

České vysoké učení technické v Praze
Fakulta elektrotechnická
Katedra elektroenergetiky



Kolísání napětí, flicker, napět'ová nesymetrie

A0M15EVS – Elektrické zdroje a soustavy

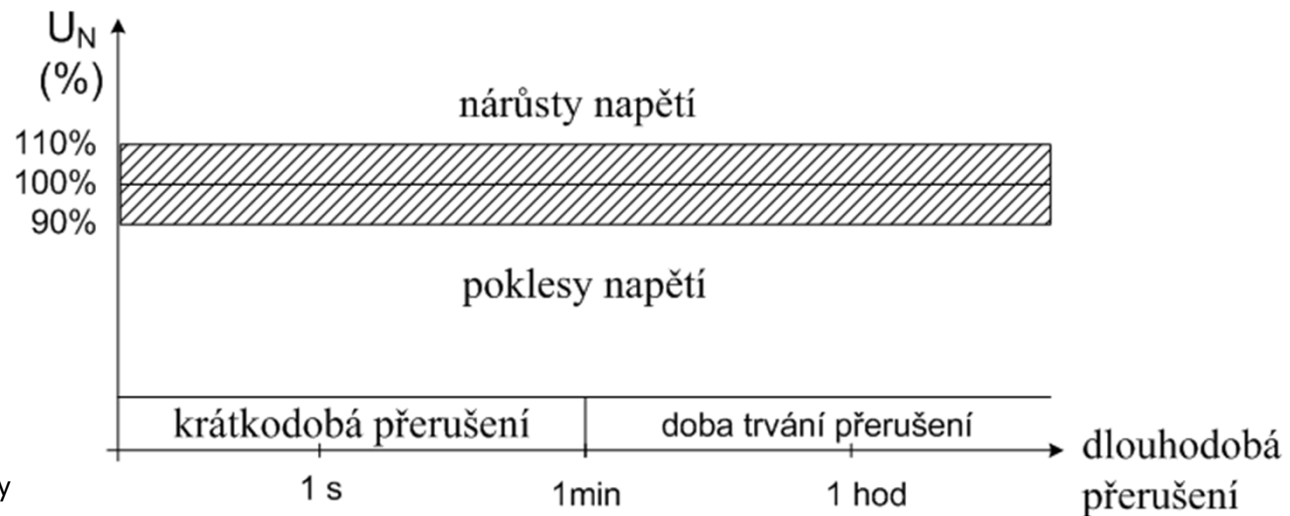
3. přednáška ZS 2011/2012

Ing. Tomáš Sýkora, Ph.D.



Kolísání napětí – základní pojmy

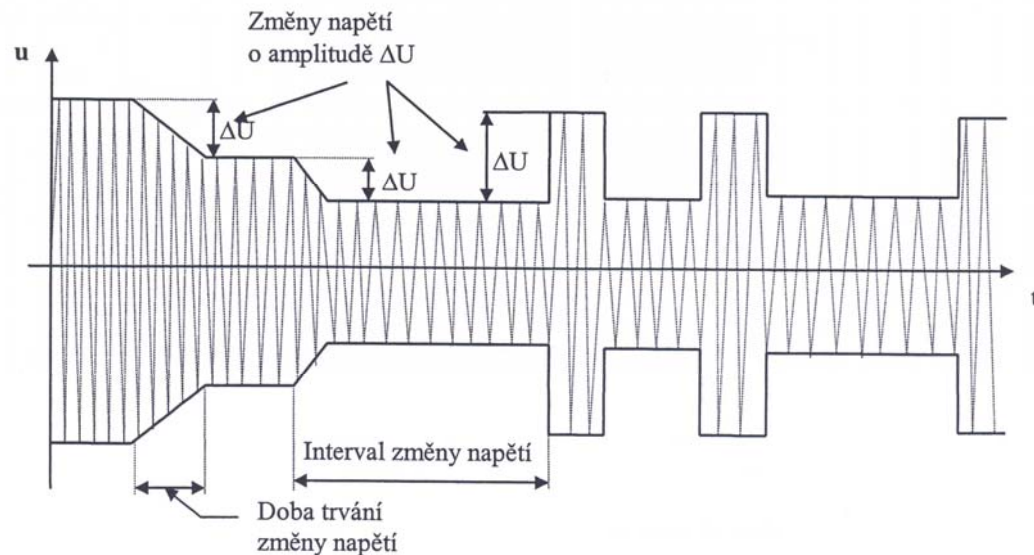
- **změna napětí** - změna efektivních (maximálních) hodnot napětí mezi dvěma sousedními úrovněmi napětí, mezi nimiž stoupá či klesá v nespecifikovaném čase
- **amplituda změny napětí** – rozdíl mezi efektivními (maximálními) hodnotami napětí před a po změně napětí
- **relativní změna napětí** – poměr 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

