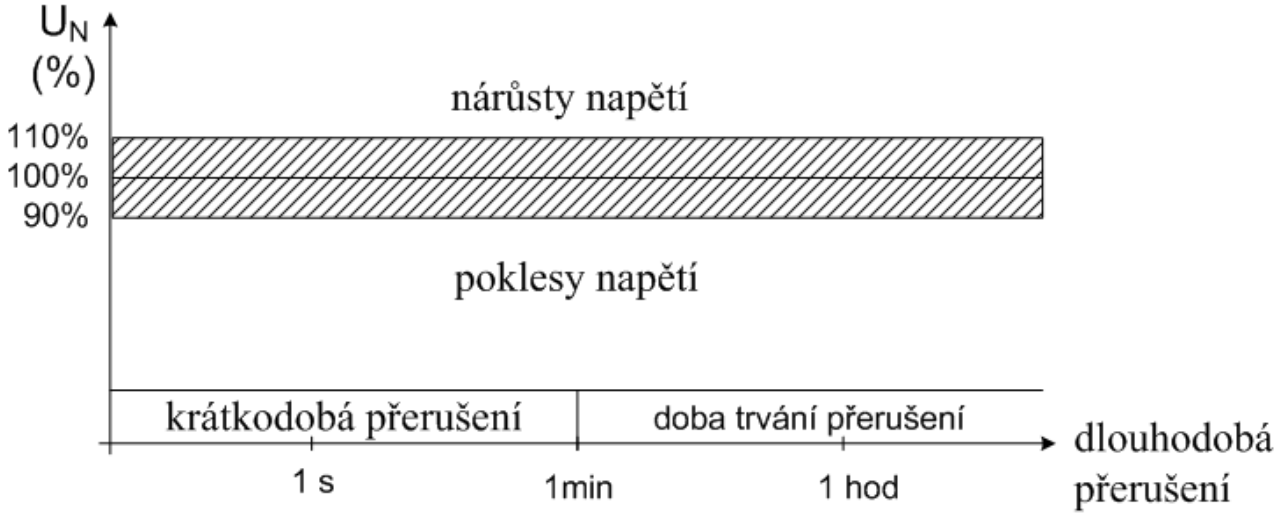
České vysoké učení technické v Praze
Fakulta elektrotechnická
Katedra elektroenergetiky

