

**ZÁPADOČESKÁ UNIVERZITA V PLZNI  
FAKULTA ELEKTROTECHNICKÁ**

**Katedra elektromechaniky a výkonové elektroniky**

# **BAKALÁŘSKÁ PRÁCE**

**Kolísání napětí způsobené průmyslovými technologiemi**

ZÁPADOČESKÁ UNIVERZITA V PLZNI  
Fakulta elektrotechnická  
Akademický rok: 2016/2017

## ZADÁNÍ BAKALÁŘSKÉ PRÁCE

(PROJEKTU, UMĚLECKÉHO DÍLA, UMĚLECKÉHO VÝKONU)

Jméno a příjmení: **Patrik DUDA**  
Osobní číslo: **E13B0486P**  
Studijní program: **B2612 Elektrotechnika a informatika**  
Studijní obor: **Elektrotechnika a energetika**  
Název tématu: **Kolísání napětí způsobené průmyslovými technologiemi**  
Zadávající katedra: **Katedra elektromechaniky a výkonové elektroniky**

### Z á s a d y p r o v y p r a c o v á n í :

1. Popište legislativní rámec problematiky kvality napětí.
2. Vysvětlete příčiny vzniku kolísání napětí a uveďte negativní vlivy tohoto jevu.
3. Definujte veličiny charakterizující tento jev a jeho projevy, a odvoďte princip jeho šíření v síti.
4. Analyzujte zpětné vlivy na napájecí síť konkrétního odběratele na základě provedených měření.
5. Popište teoreticky možná řešení snížení zpětných vlivů na napájecí síť.

Rozsah grafických prací: podle doporučení vedoucího

Rozsah kvalifikační práce: 30 - 40 stran

Forma zpracování bakalářské práce: tištěná/elektronická

Seznam odborné literatury:

1. ČSN EN 50160: Charakteristiky napětí el. energie dodávané z veřejné distribuční sítě, 3.vydání 2012.
2. PNE 33 3430-0: Výpočetní hodnocení zpětných vlivů odběratelů distribučních soustav.
3. Tesařová, M., Štroblová, M.: Průmyslová elektroenergetika, ZČU, 2000.
4. Příspěvky ve sbornících Konference CIRED z let 2006 až 2015.


Vedoucí bakalářské práce: Doc. Ing. Miloslava Tesařová, Ph.D.  
Katedra elektroenergetiky a ekologie

Datum zadání bakalářské práce: 14. října 2016

Termín odevzdání bakalářské práce: 8. června 2017

  
Doc. Ing. Jirfi Hammerbauer, Ph.D.  
děkan



  
Prof. Ing. Václav Kůs, CSc.  
vedoucí katedry

V Plzni dne 14. října 2016

## **Anotace**

Tato práce je zaměřena na kvalitu napětí a na vznik a účinky kolísání napětí v distribučních a průmyslových sítích. Praktickou částí této práce je vyhodnocení zpětných vlivů na síť u konkrétního odběratele a porovnání s limitními hodnotami, které jsou dány dle normy ČSN EN 50160 a normy PNE 333430-0. V závěru jsou popsány technicky možná řešení pro snížení účinku kolísání napětí.

## **Klíčová slova**

Kvalita napětí, kolísání napětí, flickr, zkratový výkon

**Abstract**

This thesis is focused on voltage quality and on causes and effects of voltage fluctuation in distribution and industrial network. The practical part deals with the assessment of the negative feedback in industrial network of a customer and the comparison with limit values, which are given by ČSN EN 50160 and PNE 333430-0. Finally, there are described possible technical solutions to reduce effects of voltage fluctuation.

**Keywords**

Voltage quality, voltage fluctuation, flicker, short-circuit power

## **Prohlášení**

Prohlašuji, že jsem tuto bakalářskou práci vypracoval samostatně, s použitím odborné literatury a pramenů uvedených v seznamu, který je součástí této diplomové práce.

Dále prohlašuji, že veškerý software, použitý při řešení této bakalářské práce, je legální.

.....  
podpis

V Plzni dne 31.5.2017

Patrik Duda

## **Poděkování**

Tímto bych rád poděkoval vedoucímu bakalářské práce paní doc. Ing. Miloslavě Tesařové, Ph.D. za cenné profesionální rady a připomínky při zpracování mé bakalářské práce. Dále bych rád poděkoval konzultantovi Ing. Martinu Kašpírkovi, Ph.D. za užitečné informace a poskytnutí naměřených dat pro praktickou část mé bakalářské práce.

# Obsah

<b>OBSAH</b> .....	<b>8</b>
<b>ÚVOD</b> .....	<b>10</b>
<b>SEZNAM SYMBOLŮ A ZKRATEK</b> .....	<b>11</b>
<b>1 KVALITA ELEKTRICKÉ ENERGIE</b> .....	<b>12</b>
1.1 CHARAKTERISTIKY NAPĚTÍ DODÁVANÉ Z DS .....	12
1.2 FAKTORY OVLIVŇUJÍCÍ KVALITU NAPĚTÍ.....	13
<b>2 LEGISLATIVNÍ RÁMEC PROBLEMATIKY KVALITY NAPĚTÍ</b> .....	<b>14</b>
2.1 ČSN EN 50160 .....	14
2.2 PRAVIDLA PROVOZOVÁNÍ DISTRIBUČNÍCH SOUSTAV – PŘÍLOHA3 .....	14
2.3 NORMA PNE 333430-0 .....	14
2.4 ENERGETICKÝ ZÁKON .....	15
2.5 VYHLÁŠKA 540/2005 SB .....	15
<b>3 KOLÍSÁNÍ NAPĚTÍ</b> .....	<b>16</b>
3.1 PŘÍČINA VZNIKU KOLÍSÁNÍ NAPĚTÍ.....	16
3.2 NEGATIVNÍ VLIVY KOLÍSÁNÍ NAPĚTÍ .....	17
<b>4 CHARAKTERISTICKÉ VELIČINY A POJMY KOLÍSÁNÍ NAPĚTÍ</b> .....	<b>19</b>
4.1 RELATIVNÍ ZMĚNY NAPĚTÍ .....	19
4.2 FLIKR .....	19
4.3 MÍRA VJEMU FLIKRU .....	21
4.3.1 Krátkodobá míra vjemu flikru <b>Pst</b> .....	22
4.3.2 Dlouhodobá míra vjemu flikru <b>Plt</b> .....	22
4.3.3 Působení flikru z více zdrojů.....	23
4.4 PŘÍPUSTNÉ HODNOTY FLIKRU V SÍTI.....	23
4.5 ČINITEL FLIKRU A .....	24
4.6 ŠÍŘENÍ FLIKRU V SÍTI .....	24
4.7 VZTAŽNÁ IMPEDANCE .....	26
4.8 MARKANTNÍ PŘÍSPĚVOVATEL.....	26
<b>5 ANALÝZA ZPĚTNÝCH VLIVŮ NA NAPÁJECÍ SÍŤ U KONKRÉTNÍHO ODBĚRATELE</b> .....	<b>27</b>
5.1 HISTORIE PODNIKU Z HLEDISKA NEGATIVNÍCH ZPĚTNÝCH VLIVŮ NA SÍŤ.....	27
5.2 VYHODNOCENÍ ZPĚTNÝCH VLIVŮ NA SÍŤ .....	28
5.3 POROVNÁNÍ NAMĚŘENÝCH HODNOT S MATEMATICKÝM MODELEM PRO ŠÍŘENÍ FLIKRU V SÍTI .....	33
5.4 POROVNÁNÍ FLIKRU S NORMOU ČSN EN 50160 A PNE 333430-0 .....	35
<b>6 NÁPRAVNÁ OPATŘENÍ PRO OMEZENÍ FLIKRU</b> .....	<b>37</b>
6.1 OMEZENÍ ÚČINKŮ FLIKRU POMOCÍ ZVÝŠENÍ ZKRATOVÉHO VÝKONU .....	37
6.2 OMEZENÍ ÚČINKŮ FLIKRU POMOCÍ DYNAMICKÉ KOMPENZACE JALOVÉHO VÝKONU .....	38
6.2.1 Statické kompenzátory .....	39
6.2.2 Aktivní filtry .....	40
6.2.3 Snížení proudových rázů $\Delta I$ .....	40
6.3 MOŽNÁ NÁPRAVNÁ OPATŘENÍ U SLEDOVANÉHO ODBĚRATELE.....	40
6.3.1 Snížení flikru stupněm zálohy síly prolisu.....	41
6.3.2 Výstavba nové rozvodny 110/22kV.....	43
6.3.3 Aktivní filtr zapojený paralelně .....	45