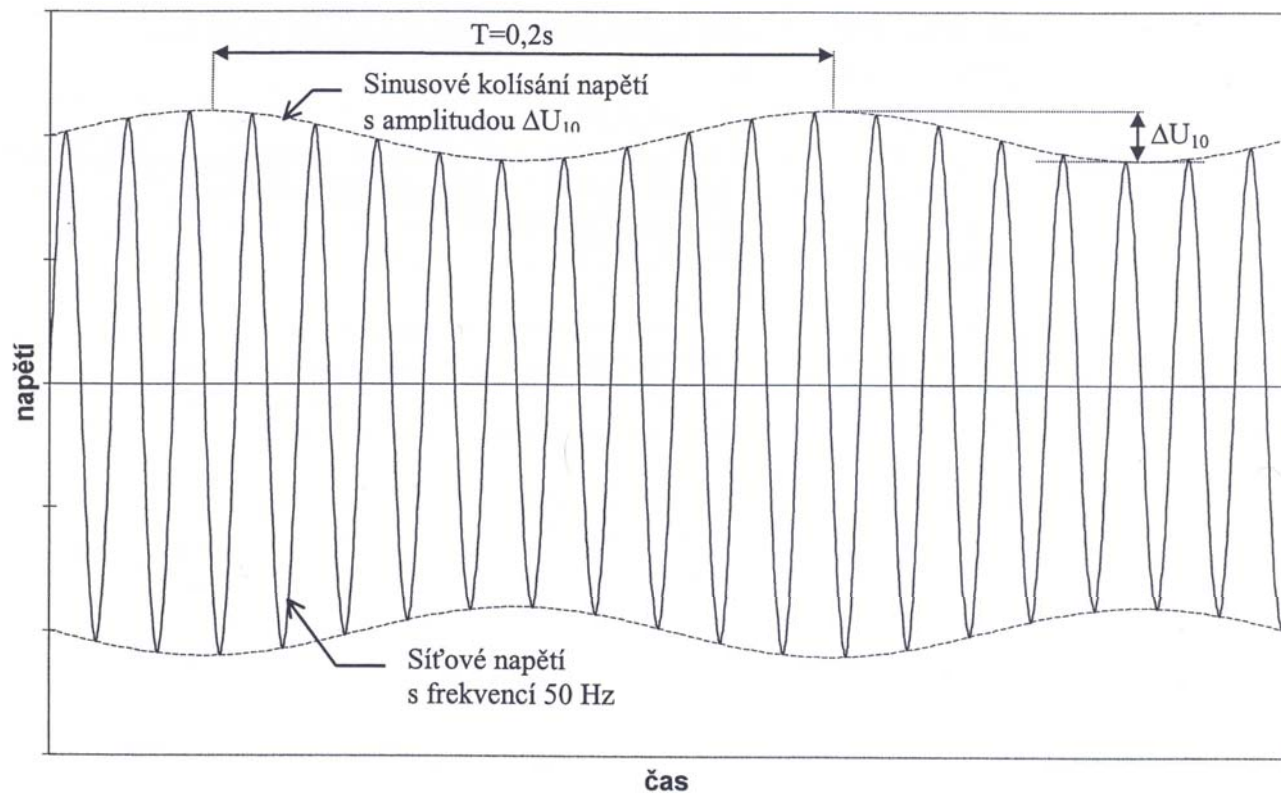
- **kolísání napětí** – série změn napětí nebo cyklická změna obálky napětí
- **sinusové kolísání napětí** – kolísání napětí, u níž je křivka kolísání sinusová
- **amplituda kolísání napětí** – rozdíl mezi maximální a minimální hodnotou napětí v průběhu kolísání napětí
- **četnost výskytu změn napětí** – 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 %



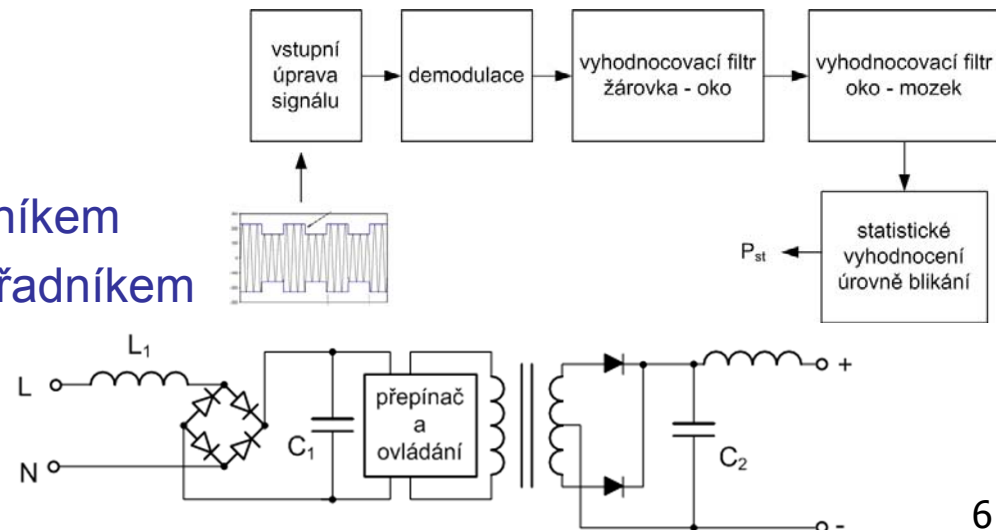
Hodnocení flickeru u žárovky

- 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:

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

- napěťová tolerance 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

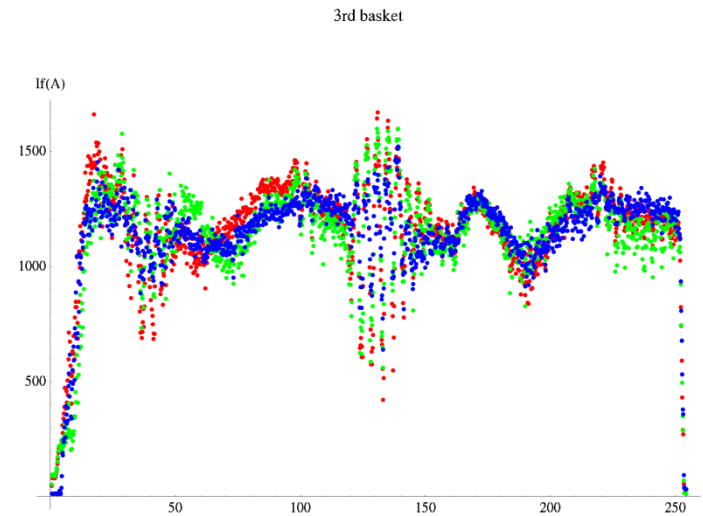
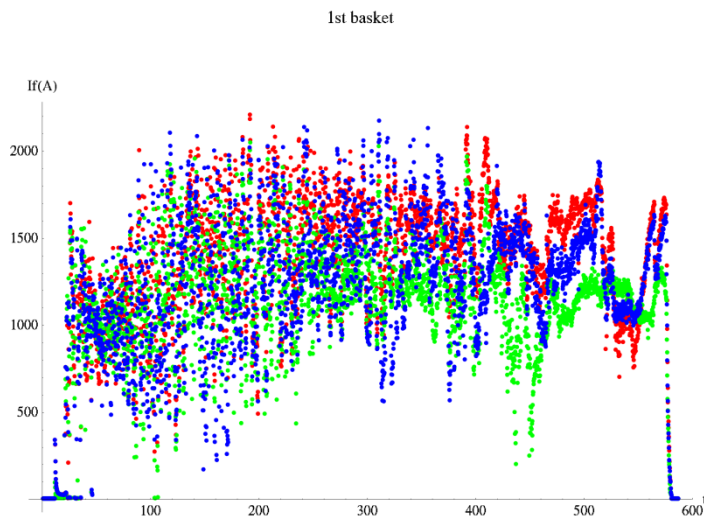
- k spínání velké zátěže
- rozběh velkých motorů
- proměnlivá zátěž (katr)
- svářecí stroje
- EOP – symetrické a nesymetrické zkraty (doba natavování vsázky)
- tyristorový měnič – různé otevírání ventilů