Kolísání napětí, flicker, napěťová nesymetrie

A0M15EZS – Elektrické zdroje a soustavy

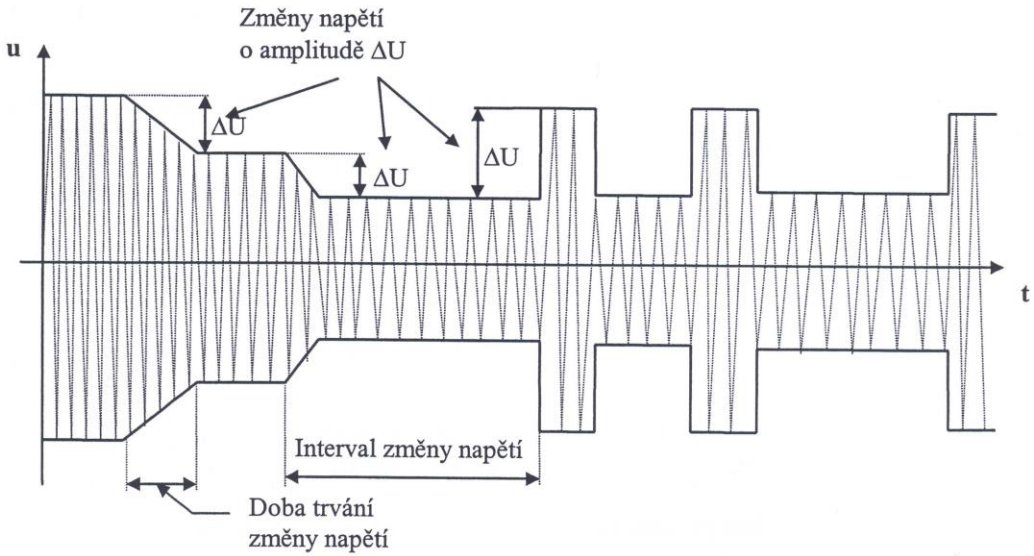
Kolísání napětí – základní pojmy

- **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



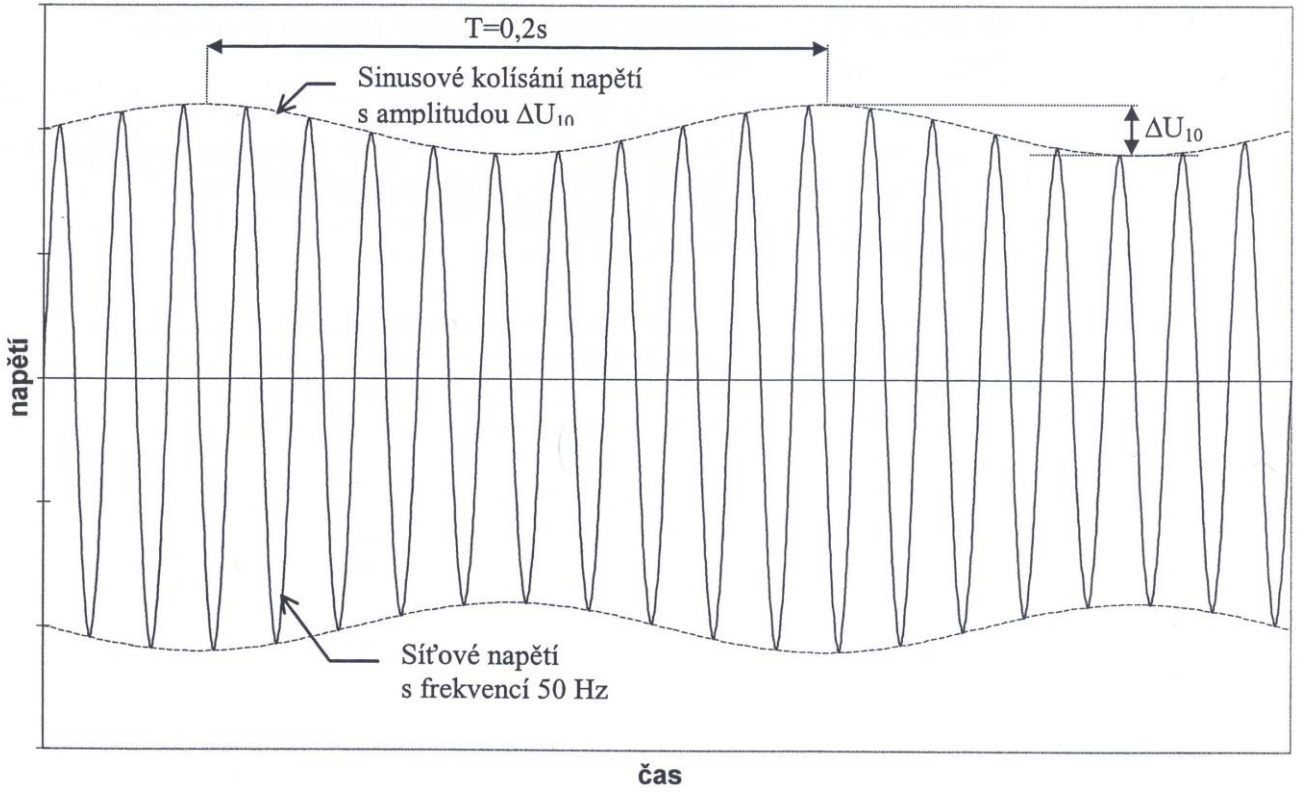
Kolísání napětí – základní pojmy

- **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 8,8Hz 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
- tímto se zabývají normy pro omezování kolísání napětí a flickeru
- **u zařízení jednotlivých odběratelů je nutné ověřit**, zda změny zátěže, vyvolané zařízeními způsobující časté zapínání či vypínání velké zátěže, nevedou k nepřístupným hodnotám flickeru
- dodržení tolerančního pásma dle IEC pro pravoúhlé změny je limitem hodnota 3 %
- pro kolísání napětí s kmitočtem okolí 18 Hz je rozhodujícím kritériem flicker a z hlediska kolísání napětí je mezní hodnota přibližně 0,3 %

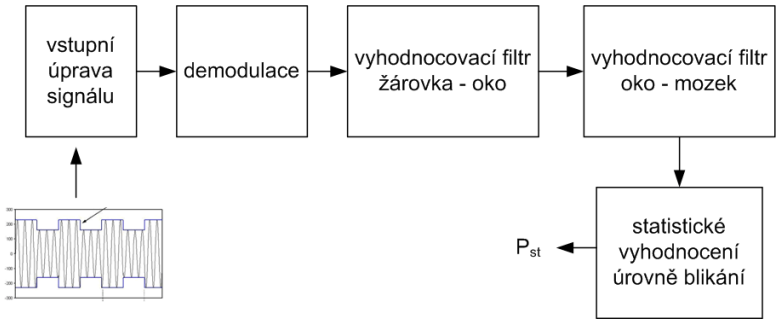
Hodnocení flickeru u žárovky

- **Je tendence zrušit výrobu a prodej žárovek. Jak se to projeví na hodnocení flickeru?**
  - 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:

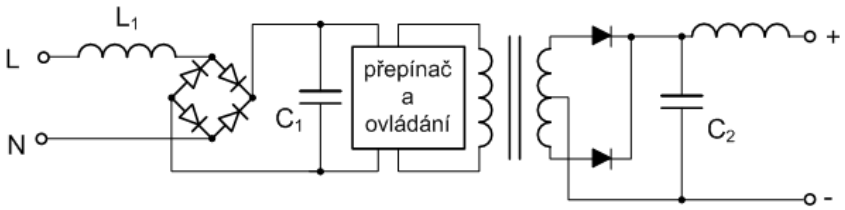
$$\Phi \approx U^{y}$$

y → od 3,1 do 3,7

- napěťová tolerance ± 10 % U_N : - 10 % U_N → 207 V ~ 70 % Φ_N
  + 10 % U_N → 253 V ~ 140 % Φ_N



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



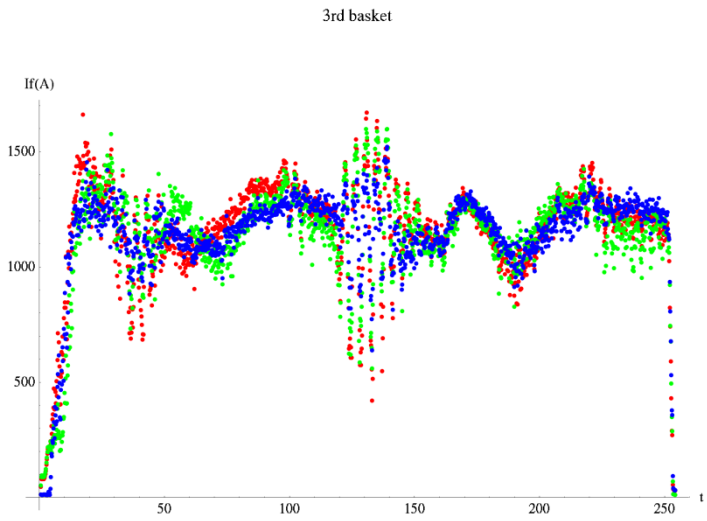
Důvody vzniku flickeru

- 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

EOP – začátek tavby

Začátek tavby:

- přechodné děje
- různé typy zkratu
- změny proudu 1. typu - vznikají proudové impulsy (0,5 až 1krát za sekundu)
- změny proudu 2. typu - velikost proudu kolísá v rozmezí 15 až ± 50 % I_N (nelze přesně definovat četnost a amplitudy)



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}:

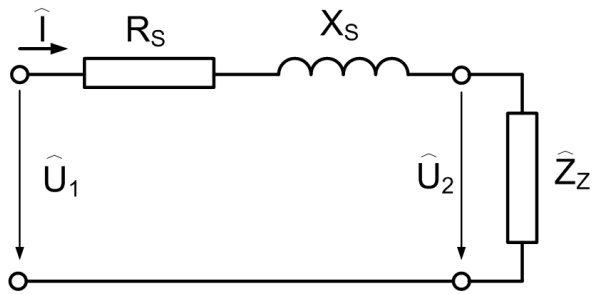
$$d = 1 - abs\left[\frac{R_{odb.} + jX_{odb.}}{R_{kv} + R_{odb.} + j\left(X_{kv} + X_{odb.}\right)}\right]$$

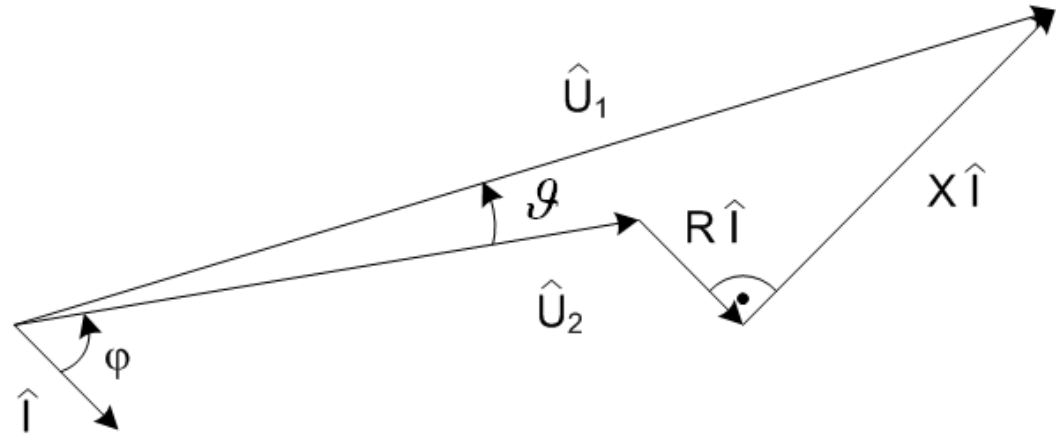
- relativní změna lze určit na základě změny činného a jalového výkonu:

