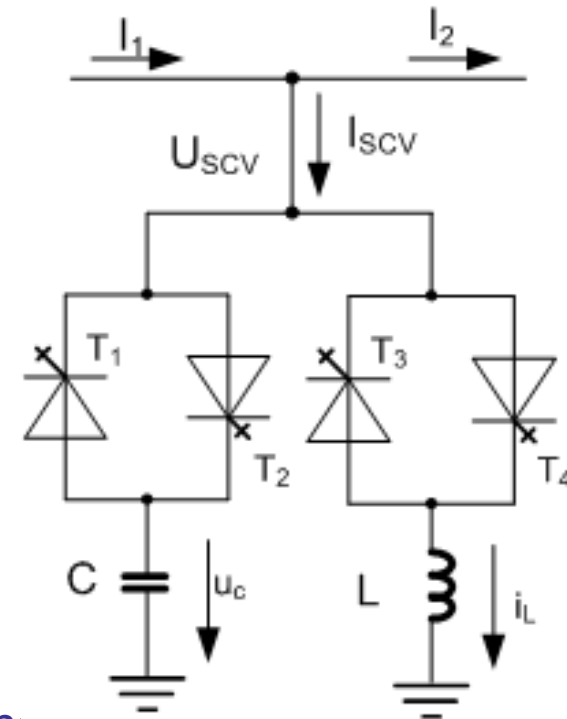
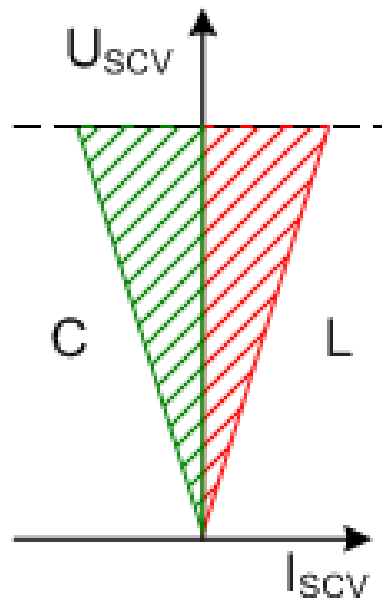
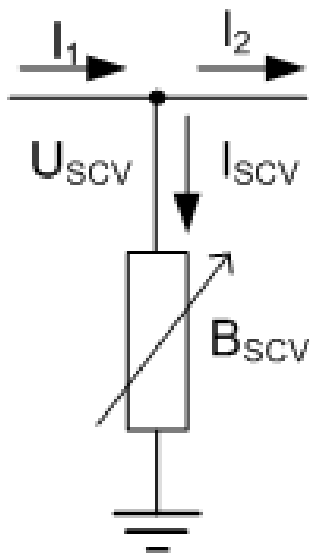
- umožňují dodávat jalový výkon pomocí kondenzátorových baterií nebo pohlcovat jalový výkon pomocí tlumivek
- činnost je omezena stupňovitými regulačními charakteristikami





SVC (Static VAr Compensator)

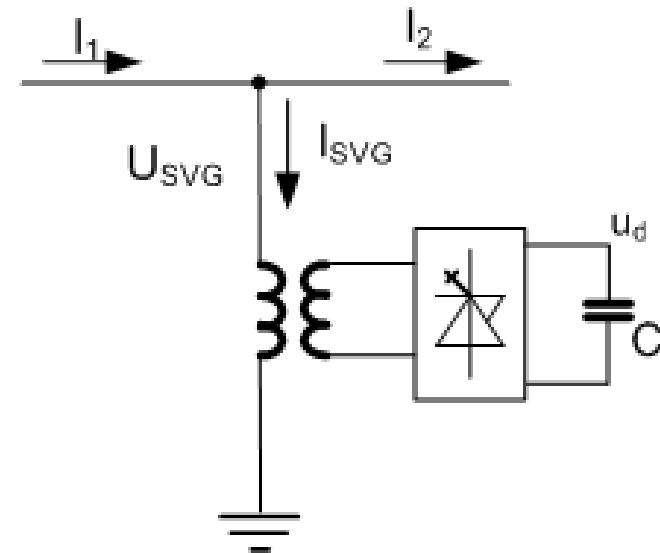
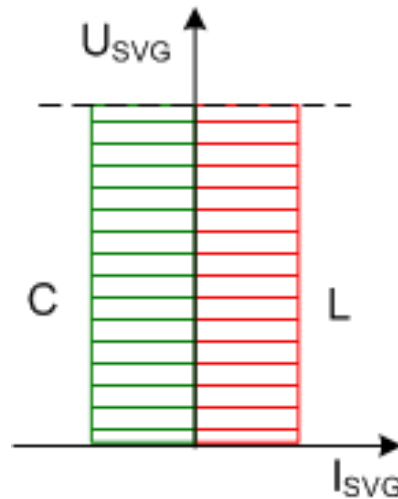
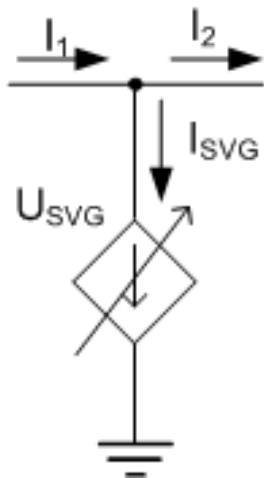
- vznikne paralelním spojením TCC a TCR
- využití jako kompenzátoru
- maximální jalový proud SVC je úměrný velikosti napětí U_{SVC}