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 $\pm 50\%$ 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} :

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

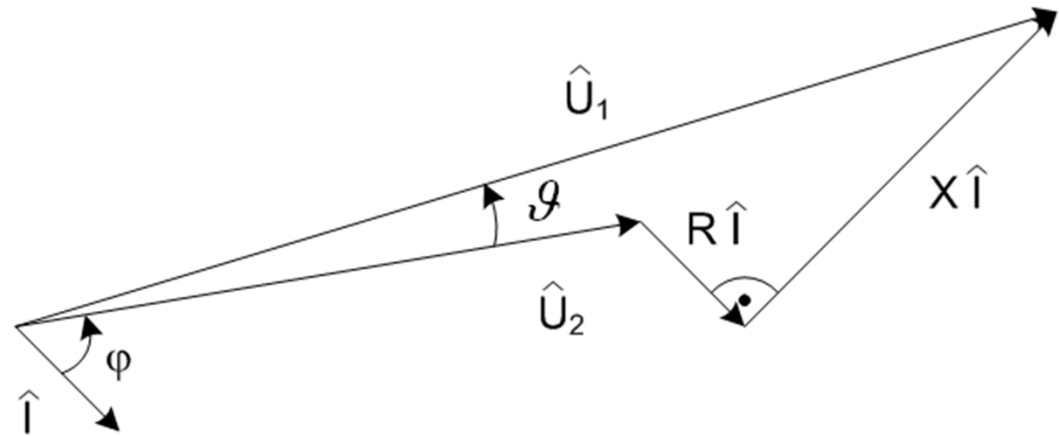
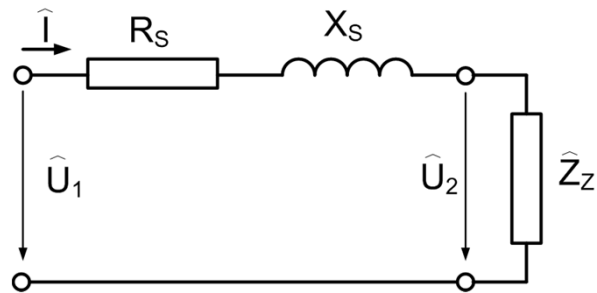
- relativní změna lze určit na základě změny činného a jalového výkonu:

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

- 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

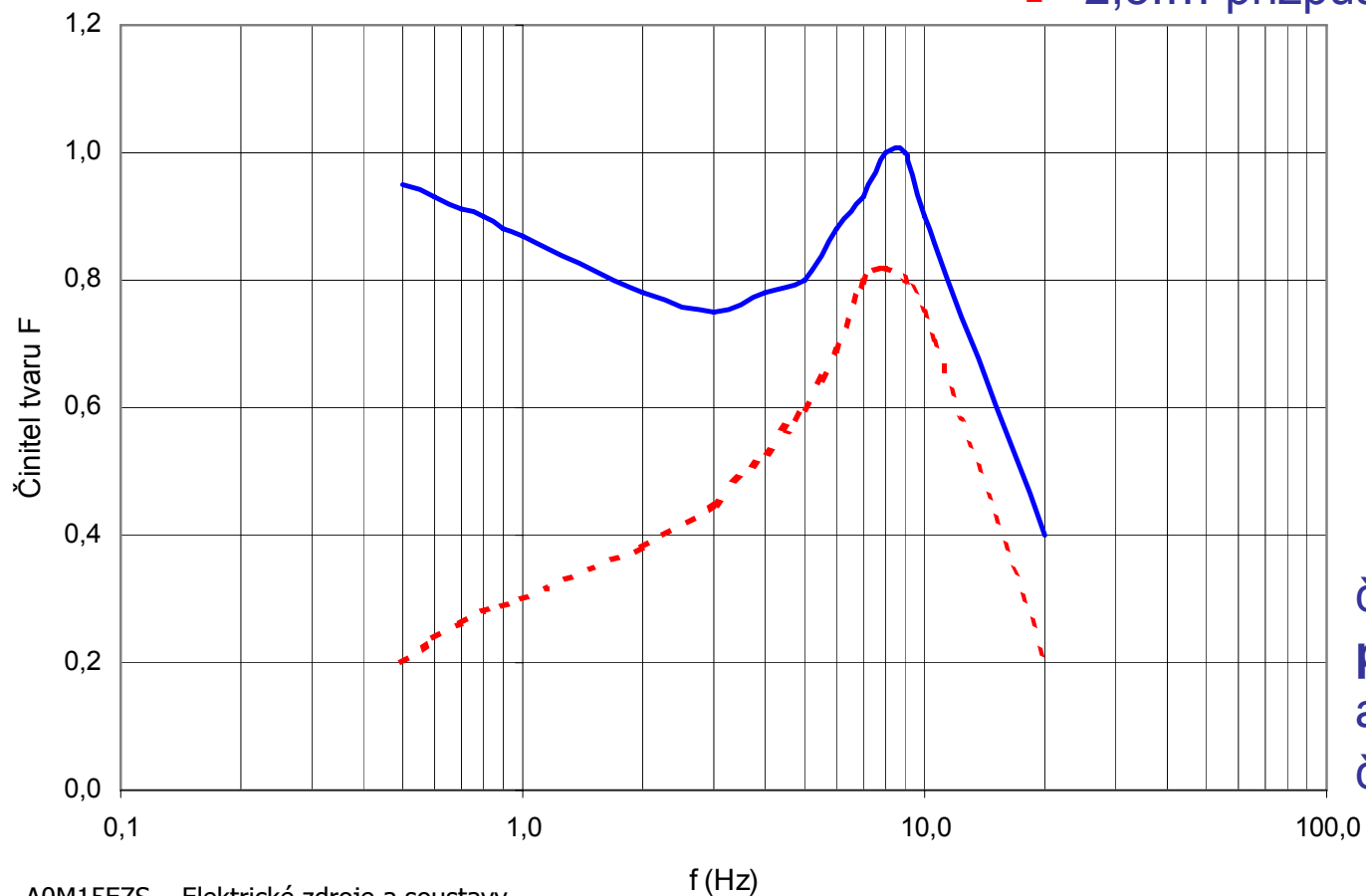
$$A_{\text{celk.}} = A_1 + A_2 + A_3 + \dots + A_N$$