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

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

Matematický model flickeru





$$U_2 = |U_1| - \left(I_č.R_S + I_j.X_S\right) = |U_1| - \frac{1}{3.U*}\cdot\left(P.R_S + Q.X_S\right)$$

$$\delta U \cong \frac{1}{3\cdot U*}\cdot\left(\delta P.R_S + \delta Q.X_S\right) = \Delta I_č.R_S + \Delta I_j.X_S = \delta\left(\Delta U\right)$$

Výpočet rušivého činitele flickeru

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

$$A_{st} = \frac{\sum t_f}{10\,\mathrm{min}} \qquad A_{lt} = \frac{\sum t_f}{120\,\mathrm{min}}$$

  - A_{st}…… střední rušivý činitel flickeru během 10 minut (-)
  - A_{lt} …… dlouhodobý rušivý činitel flickeru během 120 minut (-)
  - t_f …….. doba působení flickeru (min)

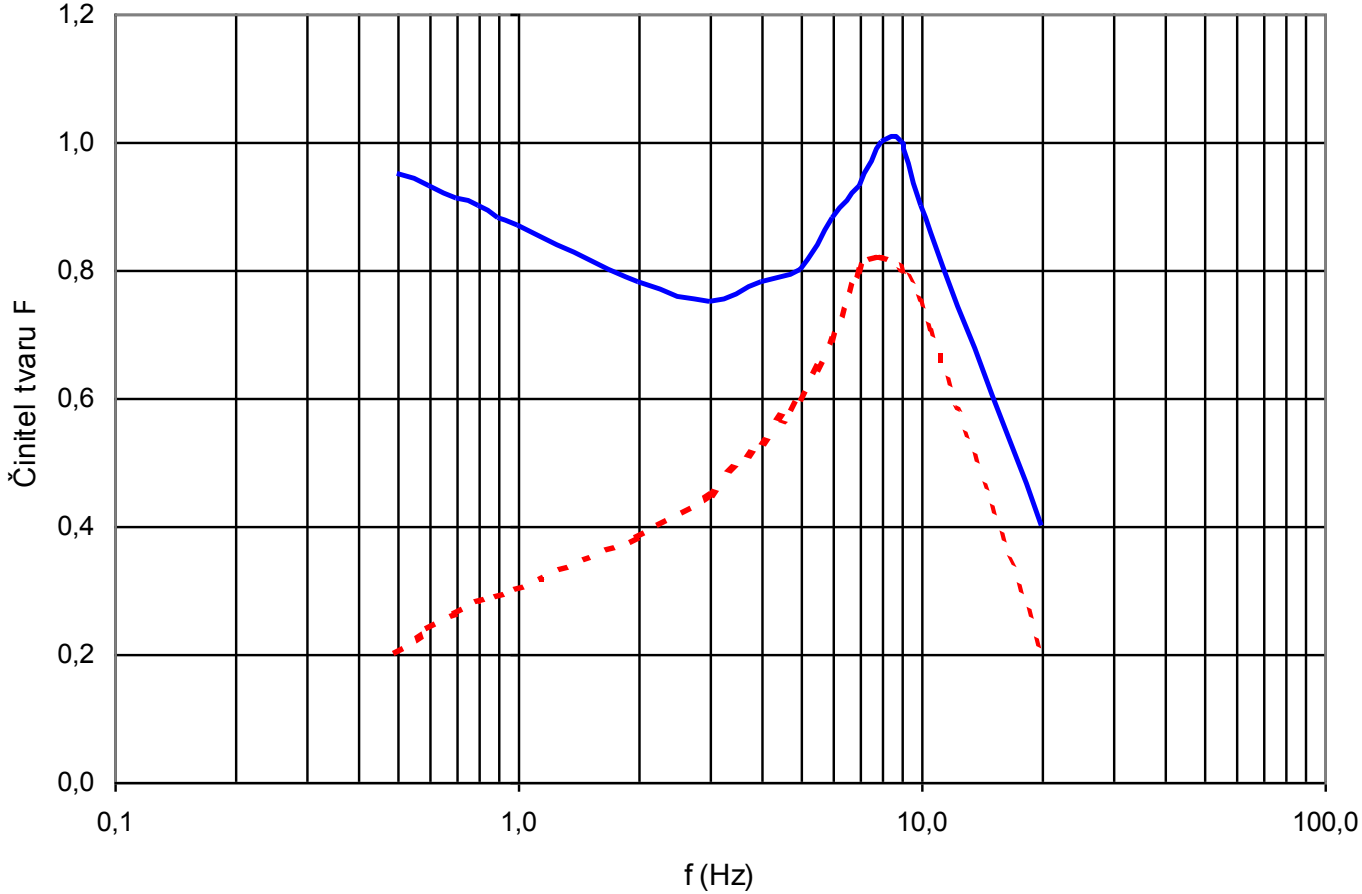
- činitelé rušení od různých zdrojů v síti se určí jako součet trvání účinku flickeru, vztaženého na sledovaný časový interval, ve kterém se kolísání napětí vyskytuje

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

Doba působení flickeru

$$t_f = 2{,}3\,(100.d.F)^3$$

- 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:

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

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	-----
	vn	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
	vn	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

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

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

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

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

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

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

Příklad výpočtu činitele tvaru

Kontrolní přibližný výpočet činitele tvaru

- v případě, že na vstup měřiče blikání přivedeme modulovaný signál s parametry dle tabulky, tak krátkodobá míra vjemu blikání má mít hodnotu **Pst = 1**

1. nejdříve vypočteme odpovídající krátkodobý činitel rušení A_{st}, pro který platí:

$$A_{st} = P_{st}^{3} = 1^{3} = 1$$

2. z tabulky si vybereme testovací signál se 110 změnami za minutu tzn., že relativní změna napětí bude mít hodnotu (určíme z tabulky):

$$d_{\%} = \frac{\Delta U}{U} = 0{,}725\% \qquad \Rightarrow$$

$$d = \frac{d_{\%}}{100} = \frac{0{,}725}{100} = 0{,}00725$$

Změny za minutu	ΔU/U (%)
1	2,724
2	2,211
7	1,459
39	0,906
110	0,725
1620	0,402

Příklad výpočtu činitele tvaru

3. nyní určíme dobu účinků flickeru:

$$A_{st} = \frac{\sum t_f}{10\,\mathrm{min}} \quad \Rightarrow \quad \sum t_f = A_{st} \cdot 10\mathrm{min} = 1 \cdot 10\mathrm{min} = 10\mathrm{min}$$