<b>ZÁVĚR</b> .....	<b>48</b>
<b>SEZNAM LITERATURY A INFORMAČNÍCH ZDROJŮ</b> .....	<b>49</b>
<b>PŘÍLOHY</b> .....	<b>1</b>

## Úvod

Předkládaná bakalářská práce se zabývá popsáním problematiky kolísání napětí v síti a negativních vlivů na síť, které mají vliv na zhoršení kvality napětí v distribučních a průmyslových sítích.

V současnosti jsou kladeny velké nároky na distributora elektrické energie k zajištění dodávky elektřiny zákazníkovi s předem definovanými kvalitativními parametry, které jsou definované normou ČSN EN 50160. Protože v průmyslových sítích se nachází spotřebiče, které nepříznivě ovlivňují kvalitu napětí v místě připojení, ale také i odběratele v blízkém okolí. Proto je nutná neustálá kontrola kvality napájecího napětí v distribučních sítích a hledání technických řešení, zamezující negativní vlivy na síť. Nejčastějším energetickým rušením v distribuční síti je kolísání napětí. Z tohoto důvodu se tato práce zabývá problematikou kolísání napětí a jeho negativních vlivů na síť.

V první části této práce (v kapitolách 1,2,3,4) je popsána definice kvality napětí a charakteristické parametry, které kvalitu napětí definují. Dále je popsán legislativní rámec, který se zabývá definováním parametrů kvality napětí a závazky mezi distributorem elektrické energie a odběratelem. Poté je popsáno kolísání napětí z hlediska vzniku negativních příčin, charakteristických veličin a odvozeno šíření tohoto jevu v síti.

V druhé části této práce (v kapitolách 5,6) se pokusím vyhodnotit negativní zpětné vlivy na síť u konkrétního odběratele na základě naměřených dat. Následně se zamyslím nad tím jak tyto negativní vlivy snížit nebo odstranit, aby bylo dosaženo požadovaných kvalitativních hodnot pro síť.

## Seznam symbolů a zkratk

$P_{st}$ .....	Krátkodobá míra flikru
$P_{lt}$ .....	Dlouhodobá míra flikru
$A$ .....	Činitel flikru
$S_K''$ .....	Zkratový výkon [VA]
$S_K''^{(VN)}$ .....	Zkratový výkon na straně VN [VA]
$S_K''^{(NN)}$ .....	Zkratový výkon na straně NN [VA]
PCC .....	Společný napájecí bod (point of common coupling)
$U_n$ .....	Jmenovité napětí [V]
$\Delta U$ .....	Úbytek napětí sítě [V]
$U_F$ .....	Rušivé napětí [V]
$u_k$ .....	Napětí nakrátko transformátoru [%]
VVN .....	Velmi vysoké napětí
VN .....	Vysoké napětí
NN .....	Nízké napětí
$I_{stř}$ .....	Průměrná efektivní hodnota za 10 minut [A]
$I_{max}$ .....	Jednoperiodový proudový extrém zaznamenaná za 10 minut [A]
$\cos \varphi$ .....	Účinník
$Z_C$ .....	Celková impedance sítě vztažená na společný bod sítě [ $\Omega$ ]
$Z_S$ .....	Impedance nadřazené sítě [ $\Omega$ ]
$Z_T$ .....	Impedance transformátoru [ $\Omega$ ]
$X_T$ .....	Reaktance transformátoru [ $\Omega$ ]
$R_S$ .....	Odpor sítě [ $\Omega$ ]
$X_S$ .....	Reaktance sítě [ $\Omega$ ]
$F_N$ .....	Jmenovitá síla lisu
$i_k$ .....	Rozběhový proud motoru [A]

# 1 Kvalita elektrické energie

Kvalita elektrické energie se definuje jako soubor parametrů určující vlastnosti elektrické energie dodávané odběratelům za normálních podmínek, a to z hlediska nepřetržitosti dodávky a definovanými charakteristikami napětí v daném bodě ES. K ovlivňování kvality elektrické energie dochází proto, že síť není „tvrdá“ ale má určitou impedanci, na které vznikají úbytky napětí [4].

## 1.1 Charakteristiky napětí dodávané z DS

Jednotlivé charakteristiky napětí elektrické energie, popisující kvalitu napětí dodávané z veřejné distribuční sítě, vycházejí z normy ČSN EN 50160 [1]. Patří sem:

- A. Kmitočet sítě
- B. Velikost napájecího napětí
- C. Odchytky napájecího napětí
- D. Rychlé změny napětí
  - Velikost rychlých změn napětí
  - Míra vjemu flikru
- E. Krátkodobé poklesy a zvýšení napájecího napětí
- F. Nesymetrie napájecího napětí
- G. Harmonická napětí
- H. Meziharmonická napětí
- I. Úrovně napětí signálu v napájecím napětí
- J. Krátkodobá přerušení napájecího napětí
- K. Dlouhodobá přerušení napájecího napětí
- L. Dočasná přepětí o síťovém kmitočtu mezi živými vodiči a zemí
- M. Přechodová přepětí mezi živými vodiči a zemí.

Pro charakteristiky A až I platí pro odběrná místa DS a napěťovou úroveň NN a VN.

- Zaručované hodnoty
- Měřicí intervaly
- Doby pozorování
- Mezní pravděpodobnosti splnění stanovených limitů, stanovené v ČSN EN 50160.

Pro charakteristiky J až M a krátkodobé poklesy napětí uvádí norma ČSN EN 50160 pouze informativní hodnoty [2].