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_xpercentil 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 **$P_{st} = 1$**

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):

$$d\% = \frac{\Delta U}{U} = 0,725\% \quad \Rightarrow$$

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

Změny za minutu	$\Delta U/U$ (%)
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:

$$A_{st} = \frac{\sum t_f}{10 \text{ min}} \Rightarrow \sum t_f = A_{st} \cdot 10 \text{ min} = 1 \cdot 10 \text{ min} = 10 \text{ min}$$

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:

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

5. pro závěrečnou kontrolu určíme kmitočet změn:

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



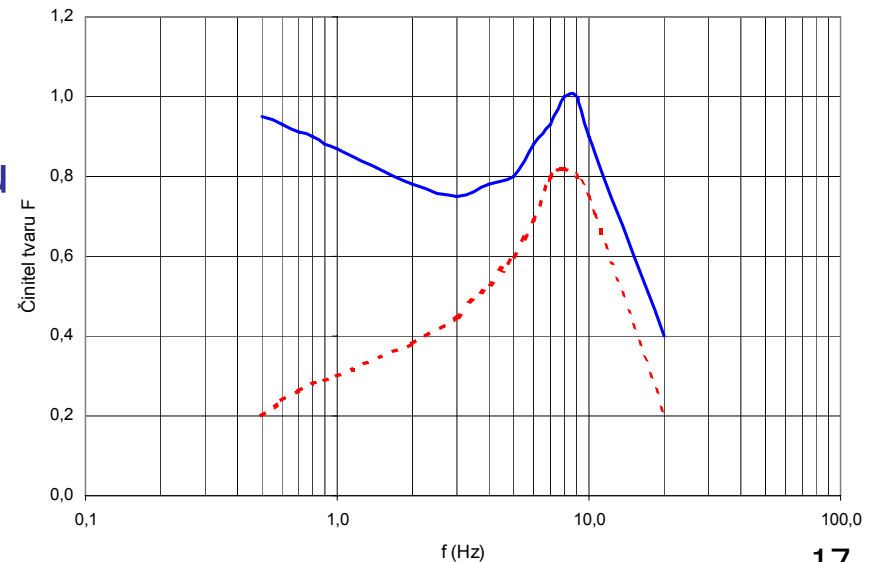
Příklad výpočtu činitele tvaru

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

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

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

- 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





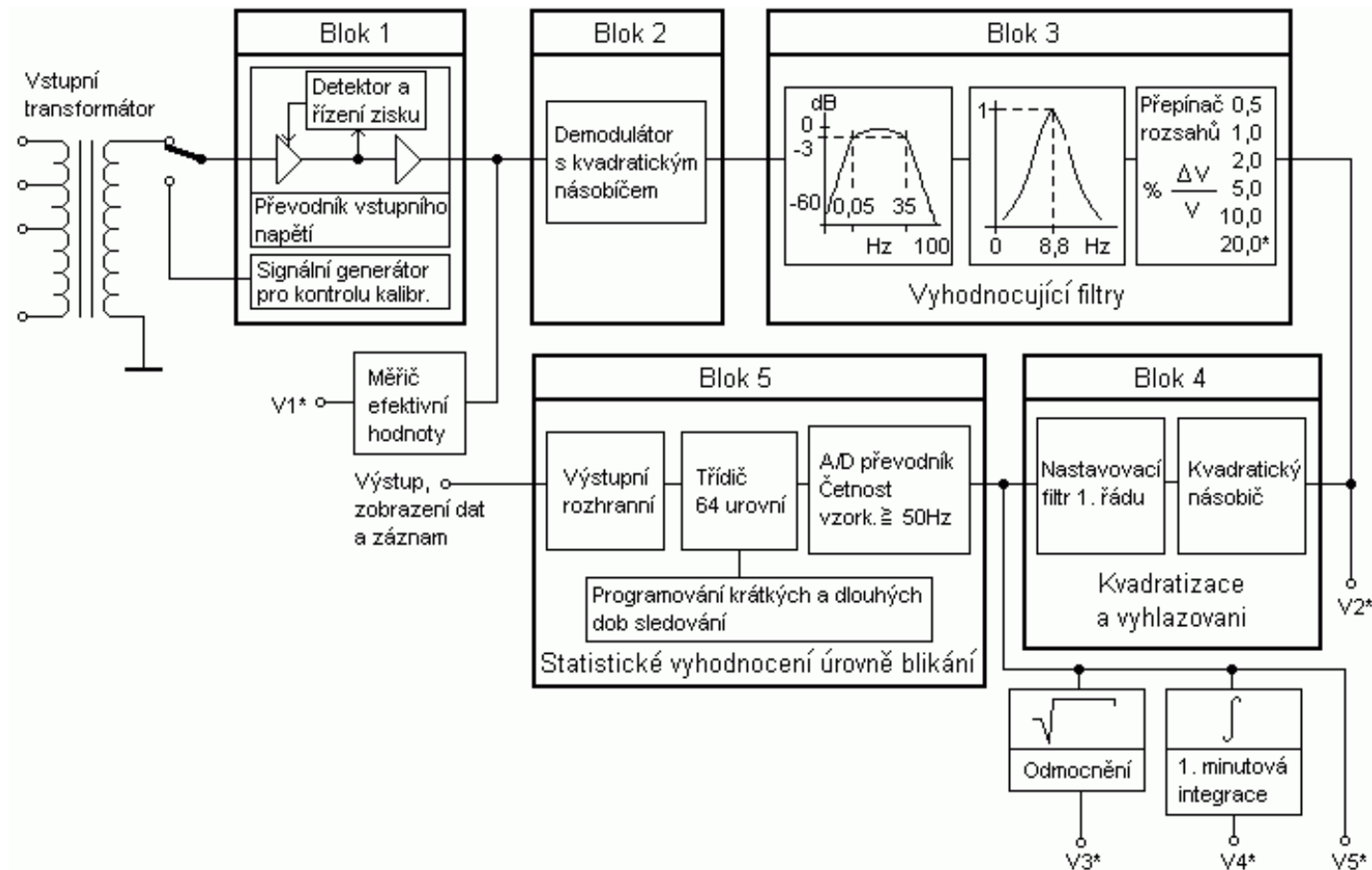
Opatření ke zmírnění flickeru

- 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



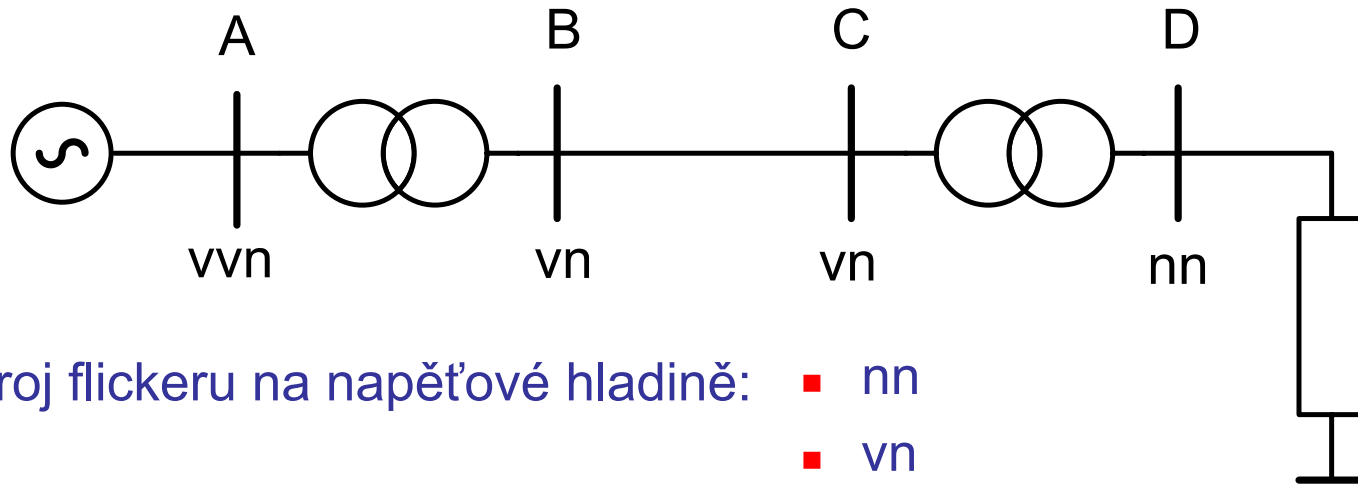
Měření flickeru

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

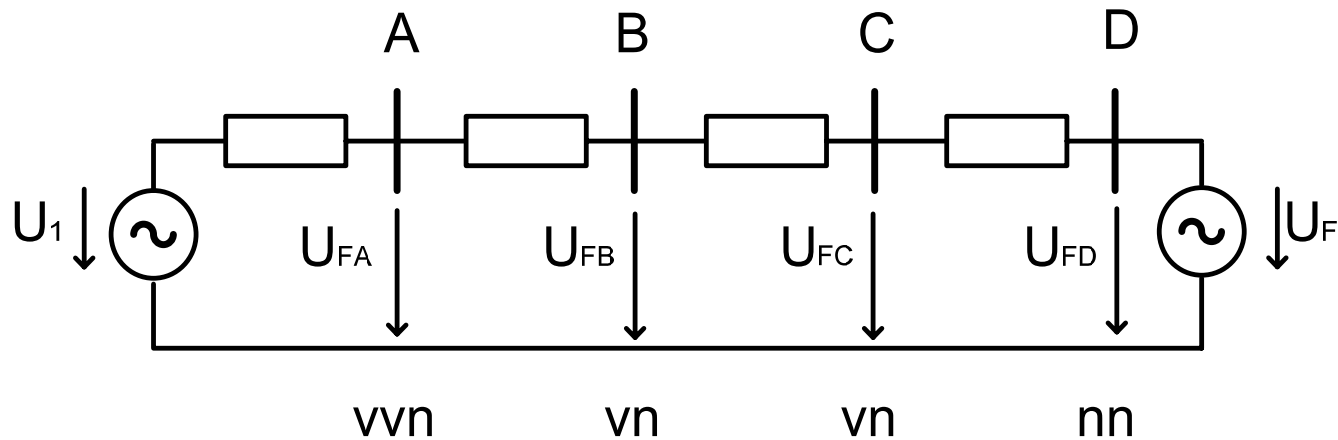




Příklad šíření flickeru v ES