4. pro 110 změn za minutu dostaneme 1100 změn za 10 minut tzn., že i po tuto dobu bude působit flicker; z toho pak dostaneme dobu jednoho cyklu flickeru:

$$\sum t_f = 1100 \cdot t_f \quad \Rightarrow \quad t_f = \frac{\sum t_f}{1100} = \frac{10}{1100} \cong 9{,}1 \cdot 10^{-3}\ \mathrm{min} = 0{,}55\,s$$

5. pro závěrečnou kontrolu určíme kmitočet změn:

$$f = \frac{110\mathrm{min}^{-1}}{2} = \frac{1{,}83^{-1}\mathrm{s}}{2} = 0{,}92\,\mathrm{Hz}$$

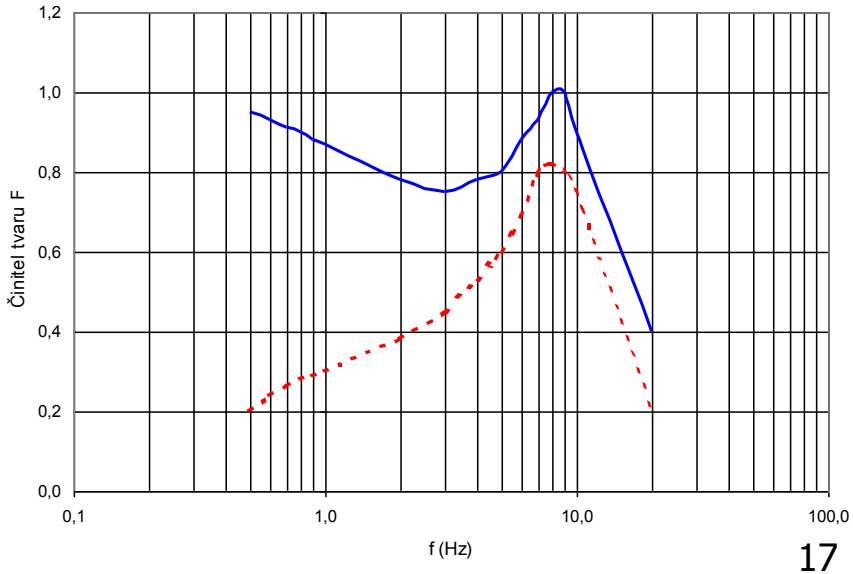
Příklad výpočtu činitele tvaru

6. v posledním kroku výpočtu určíme činitel tvaru *F*, pro který můžeme psát:

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

$$\Rightarrow \quad F = \sqrt[3]{\frac{t_f}{2{,}3 \cdot 100^3 \cdot d^3}} = \sqrt[3]{\frac{0{,}55}{2{,}3 \cdot 100^3 \cdot 0{,}00725^3}} = 0{,}86$$

- na závěr provedeme srovnání s hodnotou činitele tvaru pro pravoúhlé periodické změny dle obrázku po odečtení z grafu získáme hodnotu *F* = 0,86
- kdybychom chtěli vypočítat konkrétní činitel vnímání kolísání, tak budeme postupovat tak, že nejdříve z obrázku odečteme příslušný činitel tvaru a potom obrátíme postup výpočtu v uvedeném příkladě