- výhoda: susceptance může být plynule řízena
- nevýhoda: omezení pracovního rozsahu a nízká dynamika



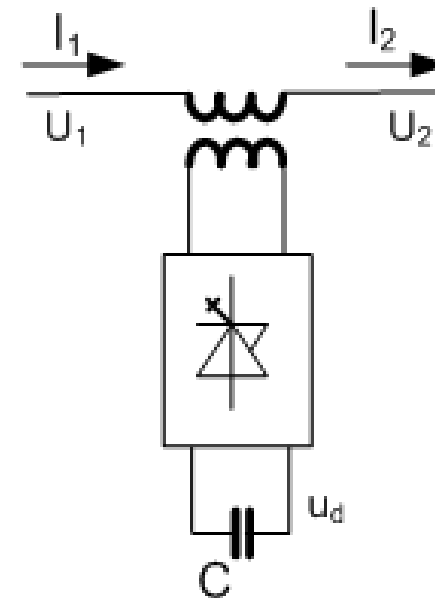
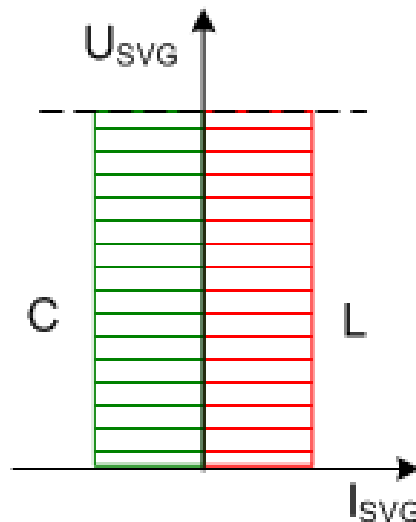
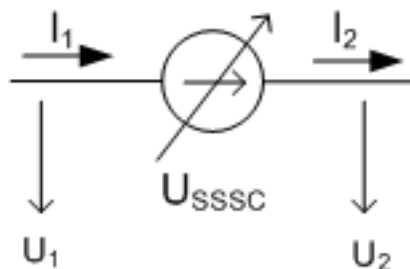
- **Static Synchronous Compensator**
- synchronní kompenzátor
- jako SVG (Static VAr Generator) s vypínatelnými polovodičovými součástkami (IGCT)
- může dodávat stálý jalový výkon téměř v celém pracovním rozsahu, nezávisle na svorkovém napětí