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

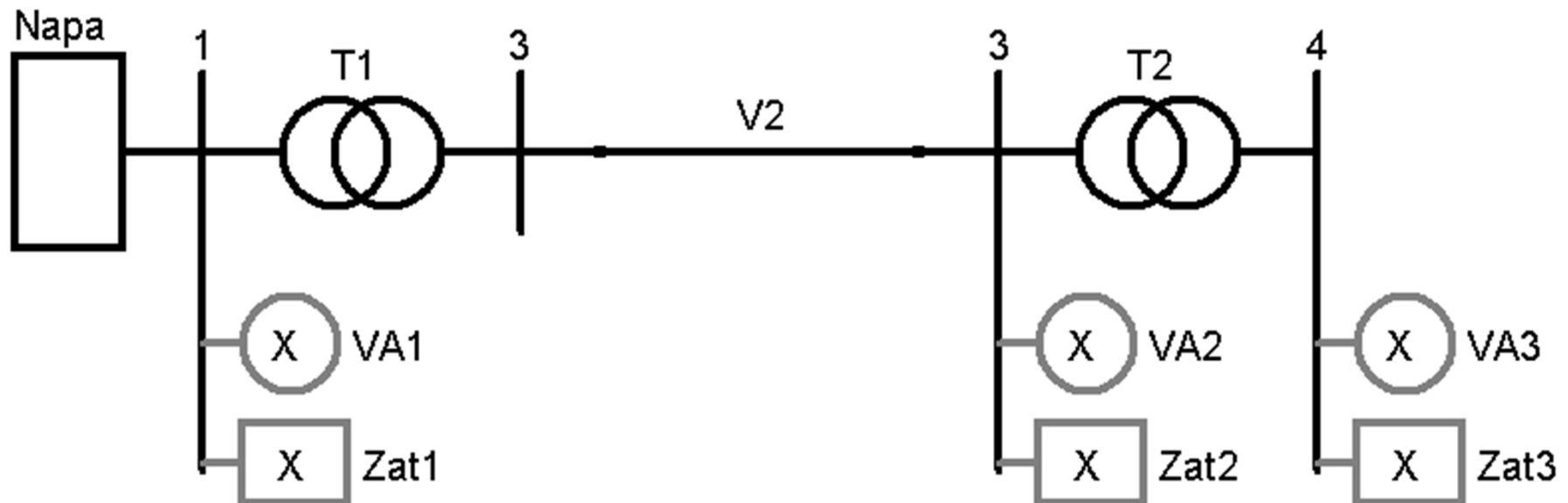


$$U_{FA} : U_{FB} : U_{FC} = \frac{1}{S_K^{(A)}} : \frac{1}{S_K^{(B)}} : \frac{1}{S_K^{(C)}}$$



Příklad šíření flickeru v ES

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

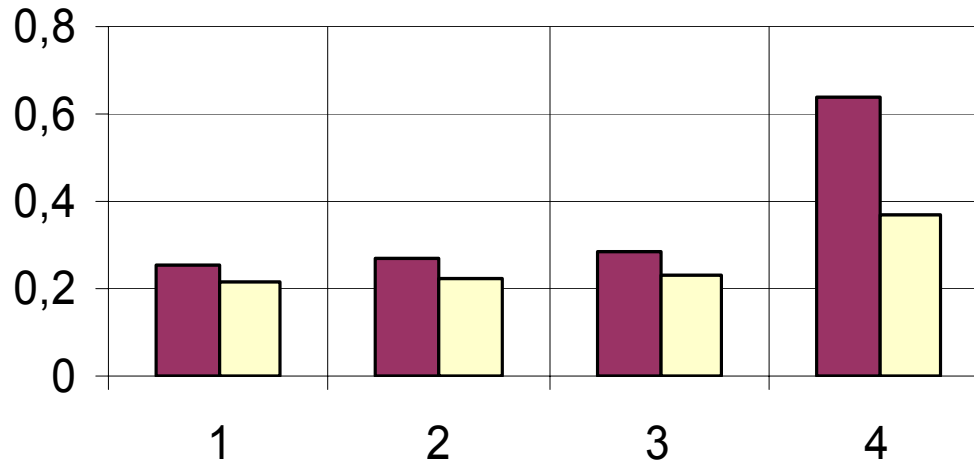




Příklad šíření flickeru – zdroj na hladině nn

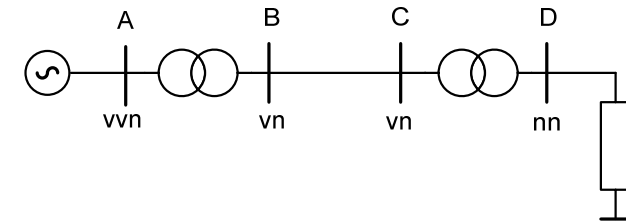
Zdroj flickeru na hladině nn

Pst (-)



■ bez zátěže Pst (-) □ se zátěží nn Pst (-)

uzel



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

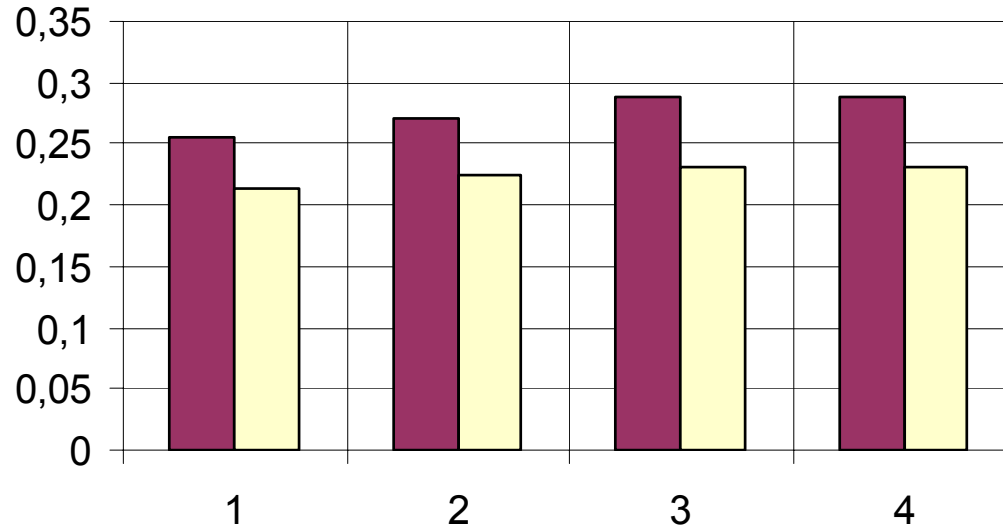
uzel	bez zátěže Pst (-)	se zátěží nn Pst (-)
1	0,255	0,213
2	0,271	0,224
3	0,288	0,231
4	0,635	0,366