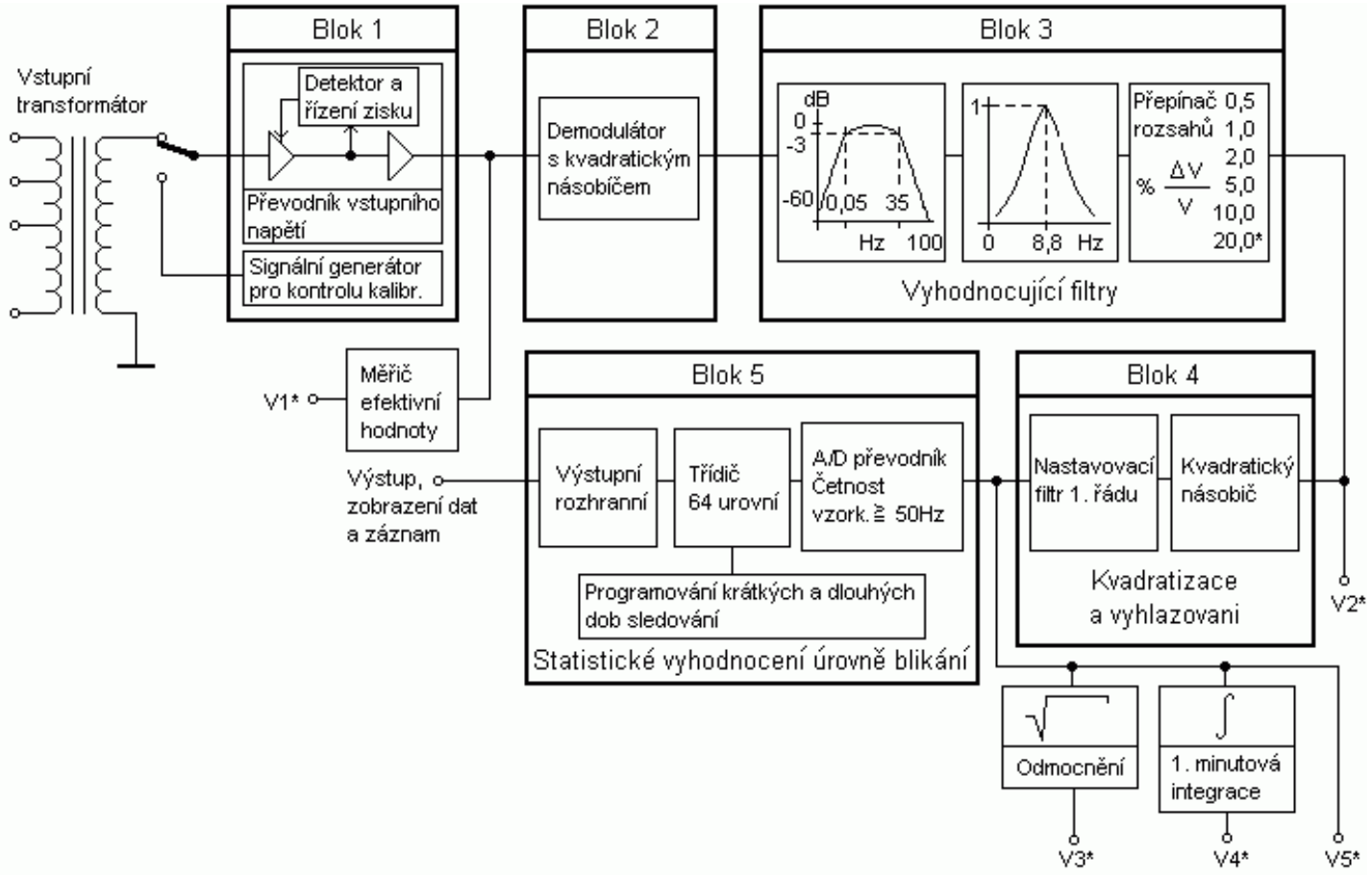


Opatření ke zmírnění flickeru

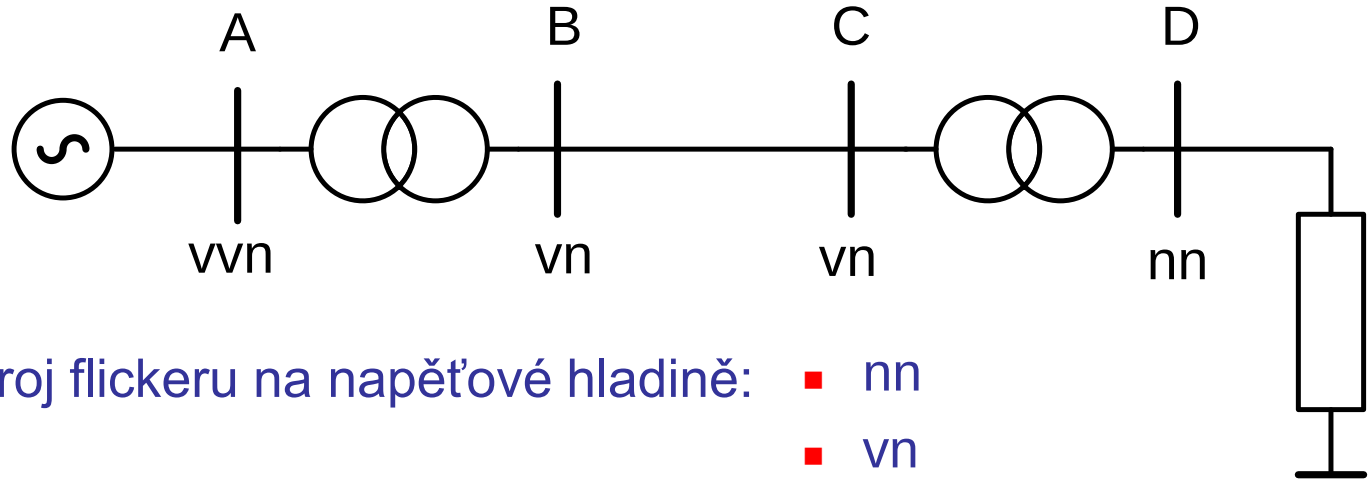
- připojení zařízení způsobující flicker do sítě s vyšším zkratovým výkonem
- zvětšení průřezu napájecího vedení
- snížení potřeby jalového výkonu
- kompenzace aktivními filtry
- připojení nového generátoru či synchronního kompenzátoru

Měření flickeru

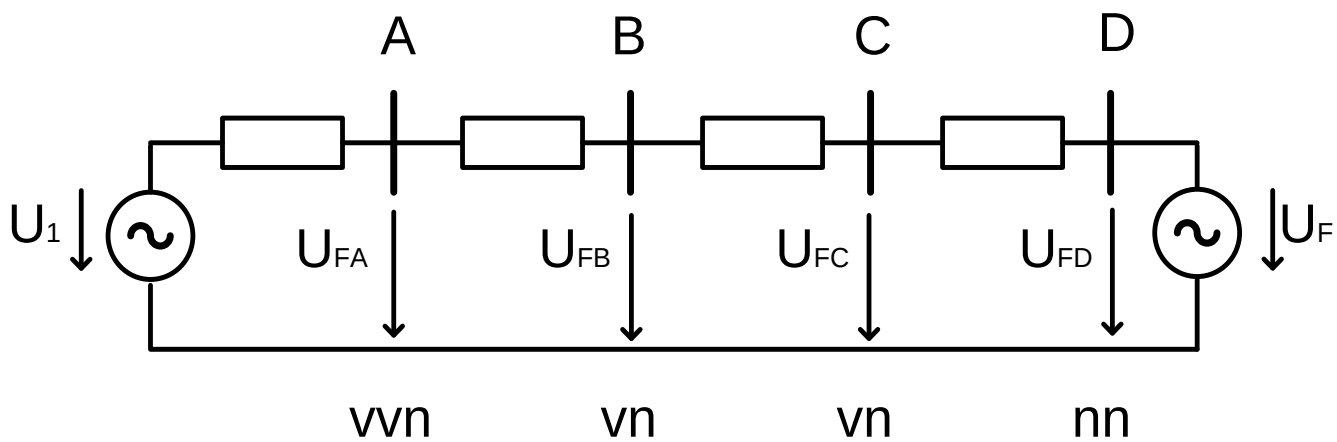
- měřící přístroj v sobě obsahuje matematický model podle UIE/IEC simulace odezvy 60 W žárovka – zrakový orgán včetně statistického vyhodnocování



Příklad šíření flickeru v ES



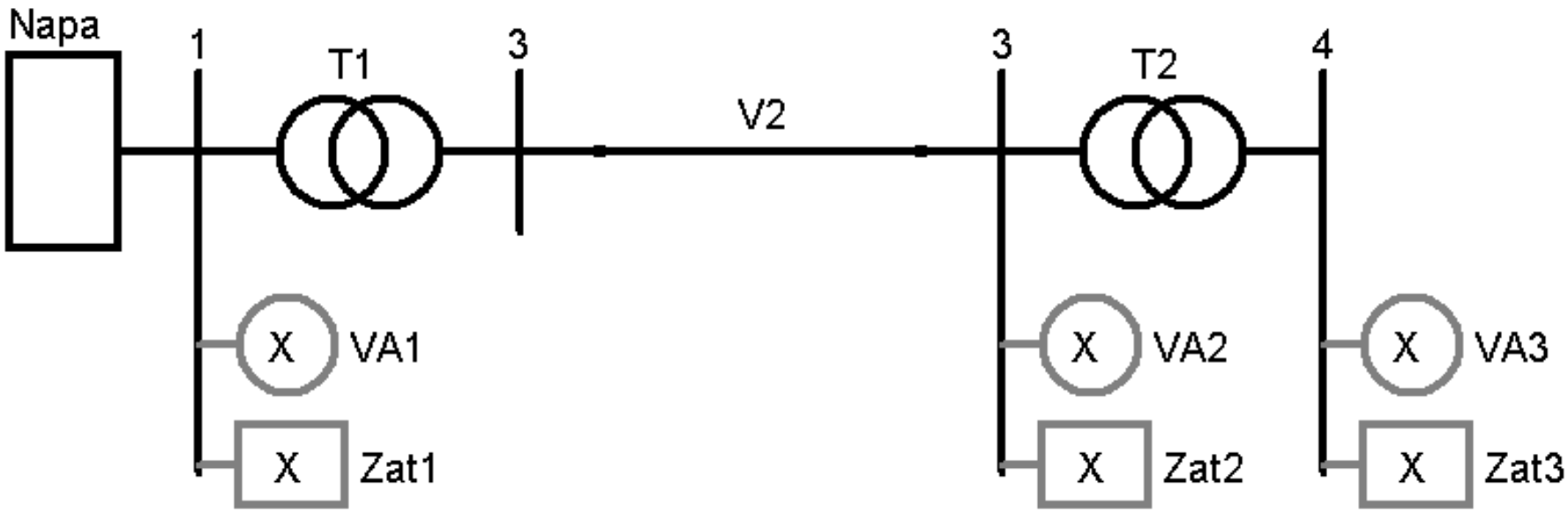
- zdroj flickeru na napěťové hladině:
  - nn
  - vn
  - vvn