## 1.2 Faktory ovlivňující kvalitu napětí

Elektrická energie vyrobená ve velkých systémových elektrárnách až po rozptýlené zdroje elektrické energie musí splňovat standardní parametry kvality napětí. Elektrická energie je závislá nejen na kvalitě výroby, ale také na kvalitě přenosu a spotřeby. Prostřednictvím ES se elektrická energie přenáší až ke konečnému spotřebiteli. Působením zdrojů energetického rušení na této trase dochází k ovlivnění kvality napětí. Na kvalitě elektrické energie závisí spolehlivost a bezpečnost provozu zařízení, v případě průmyslových podniků celá výroba a s tím spojena ekonomická efektivnost výroby. Zdrojem energetického rušení rozumíme elektrická zařízení, která svým provozem způsobují [8]:

- Nesymetrii trojfázové soustavy
- Kolísání efektivní hodnoty napětí
- Vyšší harmonické
- Přepětí
- Krátkodobá přerušení a poklesy napětí

Mezi takové zdroje energetického rušení řadíme například:

- Časté spínání velkých spotřebičů.
- Nelineární spotřebiče generující vyšší harmonické (např. 6pulzní neřízený usměrňovač).
- Spotřebiče s dynamicky měnícím se odběrem činného a jalového výkonu (např. katr).
- Působení ochranných a automatizačních prostředků k zamezení poruchových stavů v síti.
- Špatně navržené kompenzační zařízení.
- Nerovnoměrné rozložení zatížení na tři fáze (např. jednofázová elektrická pec).
- Vlivy způsobené používáním některých elektrických spotřebičů (např. napájecí zdroje elektrických přístrojů).

## 2 Legislativní rámec problematiky kvality napětí

Legislativní rámec problematiky kvality napětí je poměrně rozsáhlý a důležitý pro vyhodnocování kvality napětí a provozování distribučních soustav. Je to soubor několika norem, zákonů a pravidel, které je důležité znát a které tvoří základ při vyhodnocování kvality elektrické energie v konkrétních případech. Za jejich nedodržení plynou různé sankce pro distributora elektrické energie tak i pro zákazníka. V této práci uvedeme jen ty nejdůležitější, kterými se řídíme při vyhodnocování kvality napětí.

### 2.1 ČSN EN 50160

Norma ČSN EN 50160 uvádí hlavní charakteristiky napětí v místech připojení odběratelů z veřejných distribučních sítí nízkého, vysokého a velmi vysokého napětí za normálních provozních podmínek. Norma se tedy nevztahuje na mimořádné provozní podmínky vzniklé poruchou sítě, dočasného přerušení dodávky elektřiny za účelem prací na rozvodné síti, nevyhovující instalací nebo zařízením odběratele, které nevyhovuje příslušným normám nebo technickým podmínkám pro připojení odběratele. Dále se norma nevztahuje na podmínky, na které nemá dodavatel elektrické energie vliv (mimořádné povětrnostní podmínky, cizí zavinění, vyšší moc apod.) Norma udává meze a velikost charakteristických hodnot napětí (kmitočet, tvar vlny, velikost, symetrie třífázového napětí), které může za normálních provozních podmínek očekávat kterýkoliv odběratel, jenž je připojený na veřejnou distribuční síť [1].

### 2.2 Pravidla provozování distribučních soustav – Příloha 3

Příloha 3 PPDS vychází z Energetického zákona 458/200 Sb.[5] a z Vyhlášky Energetického regulačního úřadu č 540/2005 Sb., které ukládají PPDS stanovit kvalitu napětí a podmínky pro jejich dodržování uživateli distribuční sítě. Dále zjišťuje jednotlivé parametry a požadavky na měřicí soupravy pro jejich zjišťování. Dalším cílem je definovat možné způsoby uplatnění parametrů kvality napětí ve smlouvách o distribuci elektřiny [2].

### 2.3 Norma PNE 333430-0

Norma PNE 333430-0 Výpočetní hodnocení zpětných vlivů odběratelů a zdrojů distribučních soustav platí pro plánování připojování a provozování elektrických zařízení distribučních soustav NN, VN a 110 kV z hlediska vlivu na elektrizační soustavu a zařízení

hromadného dálkového ovládání. Norma ale neplatí pro domácí spotřebiče. Rozsahy hodnot pro jednotlivé charakteristiky napětí v sítích NN, VN a VVN jsou stanoveny v ČSN EN 50160 [1]. Dále norma definuje jednotlivé dílčí impedance sítě a vztaženou impedanci. Pokud je v distribuční síti součet dílčích impedancí přepočítaných na společný napájecí bod resp. zkratová impedance sítě je menší než vztažená impedance sítě, nemělo by vlivem provozu běžných spotřebičů dojít k nedodržení kvality napětí. Ale kdyby tomu bylo jinak s největší pravděpodobností by způsobovalo nekvalitu napětí některé nestandardní zařízení (lis, obloukové svářečky apod.). Norma také udává limity zpětných vlivů pro jednoho odběratele, kdy při kumulaci většího počtu odběratelů nedojde k překročení limitních hodnot dle normy ČSN EN 50160 [3].

## 2.4 Energetický zákon

Energetický zákon 458/2000 Sb. umožňuje provozovateli distribuční soustavy omezit nebo přerušit odběr elektřiny zákazníkovi který svým odběrným zařízením ovlivňuje kvalitu elektřiny v neprospěch ostatních odběratelů a dále nevybavil odběrná zařízení dostupnými technickými prostředky k omezení těchto vlivů. Dále provozovatel distribuční soustavy je povinen každému, kdo požádá o připojení k distribuční soustavě, stanovit podmínky a termín připojení, kdo splňuje obchodní podmínky stanovené PPDS a také podmínky připojení. Při prokazatelných nesplnění těchto podmínek má provozovatel distribučních soustav právo zamítnout žádost o připojení. Provozovatel distribučních soustav je povinen dodržovat a zveřejňovat ukazatele kvality dodávek elektřiny a při nedodržení kvality dodávky elektřiny ze strany distributora, které může být způsobeno nedostatečným zkratovým výkonem v místě připojení zákazníka, může tento zákazník od distributora požadovat vyplacení sankcí nebo slev [5].

## 2.5 Vyhláška 540/2005 SB

Vyhláška 540/2005 SB definuje požadovanou kvalitu dodávek elektřiny a služeb souvisejících s činnostmi v elektroenergetice. Určuje také výše náhrad za nedodržení kvality elektřiny, která neodpovídá parametrům velikosti a odchylky napájecího napětí a frekvence, které jsou v souladu s PPDS, nebo na sjednaných parametrech napětí a frekvence na základě smlouvy mezi zákazníkem a distributorem [6].

### 3 Kolísání napětí

Kolísání napětí se definuje jako řada rychlých změn napětí následujících těsně po sobě nebo cyklické změny napětí. Tyto změny napájecího napětí jsou převážně způsobeny změnou zatížení resp. kolísavým odběrem proudu výkonové zátěže (oblouková pec, motorové pohony apod.), který způsobuje časově proměnlivé napěťové úbytky na impedanci sítě s frekvencí menší jak 50 Hz nebo změny napájecího napětí mohou být způsobeny častým spínáním v síti. Přitom napětí při těchto změnách se pohybuje v rozmezích  $\pm 10\% U_n$ . Důležité je rozlišovat tento jev od odchylky napětí, kde se napětí pohybuje také v rozmezí  $\pm 10\% U_n$ , ale jsou to pomalé změny napětí, které jsou způsobeny zapnutím velkých spotřebičů. Dále do rychlých změn napětí nezahrnujeme napětí, které poklesne pod hodnotu  $90\% U_n$ , které se definuje jako pokles napětí nebo naopak pokud stoupne nad hodnotu  $110\% U_n$ , se považuje za přepětí [1,7].