SSSC

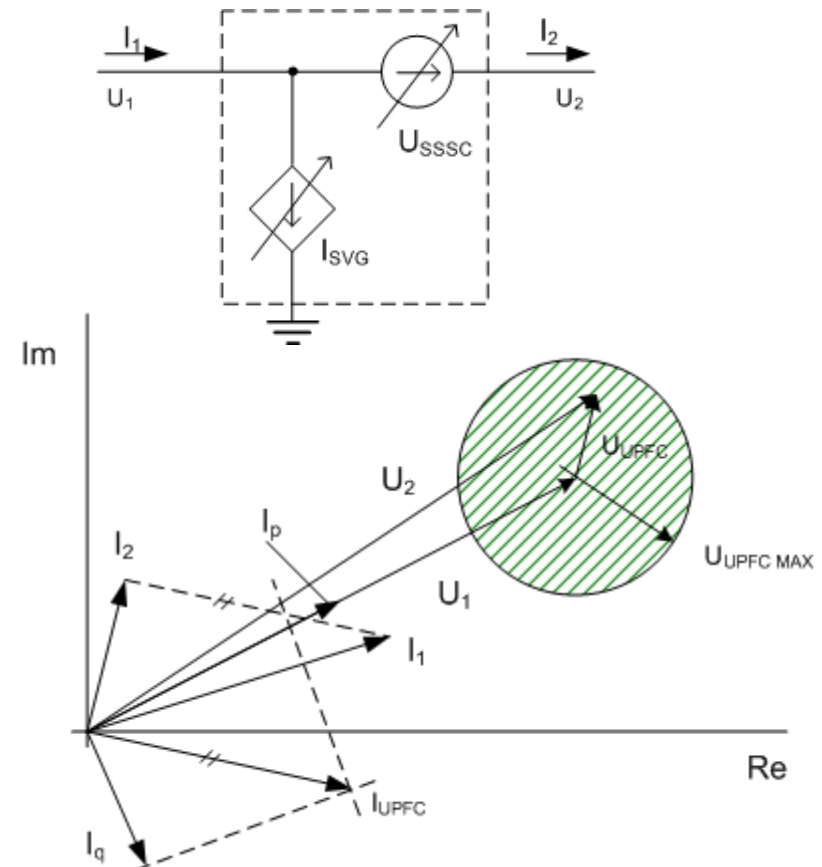
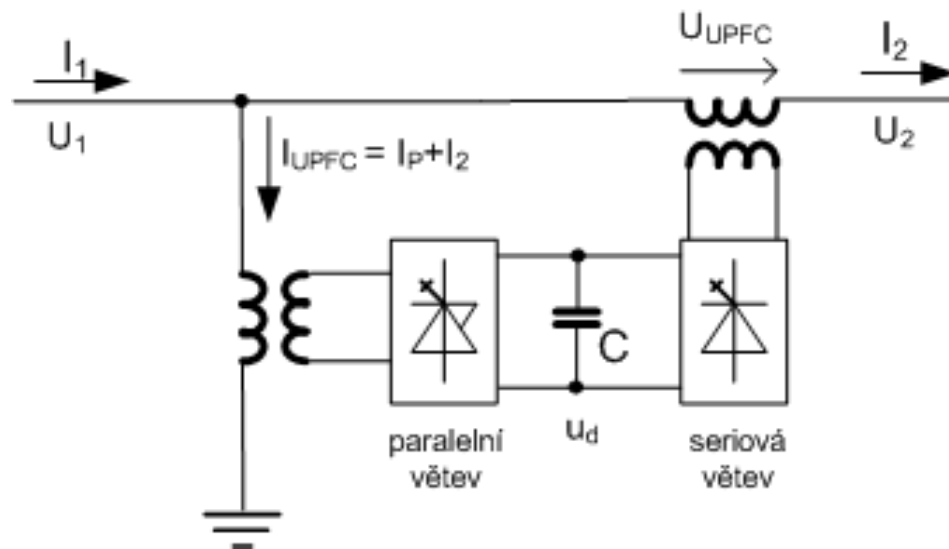
- Static Synchronous Series Compensator
- nezávislý zdroj napětí zapojený sériově do sítě
- injekcí napětí U_{SSSC} lze měnit reaktanci sítě a tím i regulovat tok výkonů
- lepší dynamika a harmonická napětí než u klasické kompenzace s tyristorově spínanými nebo řízenými kondenzátory nebo induktory





UPFC

- Unified Power Flow Controller
- univerzální regulátor toku výkonu
- řídícími veličinami u UPFC jsou napětí U_{UPFC} (velikost i fáze) a velikost I_q





UPQC

- Unified Power Quality Conditioner
- UPFC + filtr + kompenzátor
- sériová větev –zamezení průniku VH napětí, flickeru a nesouměrností napětí
- paralelní větev - absorpce VH proudů, kompenzace jalového výkonu a zpětných složek