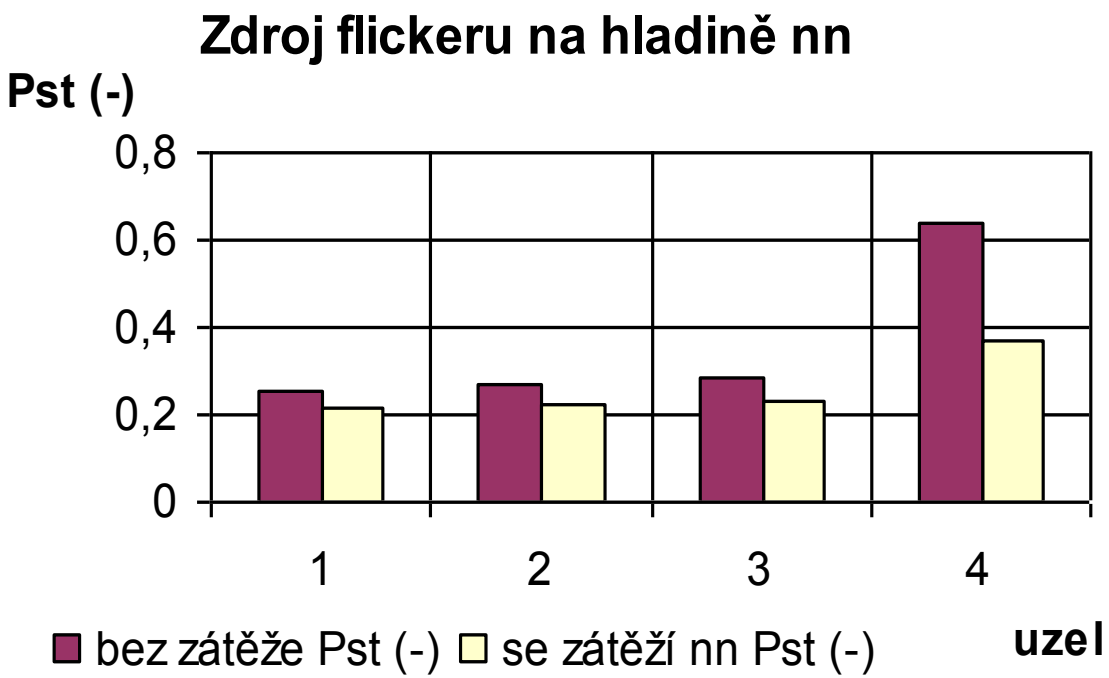
$$U_{FA} : U_{FB} : U_{FC} = \frac{1}{S_K^{(A)}} : \frac{1}{S_K^{(B)}} : \frac{1}{S_K^{(C)}}$$

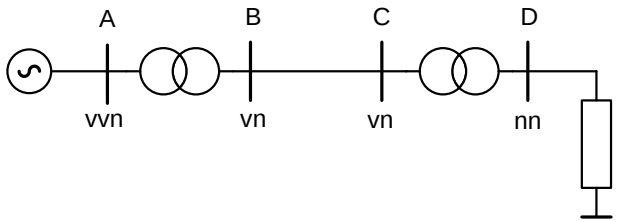
Příklad šíření flickeru v ES

- příklad šíření flickeru lze řešit pomocí prg. E-Vlivy:



Příklad šíření flickeru – zdroj na hladině nn

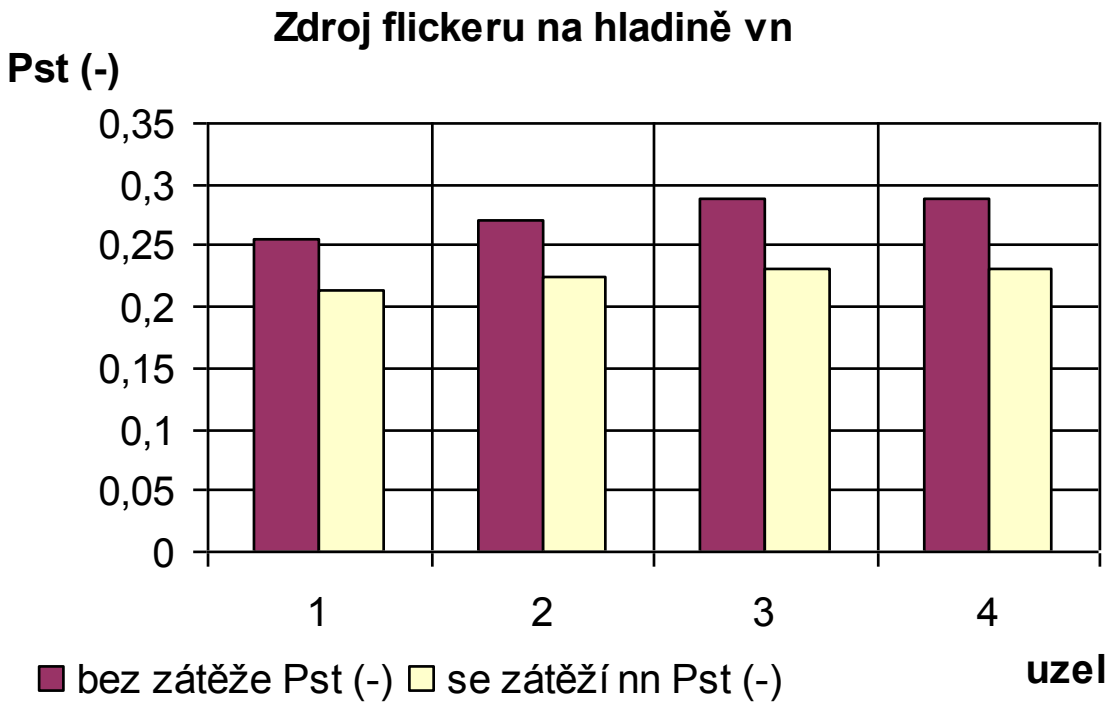


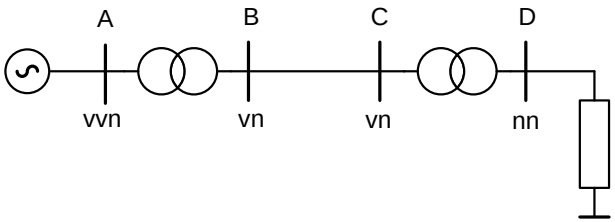


$$U_{FA} : U_{FB} : U_{FC} = \frac{1}{S_K^{(A)}} : \frac{1}{S_K^{(B)}} : \frac{1}{S_K^{(C)}}$$

uzel	bez zátěže Pst (-)	se zátěží nn Pst (-)
1	0,255	0,213
2	0,271	0,224
3	0,288	0,231
4	0,635	0,366