#### 3.1 Příčina vzniku kolísání napětí

V dnešní době kdy se stále kladou větší a větší nároky na výrobu, přibývají také technologie, které svým provozem přispívají ke vzniku kolísání napětí. V průmyslových sítích se v dnešní době vyskytují spotřebiče s dynamicky měnícím se odběrem činného a jalového výkonu, které jsou zdrojem energetického rušení v síti. Na kolísání napětí lze pohlížet jako na amplitudovou modulaci, kdy:

- Jmenovité napětí sítě o frekvenci 50 Hz – **nosný signál**
- Časově proměnlivý úbytek napětí o frekvenci menší jak 50 Hz - **modulační signál**

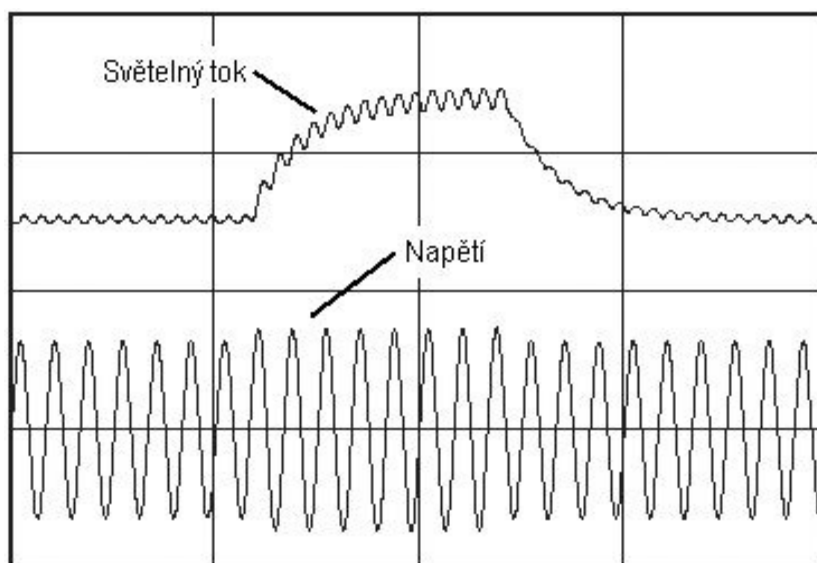
Zdroje kolísání napětí:

- Rozběhy velkých motorů (speciálně je-li periodicky opakován).
- Zapínání tepelných čerpadel, transformátorů a kondenzátorů.
- Motory provozované s proměnným zatížením (katry, drtiče kamení, lisy, výtahy).
- Proměnlivá zátěž (např. řízený ohřev s velkým výkonem).
- Svářecí stroje (např. obloukové a odporové svářečky).
- Obloukové pece.
- Fázové řízení tyristorového měniče.
- Proměnné dodávky elektrické energie (větrné a fotovoltaické elektrárny) [4].



### 3.2 Negativní vlivy kolísání napětí

Kolísání napětí je jediným jevem z kategorie energetického rušení, které může mít z dlouhodobého hlediska na člověka negativní fyziologické účinky. Veškeré světelné zdroje jsou závislé na kvalitě napájecího napětí, a proto je nejnepríznivějším jevem kolísání napětí kolísání světelného toku svítidel. Tento jev se nazývá flickr. Flickr se projevuje ve změně zrakového vnímání, které ruší člověka při jeho činnosti a snižuje jeho koncentraci a zvyšuje psychickou únavu, což může vést k vážným úrazům na pracovišti a chyb ve výrobním procesu vlivem lidského faktoru. Rušení zrakového vnímání je způsobeno především změnou svítivosti žárovky, která je způsobena změnou výkonu žárovky, kdy výkon žárovky je úměrný kvadrátu napájecího napětí  $P \sim U^{2(1,6)}$ . Zrakové obtěžování způsobené flickrem je subjektivní záležitost. U každého člověka se projevuje v různé míře a může se měnit v závislosti na příčině blikání a délce doby, po kterou se vyskytuje. *Obr. 3.1* znázorňuje, jak malá změna velikosti amplitudy napětí, vyvolá velkou změnu světelného toku [7].



*Obr. 3.1* Změna světelného toku vyvolaná dočasnou změnou napětí [12]

Mimo toho že flickr může způsobit negativní následky na lidské zdraví, způsobuje kolísání napětí nepříznivé účinky na provozovanou technologii výrobního procesu, které vedou k ekonomickým ztrátám. Na svorkách indukčního motoru kolísání napětí způsobí změnu otáček, skluzu a momentu ( $M \sim U^2$ ). Dále může dojít k nadměrným vibracím a ke snížení mechanické pevnosti a ke zkrácení životnosti motoru. U synchronních motorů kolísání napětí způsobuje nárůst kmitání a to vede k předčasnému opotřebení rotoru, a také dochází ke zvýšení ztrát a změně otáček. Dále kolísání napětí působí negativně na

elektrický ohřev, protože výrazně snižuje účinnost elektrického ohřevu, např. oblouková pec bude potřebovat delší dobu tavení. Negativní účinky kolísání napětí se tedy týkají všech lidských odvětví, ve kterých se vyskytují zařízení, které ke svému správnému fungování potřebují konstantní dodávku napájecího napětí [13].

## 4 Charakteristické veličiny a pojmy kolísání napětí

### 4.1 Relativní změny napětí

Je to poměr změny amplitudy napětí  $\Delta U$  k jmenovité hodnotě napětí  $U_n$  ve sledovaném napájecím uzlu. Změna napětí  $\Delta U$  se měří, jako rozdíl následujících 10 ms hodnot RMS. Relativní změny napětí lze také vyjádřit jako změna výkonu zátěže  $\Delta S_A$  vztažená ke zkratovému výkonu v místě připojení  $S_{KV}$ . Potom vztah pro třífázovou symetrickou zátěž je [7]:

$$d = \frac{\Delta U}{U_n} = \frac{\Delta U_{fáz}}{U_{nfáz}} \cong \frac{\Delta S_A}{S_{KV}} \quad (4.1)$$