Příklad šíření flickeru – zdroj na hladině vn

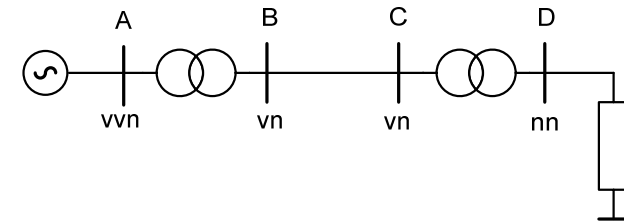
Zdroj flickeru na hladině vn

Pst (-)



■ bez zátěže Pst (-) □ se zátěží nn Pst (-)

uzel



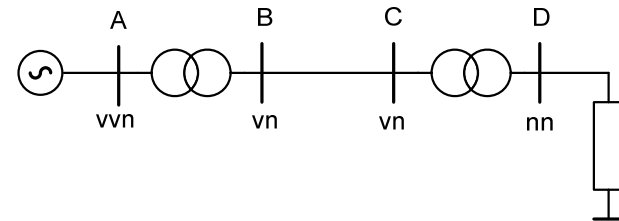
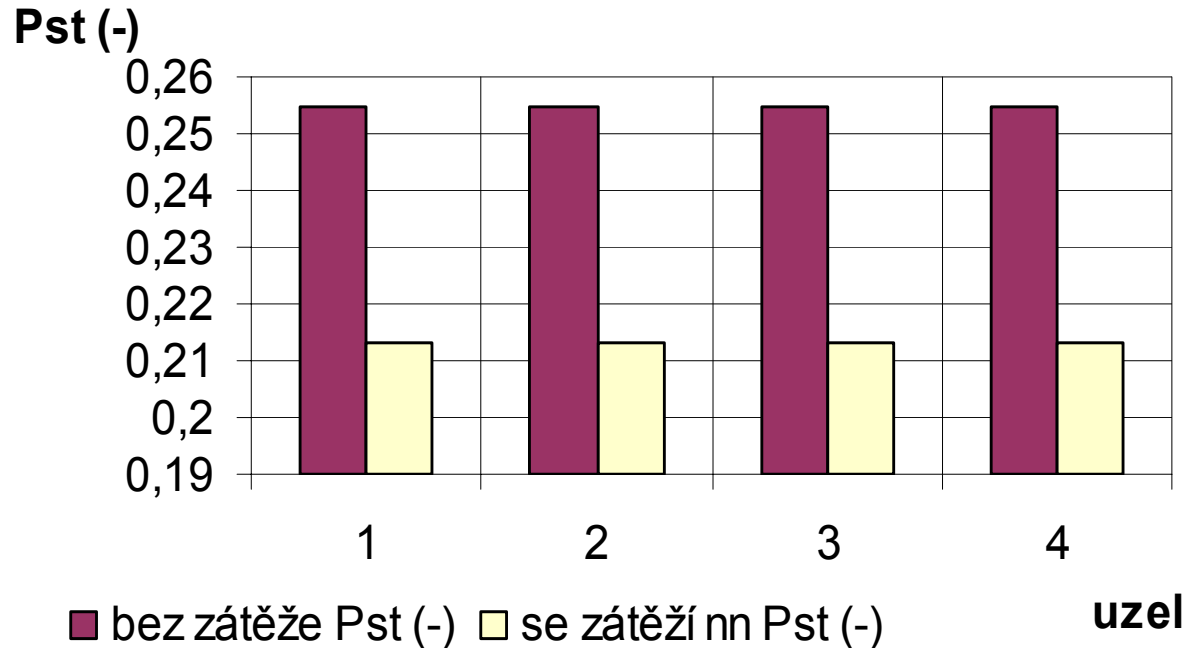
$$U_{FA} : U_{FB} : U_{FC} = \frac{1}{S_K^{(A)}} : \frac{1}{S_K^{(B)}} : \frac{1}{S_K^{(C)}}$$

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

Zdroj flickeru na hladině vvn

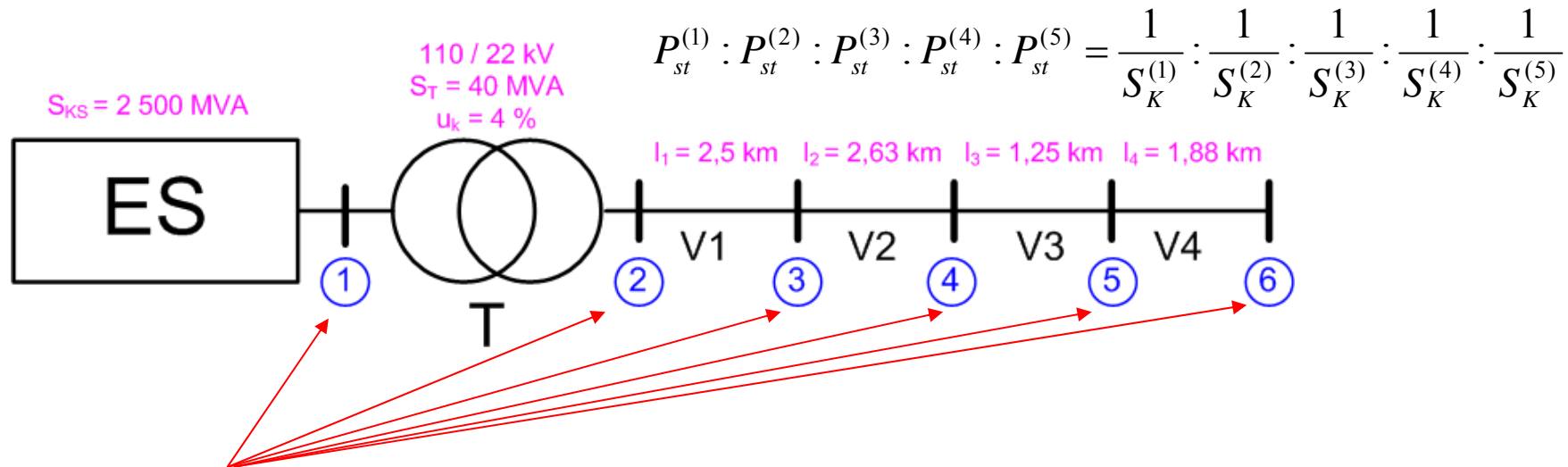


$$U_{FA} : U_{FB} : U_{FC} = \frac{1}{S_K^{(A)}} : \frac{1}{S_K^{(B)}} : \frac{1}{S_K^{(C)}}$$