Příklad šíření flickeru – zdroj na hladině vn

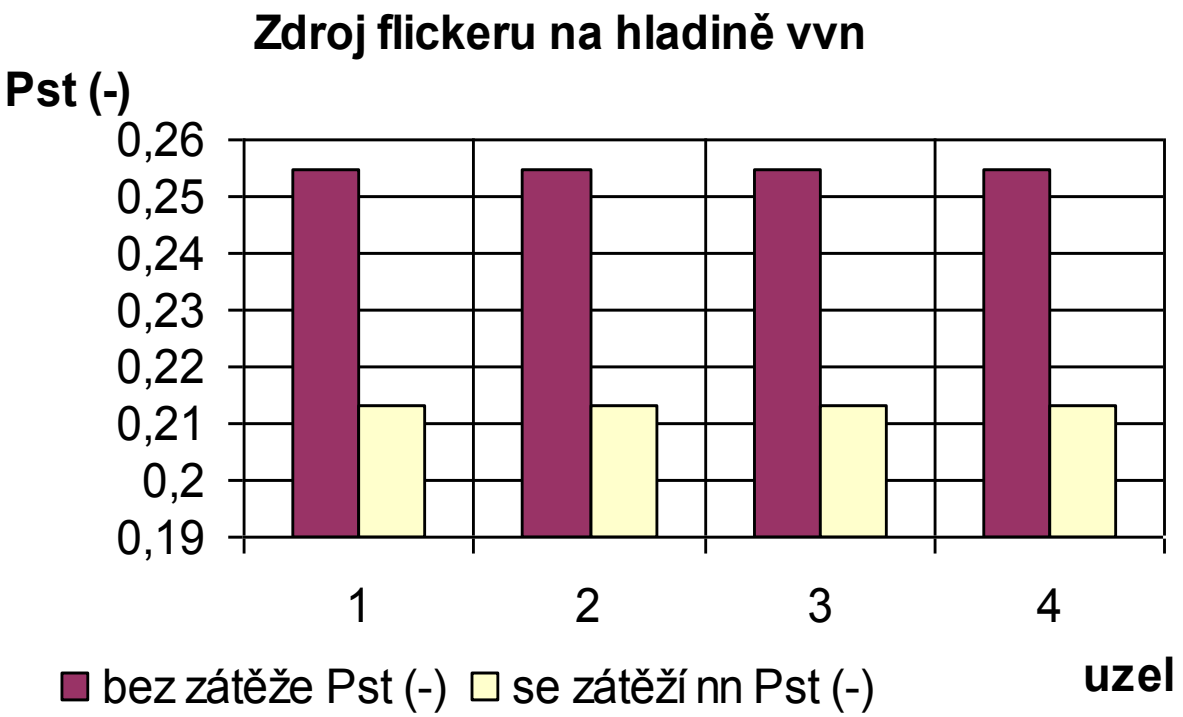


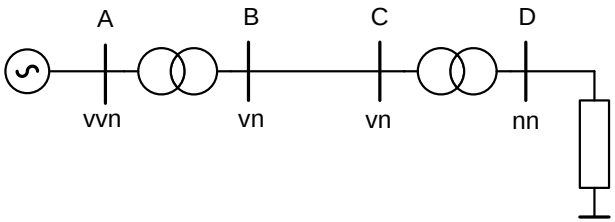


$$U_{FA} : U_{FB} : U_{FC} = \frac{1}{S_K^{(A)}} : \frac{1}{S_K^{(B)}} : \frac{1}{S_K^{(C)}}$$

uzel	bez zátěže Pst (-)	se zátěží nn Pst (-)
1	0,255	0,213
2	0,271	0,224
3	0,288	0,231
4	0,288	0,231

Příklad šíření flickeru – zdroj na hladině vvn



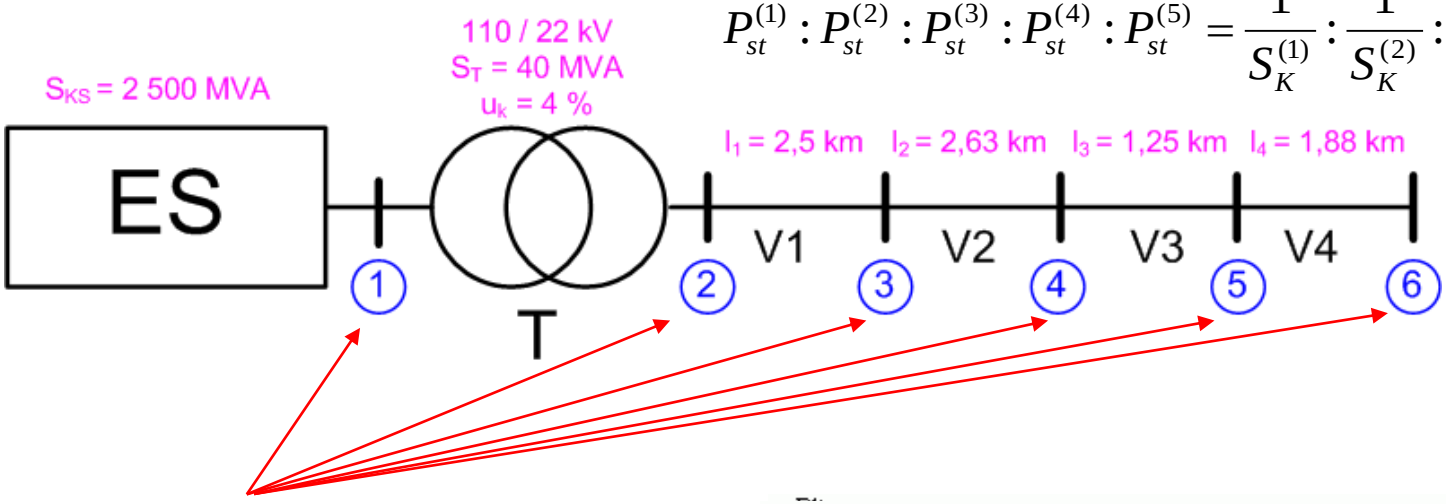


$$U_{FA} : U_{FB} : U_{FC} = \frac{1}{S_K^{(A)}} : \frac{1}{S_K^{(B)}} : \frac{1}{S_K^{(C)}}$$

uzel	bez zátěže Pst (-)	se zátěží nn Pst (-)
1	0,255	0,213
2	0,255	0,213
3	0,255	0,213
4	0,255	0,213