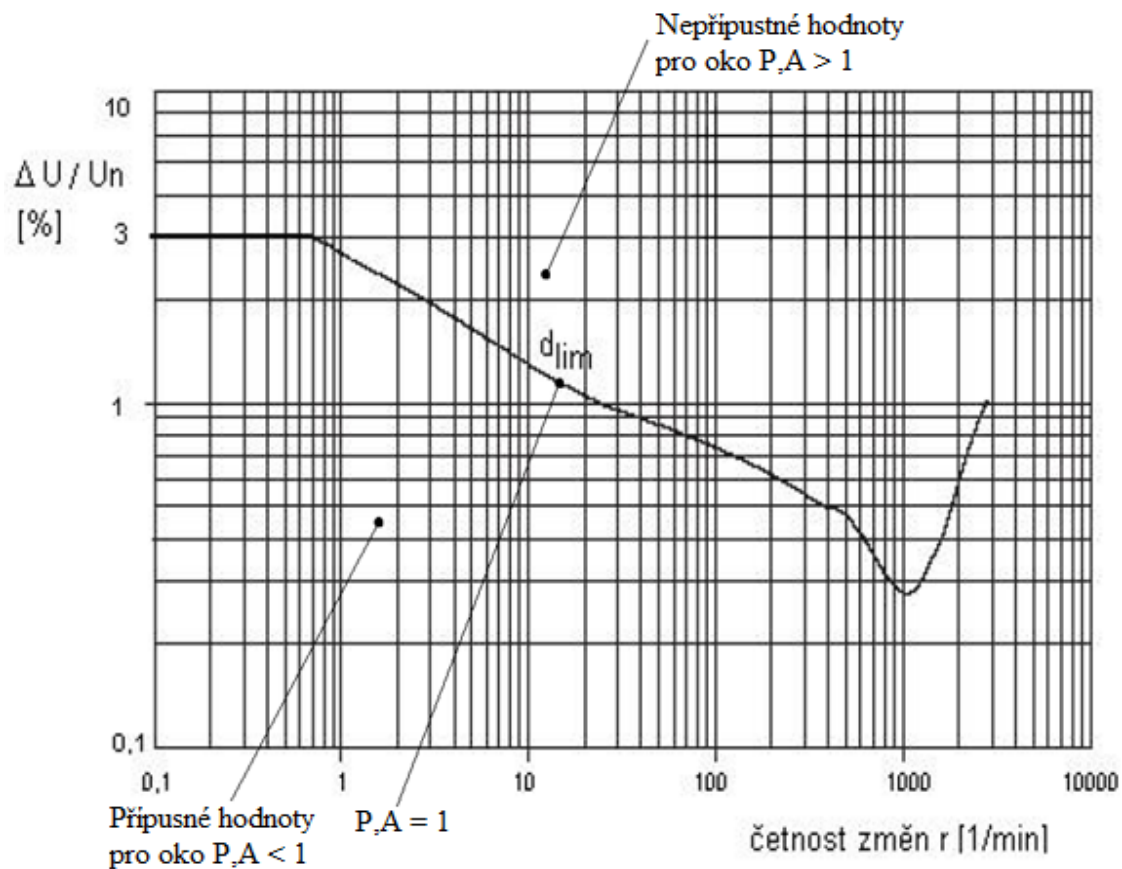
kde  $\Delta S_A$  se rovná při rozběhu motoru maximálnímu rozběhovému výkonu motoru ( $\Delta S = i_k \cdot S_n$ ,  $i_k = (5 \div 10)I_n$ ). Relativní změna napětí lze přesněji určit na základě činného a jalového výkonu a impedance sítě v místě připojení ( $R_{kV} + jX_v$ ) [7].

$$d = \frac{1}{U_n^2} \cdot (R_{kV} \cdot \Delta P_A + X_{kV} \cdot \Delta Q_A) = \frac{1}{U_{fn}} \cdot (R_{kV} \cdot \Delta I_A \cdot \cos\varphi + X_{kV} \cdot \Delta I_A \cdot \sin\varphi) \quad (4.2)$$

### 4.2 Flickr

Podle normy ČSN EN 50160 ed.3 [1] je flickr vjem nestálosti zrakového vnímání vyvolaný světelným podmětem, jehož jas nebo spektrální rozložení kolísá v čase. V praxi se k posuzování flickru používá veličina míra vjemu flickru **P**. Tato veličina se vyhodnocuje pro časové intervaly 10 minut (krátkodobý časový interval) a 120 minut (dlouhodobý časový interval), protože ovlivnění zrakové pohody záleží na délce a intenzitě flickru. Tento jev ovlivňuje zrakovou pohodu vnímání lidského oka z důvodu časové změny světelného toku a lidské oko reaguje nejcitlivěji při 18 změnách za sekundu tedy 1080 změn za minutu. Při této četnosti vede již k potížím napěťová změna  $d = 0,3\%$ . Obr. 4.1 ilustruje křivku citlivosti oka stanovenou pro wolframovou žárovku 60W, 230V, protože při vytváření tohoto modelu reakce lidského oka na nepříjemný jev flickr, byla wolframová žárovka nejpoužívanějším zdrojem v Evropě. Tato křivka je charakterizována procentuální relativní změnou napětí **d** (osa y) a četností výskytu změn napětí **r** (osa x) a pro všechny body křivky platí **P = 1** a **A = 1** (činitel flickru). Tam kde relativní změny a četnost změn

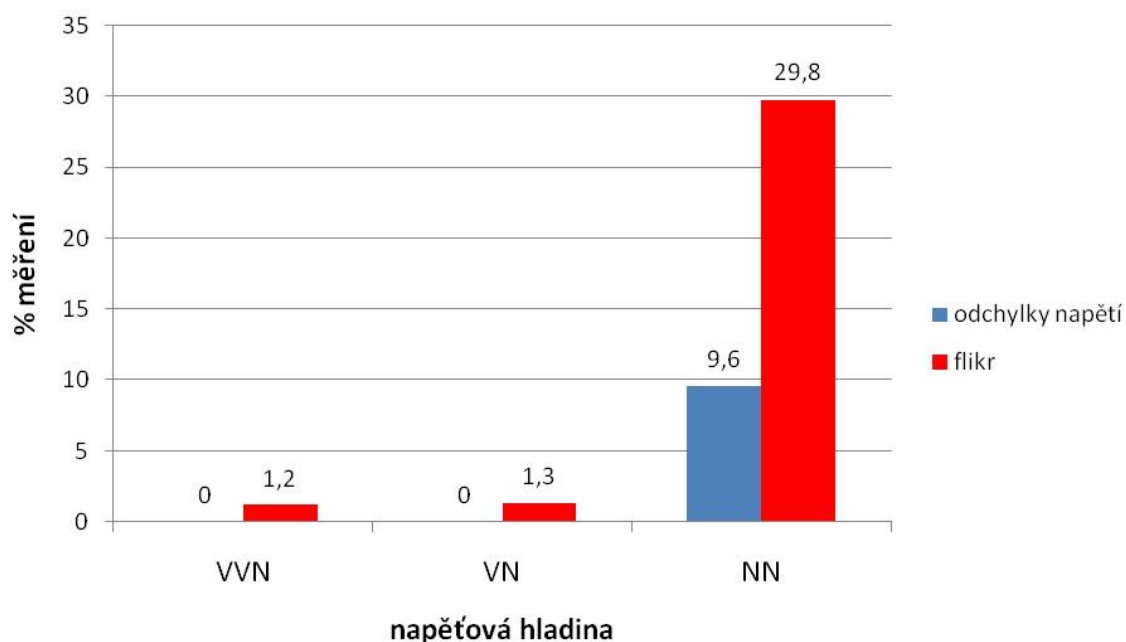
napětí leží nad křivkou, bude pravděpodobně docházet k rušení lidského zraku, kdežto pod křivkou by nemělo dojít k rušení lidského zraku [7,12].



Obr. 4.1 Citlivost oka na pravoúhlé změny napětí (upraveno z [7])

Obr. 4.2 zobrazuje graf znázorňující stav elektřiny na jednotlivých napěťových hladinách distribuční sítě v letech 2006 a 2009. Z tohoto grafu je patrné, že flickr je nejzávažnějším problémem z hlediska kvality napětí na napěťové hladině NN a nejčastější příčinou k nevyhovění požadavků normy ČSN EN 50160. V 29,8 % všech vyhodnocených měření na napěťové hladině NN byl překročen parametr flickr. Dále za nekvalitní dodávku elektřiny přispívají odchylky napětí v 9,6 % všech měření na NN. Na hladinách VVN a VN se problémy s odchylkami napětí téměř nevyskytují. Na VVN a VN se vyskytuje pouze ve velmi malé míře flickr. Z toho vyplývá, že problematika nedodržení kvality elektřiny se převážně řeší na napěťové hladině NN [10].

## Nevyhovující parametry kvality napětí v DS



Obr. 4.2 Kvalita napětí v DS (v letech 2006 až 2009) [10]

Z hlediska provozu je vhodné zavést pojmy jako je průmyslový a přirozený flickr. Tyto pojmy ale nejsou nikde normalizovaně uvedeny, jedná se jen o návrh pojmů.