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

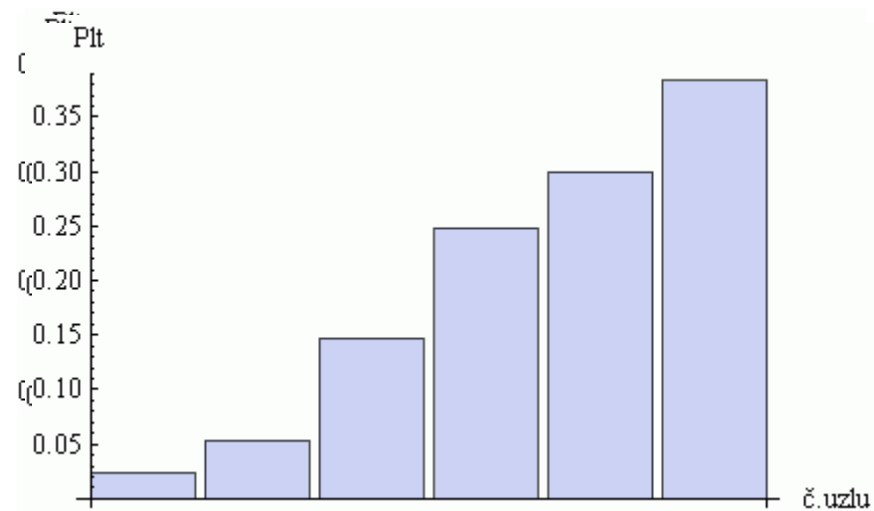


Šíření flickeru v radiální síti



zdroj flickeru

$P_{st} = 0,5$





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 sít'ovou 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



Napět'ová 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 měřicí techniku a výpočet, možnost chyby až 13%
- napět'ová nesymetrie (fázové hodnoty napětí):

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

$$u_u = \frac{\max[\bar{U} - U_i]}{\bar{U}}$$

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

- napět'ová nesymetrie (sdružené hodnoty napětí):

$$u_u = \sqrt{\frac{1 - \sqrt{3 - 6\beta}}{1 + \sqrt{3 - 6\beta}}}$$

$$\beta = \frac{U_{ab}^4 + U_{bc}^4 + U_{ca}^4}{(U_{ab}^2 + U_{bc}^2 + U_{ca}^2)^2}$$

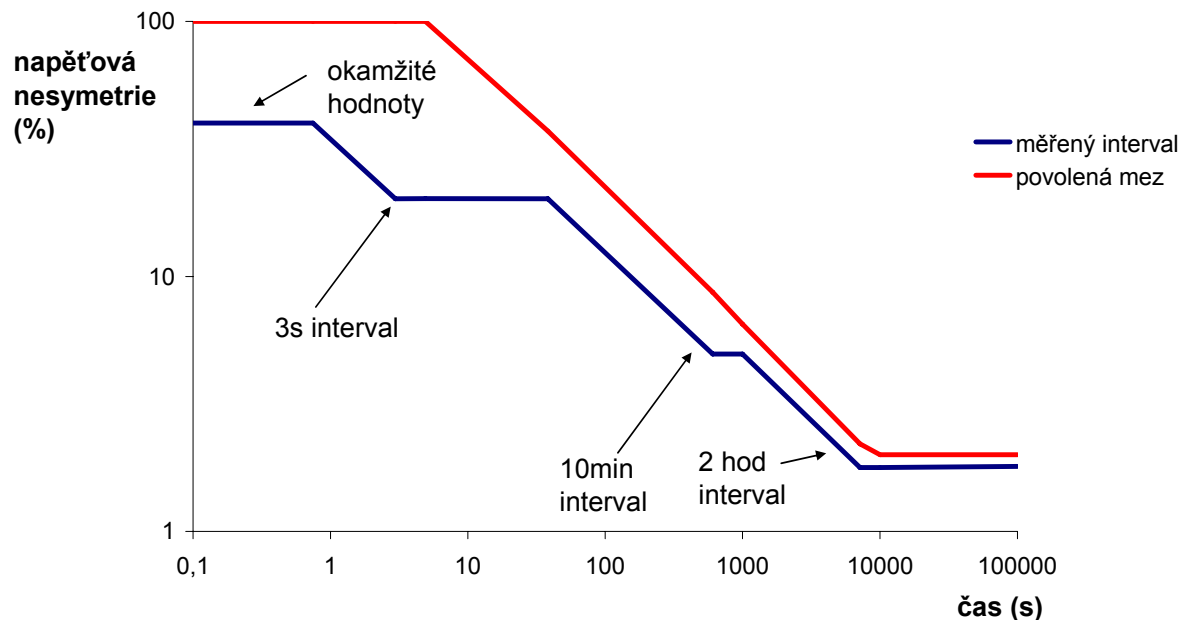
$$u_u = \left| \frac{\hat{U}_{ab} - \hat{a} \cdot \hat{U}_{bc}}{\hat{U}_{ab} - \hat{a}^2 \cdot \hat{U}_{bc}} \right|$$



Napět'ová nesymetrie – dlouhodobější účinky

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

Přípustné hodnoty napět'ové nesymetrie



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

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

$$u_{u2\text{hod}} = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^{12} u_{10\text{min}-i}^2}{12}}$$

- přípustnou hodnotu napět'ové nesymetrie $u_u = 2\%$
- přípustné hodnoty závisí i na délce vyhodnocovaného intervalu



Opatření ke snížení napět'ové 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, napět'ová 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](#)