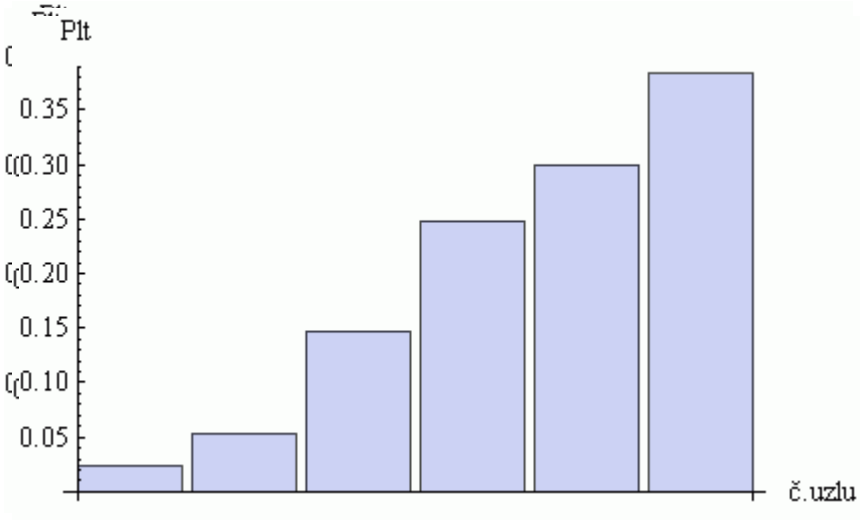
Šíření flickeru v radiální síti

$$P_{st}^{(1)} : P_{st}^{(2)} : P_{st}^{(3)} : P_{st}^{(4)} : P_{st}^{(5)} = \frac{1}{S_K^{(1)}} : \frac{1}{S_K^{(2)}} : \frac{1}{S_K^{(3)}} : \frac{1}{S_K^{(4)}} : \frac{1}{S_K^{(5)}}$$



zdroj flickeru

P_{st} = 0,5



Napěťová 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

Napěťová nesymetrie - měření

- minimální požadavek na vzorkování je 32 Sample / periodu
- nižší vzorkovací frekvence lze použít při zapojení analogového filtru, který potlačí vyšší harmonické
- metoda je nenáročná na měřící techniku a výpočet, možnost chyby až 13%
- napěťová nesymetrie (fázové hodnoty napětí):

$$u_u = \frac{\max\left[\overline{U} - U_i\right]}{\overline{U}}$$

$$u_u = \left|\frac{\hat{U}_a + \hat{a}^2.\hat{U}_b + \hat{a}.\hat{U}_c}{\hat{U}_a + \hat{a}.\hat{U}_b + \hat{a}^2.\hat{U}_c}\right|$$

$$\overline{U} = \frac{U_a + U_b + U_c}{3}$$

- napěťová nesymetrie (sdružené hodnoty napětí):

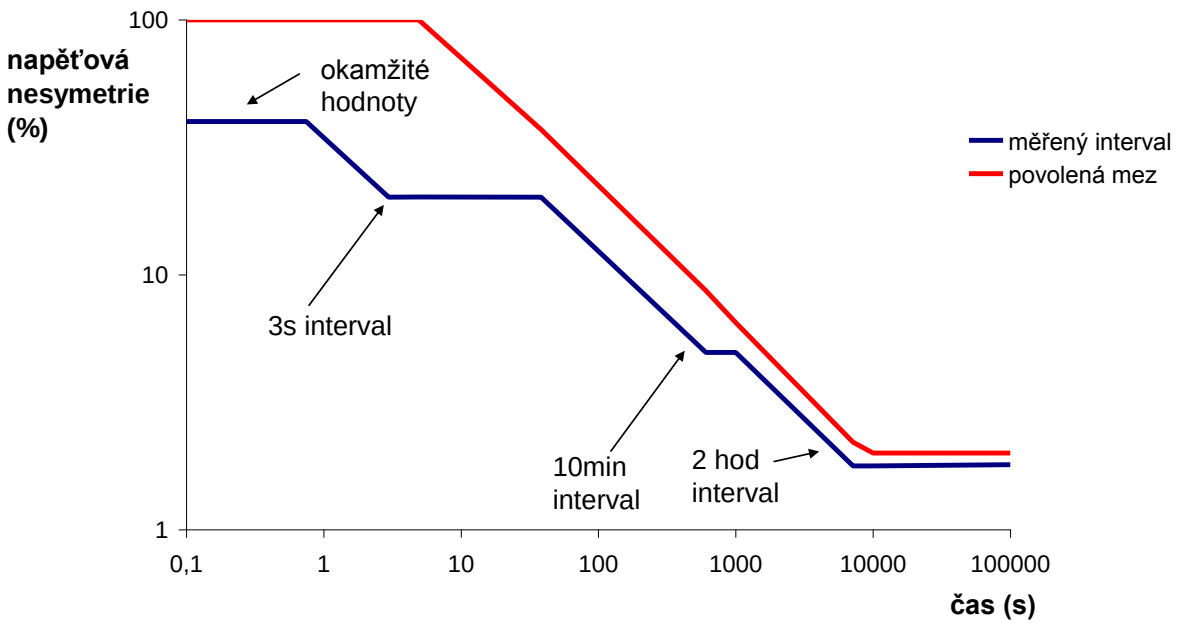
$$u_u = \left|\frac{\hat{U}_{ab} - \hat{a}.\hat{U}_{bc}}{\hat{U}_{ab} - \hat{a}^2.\hat{U}_{bc}}\right|$$

$$u_u = \sqrt{\frac{1 - \sqrt{3 - 6\beta}}{1 + \sqrt{3 - 6\beta}}} \qquad \beta = \frac{U_{ab}^4 + U_{bc}^4 + U_{ca}^4}{\left(U_{ab}^2 + U_{bc}^2 + U_{ca}^2\right)^2}$$

Napěťová nesymetrie – dlouhodobější účinky

- stanovení dlouhodobých hodnot napěťové nesymetrie u_u v různých intervalech
- CIGRE – CIRED Working Group 02 doporučuje intervaly: 3 s, 10 min a 2 hod

Přípustné hodnoty napěťové nesymetrie



$$u_{u3s} = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^{m} u_{u-i}^2}{m}}$$

$$u_{u10\min} = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^{200} u_{3s-i}^2}{200}}$$

$$u_{u2hod} = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^{12} u_{10\min-i}^2}{12}}$$

- přípustnou hodnotu napěťové nesymetrie u_u = 2 %
- přípustné hodnoty závisí i na délce vyhodnocovaného intervalu

Opatření ke snížení napěťové nesymetrie

- rozdělení jednofázové zátěže mezi fázové vodiče
- symetrizační zařízení s kondenzátory a tlumivkami
- oddělení měniči
- připojení přes usměrňovač (pozor na vznik vyšších harmonických)
- připojení k místům s vyšším zkratovým výkonem
- transformátor s lomenou hvězdou (u menších výkonů)
- použitím Scottova a nebo Steinmetzova transformátoru

Kolísání napětí, flicker, napěťová nesymetrie

Literatura

- Tlustý J.: Energetická rušení v distribučních a průmyslových sítích
- http://www.lpqi.org/
- Santarius P., Gavlas J., Kužela M.: Kvalita dodávané elektrické energie v sítích nízkého napětí
- Schlabbach J., Blume D., Stephanblome T.: Voltage Quality in Electrical Power System, 2001
- EnerGoConsult ČB, s.r.o.: E-Vlivy