**Průmyslový flickr:** je způsobený markantním přispěvovatelem, který je provozovatelem nestandardního elektrického spotřebiče (např. lis, katr, svářečka). Obvykle přesahuje limitní hodnotu flickru  $P_{lt} = 1$ . Z průběhu flickru je pak patrná souvislost s provozem markantního přispěvovatele [9].

**Přirozený flickr (flickr pozadí) :** je způsoben provozem běžných spotřebičů a z jeho průběhů nelze určit markantního přispěvovatele. V síti NN s vyšší impedancí než vztaženou, může přirozený flickr přesahovat limitní hodnotu  $P_{lt} = 1$  [9].

### 4.3 Míra vjemu flickru

Míra vjemu flickru je měřená veličina, která udává intenzitu nepříjemnosti flickru a je definována veličinami  $P_{st}$  a  $P_{lt}$ . V praxi je zjišťování míry vjemu flickru důležitou součástí vyhodnocování kvality napětí. Pro prokázání kvality napětí potřebujeme minimálně týdenní měření. Míra vjemu flickru nám pomáhá při zjišťování odkud se flickr šíří a kdo je za něho odpovědný.

### 4.3.1 Krátkodobá míra vjemu flikru $P_{st}$

Krátkodobá míra vjemu flikru  $P_{st}$  (st – short term) je měřena po dobu 10 minut. Při pravidelně opakujících a pravouhlých změnách napětí s relativní velikostí napětí  $d$  a četností  $r$  je možné využít křivky na *obr. 4.1*, kdy krátkodobá míra flikru se spočte následujícím způsobem [7]:

$$P_{sti} = \frac{d}{d_{lim}} \quad (4.3)$$

U více složitějších jevů tedy při nepravidelně opakujících a nepravoúhlých změnách napětí je možné vyjádřit  $P_{st}$  pomocí doby působení flikru  $t_f$ , která se definuje [7]:

$$t_f = 2,3 \cdot (100 \cdot d \cdot F)^3 \quad (4.4)$$

kde:  $d$ ...relativní změna napětí  
 $F$ ...činitel tvaru podle PNE 33 3430 (napět'ový skok  $F = 1$ )

Výsledná krátkodobá míra vjemu flikru  $P_{st}$  se určí jako součet doby působení flikru  $t_f$  vztažená na sledovaný časový interval (10 min.), ve kterém se kolísání napětí vyskytuje [7].

$$P_{st} = \sqrt[3]{\frac{\sum t_f}{10 \text{ min}}} \quad (4.5)$$

Při překročení limitní hodnoty krátkodobé míry vjemu flikru  $P_{st} = 1$  bylo zjištěno, že kolísání světelného toku způsobené kolísáním napětí u 50% zkoumaných osob působilo rušivě. Krátkodobá míra vjemu flikru  $P_{st}$  je vhodná pro ověření přípustných hodnot zdrojů s krátkým pracovním cyklem [3].

### 4.3.2 Dlouhodobá míra vjemu flikru $P_{lt}$

Dlouhodobá míra vjemu flikru  $P_{lt}$  (lt – long term) se určuje po dobu 120 minut.  $P_{lt}$  se spočítá z dvanácti po sobě jdoucích hodnot  $P_{st}$  po dobu 120 min pomocí následujícího vztahu [7]:

$$P_{lt} = \sqrt[3]{\sum_{i=1}^{12} \frac{P_{sti}^3}{12}} \quad (4.6)$$

Nebo se určí jako součet doby působení flikru vztažený k 120 minutovému intervalu dle následujícího vztahu:

$$P_{lt} = \sqrt[3]{\frac{\sum t_f}{120 \text{ min}}} \quad (4.7)$$

Dlouhodobá míra vjemu blikání  $P_{lt}$  je vhodná pro ověření přípustných hodnot flikru u zdrojů rušení s dlouhým nebo proměnlivým pracovním provozem a u skupiny zdrojů rušení pracujícím náhodným způsobem. Parametr  $P_{lt}$  je důležitým parametrem při vyhodnocování kvality napětí. Za normálních provozních podmínek musí být po 95% času pro libovolné týdenní měření dlouhodobá míra vjemu flikru  $P_{lt} \leq 1$  [1,7].

### 4.3.3 Působení flikru z více zdrojů

Při působení flikru různých nesynchronních zdrojů se míra vjemu flikru počítá a podle následujícího vztahu [7]:

$$P_{celk} = \sqrt[3]{P_1^3 + P_2^3 + \dots + P_n^3} \quad (4.8)$$

## 4.4 Přípustné hodnoty flikru v síti

Tab. 4.1 obsahuje přípustné hodnoty flikru pro síť a pro jednoho odběratele, které udává norma PNE 33 3430-0 [3].

Tab. 4.1 Směrné hodnoty pro posouzení flikru

síť	Přípustné limity rušení pro síť			Přípustné limity rušení pro jednoho odběratele		
	110 kV	VN	NN	110 kV	VN	NN
$P_{lt}$	0,8	0,8	0,8	0,25	0,25	0,4
$P_{st}$	1	1	1	0,6	0,35	0,35
d/dmax				0,03/0,04	0,02/0,03	0,02/0,03

## 4.5 Činitel flikru A

Činitel flikru stejně jako míra vjemu flikru P je posuzován pro časové intervaly 10 minut (krátkodobý) nebo 120 minut (dlouhodobý). Tyto dvě veličiny jsou vzájemně vázány vztahem[7]:

$$A = P^3 \quad (4.9)$$

Při působení flikru z více zdrojů pak platí pro činitel flikru následující vztah [7]:

$$A_{celk} = A_1 + A_2 + \dots + A_n \quad (4.10)$$

Činitel flikru A se stejně jako míra vjemu flikru P používal k vyhodnocování parametru flikru v praxi, ale již se nepoužívá.

## 4.6 Šíření flikru v síti

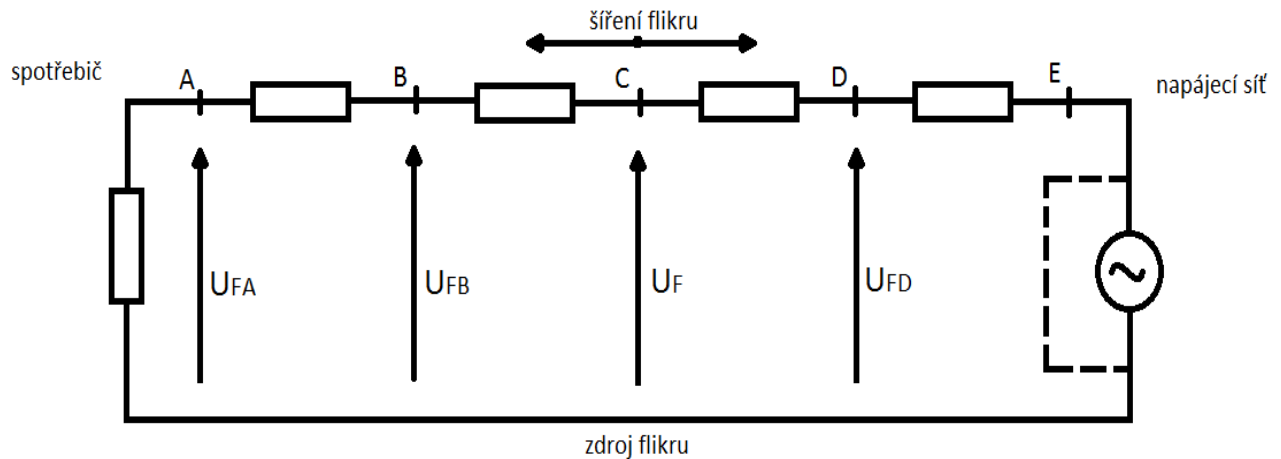
V paprskových sítích se intenzita flikru snižuje od místa rušivého zařízení, které flikr způsobuje směrem k napájecímu místu sítě v poměru zkratového výkonu  $S_{kP}$  v přípojném bodě P ke zkratovému výkonu  $S_{kX}$  ve sledovaném bodě X podle vztahu [7]:

$$P_{stiX} = \frac{S_{kP}}{S_{kX}} \cdot P_{stiP} \quad (4.11)$$

kde	$S_{kP}$	Zkratový výkon v přípojném bodě P
	$S_{kX}$	Zkratový výkon ve sledovaném bodě X
	$P_{stiX}$	Míra vjemu krátkodobého flikru ve sledovaném bodě X
	$P_{stiP}$	Míra vjemu krátkodobého flikru v přípoj. bodě P
	i	Index pro jednotlivá zařízení sítě

*Obr. 4.3* představuje schéma sítě pro šíření flikru od místa vzniku flikru (uzel C). Flikr v uzlu C je vyjádřen pomocí rušivého napětí  $U_F$ . Napětí  $U_F$  je způsobeno rušícím zařízením a je rozdílem mezi skutečnou hodnotou napětí v uzlu C a napětím, které by v uzlu bylo v případě, že připojené zařízení nemělo rychle se měnící odběr, tj. nezpůsobovalo by rušení [7].





Obr. 4.3 Šíření flickru v síti (převzato [7])

Z důvodu zvyšující se velikosti zkratových výkonů směrem ke zdroji, se míra vjemu flickru omezí na:

$$P_{st}^{(D)} < P_{st}^{(C)} \quad (4.12)$$

Flickr se směrem k napájecímu bodu sítě zmenšuje z důvodu, že napětí  $U_F$  se rozdělí v poměru sériových impedancí sítě. Potom pro uzly C a D platí vztah:

$$\frac{U_{FC}}{U_{FD}} = \frac{Z_{CE}}{Z_{DE}} = \frac{S_k^{(D)}}{S_k^{(C)}} \quad (4.13)$$

kde  $S_k^{(i)}$  jsou zkratové výkony v jednotlivých uzlech sítě.

Od místa působení rušivého napětí  $U_F$  směrem ke spotřebiči je míra vjemu flickru téměř nezměněná  $P_{st}^{(A)} \approx P_{st}^{(B)} \approx P_{st}^{(C)}$ . Důvodem je, že impedance mezi uzly A a C je mnohem větší než impedance mezi uzlem A a zemí a proto lze impedanci zanedbat [7].

Toto platí ale jen pro teoretickou úvahu. V praxi s délkou vývodu přibývají i připojená odběrná zařízení a tím dochází k superpozici působení více rušivých zdrojů a velikost rušení flickrem se zvyšuje s narůstající kumulací spotřebičů resp. délkou vedení. Tento model pro šíření flickru se používá k výpočtům k předpokládaným hodnotám v uzlech sítě např. pro plánované připojení zařízení k síti.

## 4.7 Vztažná impedance

Zkratovou vztažnou impedancí pro síť NN, udává norma PNE 333430-0 [3]. Vztažené impedance pomáhají k určení zodpovědnosti za nedodržení kvality elektrické energie v distribučních sítích. Pokud v distribuční síti je zkratová impedance menší než zkratová vztažná impedance, nemělo by dojít vlivem provozu běžných spotřebičů k nedodržení kvality napětí. Pokud by se tak stalo, s velkou pravděpodobností nekvalitu napětí by způsobovalo některé nestandardní zařízení (např. lis, katr...).

Norma PNE 333430-0 udává velikost vztažných vnitřních impedancí pro zařízení se jmenovitým proudem do 16A a 75A. Vnitřní impedance (impedance smyčky) je tvořena impedancí fázového přívodního vodiče a impedancí vodiče PEN, na kterou mají vliv paralelní impedance uzemněných prvků v trase přívodního vedení (např. uzly transformátorů, kabelové skříně apod.) [3].

$Z_{VZsmyčky} = 0,47\Omega$  pro zařízení se jmenovitým proudem do 16A

$Z_{VZsmyčky} = 0,35\Omega$  pro zařízení se jmenovitým proudem do 75A

K vnitřní impedanci je ekvivalentem 3f zkratová vztažná impedance resp. zkratový vztažný výkon. Norma PNE 333430-0 udává hodnoty vztažné zkratové impedance v síti NN pro spotřebiče se jmenovitým proudem do 16A a 75A [3].

$Z_{VZ} = 0,283\Omega, S_K'' = 570 \text{ kVA}$  pro zařízení se jmenovitým proudem do 16A

$Z_{VZ} = 0,215\Omega, S_K'' = 760 \text{ kVA}$  pro zařízení se jmenovitým proudem do 75A

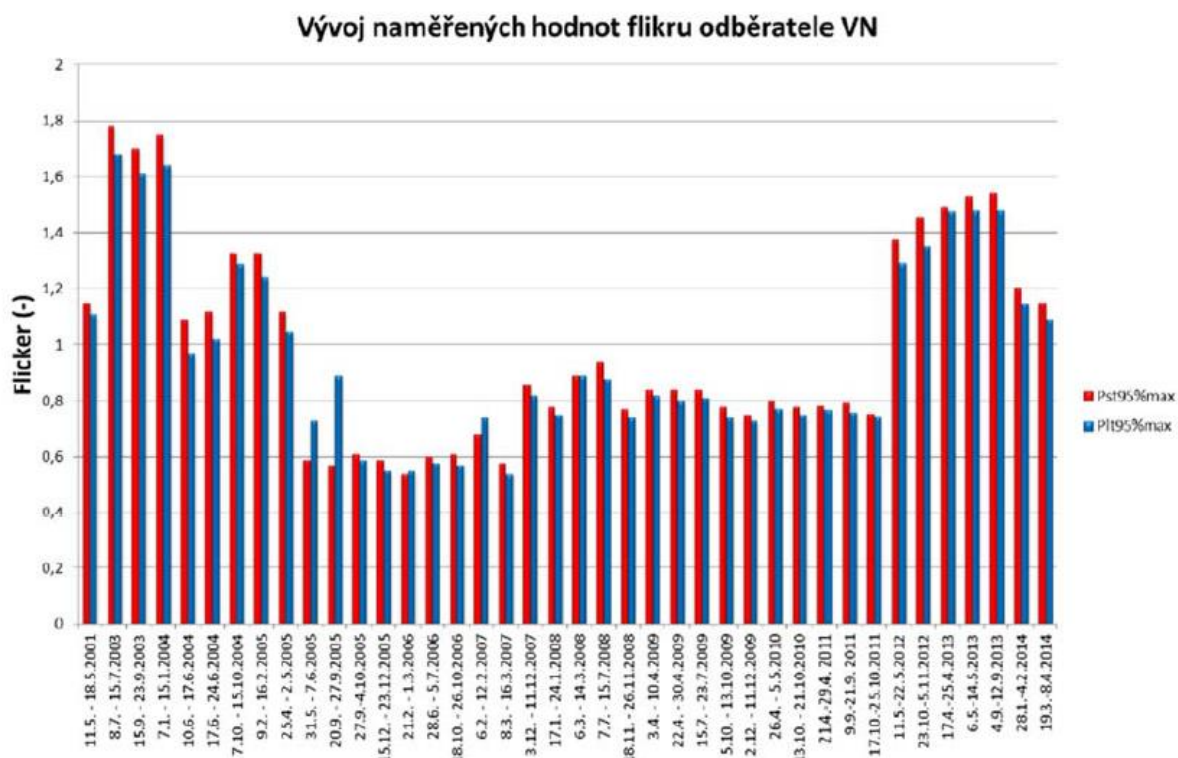
## 4.8 Markantní přispěvovatel

Markantní přispěvovatel zpětných vlivů na síť je odběratel (provozovatel nestandardních zařízení, průmyslový závod apod.), který svým provozem negativně ovlivňuje kvalitu dodávky elektrické energie v neprospěch ostatních odběratelů a způsobuje vyšší úroveň zpětných vlivů na napájecí síť, než udává norma PNE 333430-0. Markantní přispěvovatel se rozezná od ostatních odběratelů tím, že průběh rušivé veličiny flikru koresponduje s jeho odběrem. Markantní přispěvovatelem v síti NN je pak takový odběratel, který vyvolává zpětné vlivy na síť, na impedanci sítě menší než je vztažná impedance [15].

## 5 Analýza zpětných vlivů na napájecí síť u konkrétního odběratele

V této kapitole je uveden konkrétní příklad vyhodnocení zpětných vlivů na síť u skutečného odběratele na základě praktického měření. Naměřené hodnoty byly poskytnuty společností E.ON Česká republika s.r.o, která je hlavním distributorem el. energie pro jižní Čechy. Samotné měření bylo provedeno ve výrobním závodě společnosti Magna Cartech s.r.o v Českých Velenicích. Jedná se o VN odběratele, tzn. že přípojný bod se nachází na napěťové hladině 22 kV. Tento odběratel se zabývá výrobou plechových výlisků a svařenců pro automobilový průmysl, proto také z hlediska výrobní technologie převládá lisování a bodové svařování. V jeho strojním parku se nachází technologie, které mají časově proměnlivou zátěž, která je příčinou kolísání napětí, jak je v úvodu práce popsáno.

### 5.1 Historie podniku z hlediska negativních zpětných vlivů na síť



Obr. 5.1 Vývoj flikru daného odběratele [9]

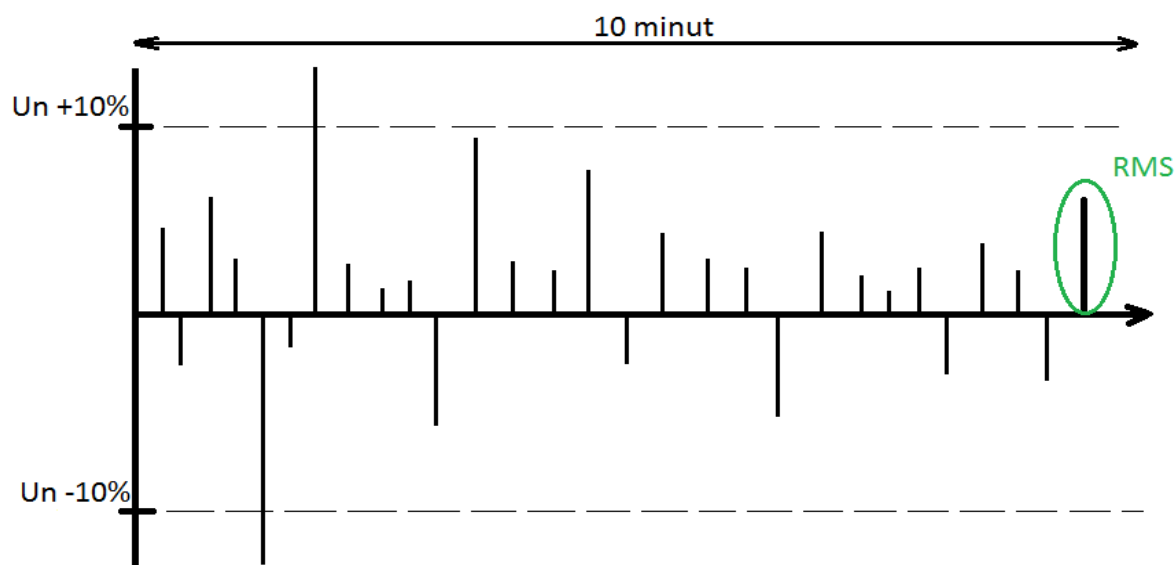
Tento odběratel je dlouhodobě sledován z hlediska kvality napětí a zpětných vlivů na síť. Jeho hlavním problémem je překračování limitních hodnot flikru. Obr. 5.1 ukazuje, že v počátcích jeho výroby od května roku 2001 až do dubna 2005 docházelo k překročení limitních hodnot flikru  $P_{lt} = 1$ . V květnu 2005 nastala obnova technologie, kdy došlo

k výměně nízkofrekvenčních svářeček za středofrekvenční. Tato výměna technologie způsobila pokles flikru pod limitní hodnotu  $P_{lt} = 1$ , čímž kvalita napětí odpovídá požadavkům normy ČSN EN 50160. K dalšímu nárůstu flikru nad limitní hodnotu  $P_{lt} = 1$  došlo v květnu 2012. Tento nárůst je zapříčiněn připojením nové technologie, kterou jsou dva velké lisy (P-AIDA a TR-AIDA). Tyto dva lisy jsou dominantním zdrojem rušení. Je nutné také poznamenat, že tento odběratel v celém svém provozním období, nespadá do přípustných limitních hodnot  $P_{lt}$  pro jednoho odběratele dle normy PNE 333430-0, který činí pro VN odběratele 0,25 [9].

## 5.2 Vyhodnocení zpětných vlivů na síť

Nyní přejdu k praktické části této práce na základě konkrétního měření u již výše zmiňovaného odběratele. Posoudím dopad zpětných vlivů na distribuční síť. Tento odběratel je připojen k síti **22 kV**, tedy má vlastní transformátor VN/NN. Měření bylo provedeno na VN i NN straně. **Strana VN – celý závod** (odběr celého podniku), **strana NN – odběr lisu P-AIDA**, pro který mám k dispozici naměřená data, ale ze stejné NN sběrný rozvaděče 0,4 kV jsou napájeny oba lisy (resp. výstup transformátoru VV/NN napájí oba lisy, které jsou dominantním zdrojem rušení). Dále pro rozhodnutí odkud se flikr šíří budu potřebovat zkratové výkony v bodech měření, tedy na VN i NN straně, na VN straně již hodnotu zkratového výkonu znám  $S_K^{(VN)} = 29\text{MVA}$ . Na NN straně hodnotu zkratového výkonu  $S_K^{(NN)}$  si spočítám. Výkon transformátoru  $S_N = 1600\text{ kVA}$  a  $u_k = 6\%$ . Impedanci propojení mezi bodem měření VN a VN stranou trať VN/NN zanedbám (cca 200 m VN kabelu). Oba lisy mají stejné parametry: jmenovitá síla  $F_N = 6\ 300\text{ kN}$ , Servo Motor Rating 500/350 kW, Power Supply 400V/50Hz, EU Standart.

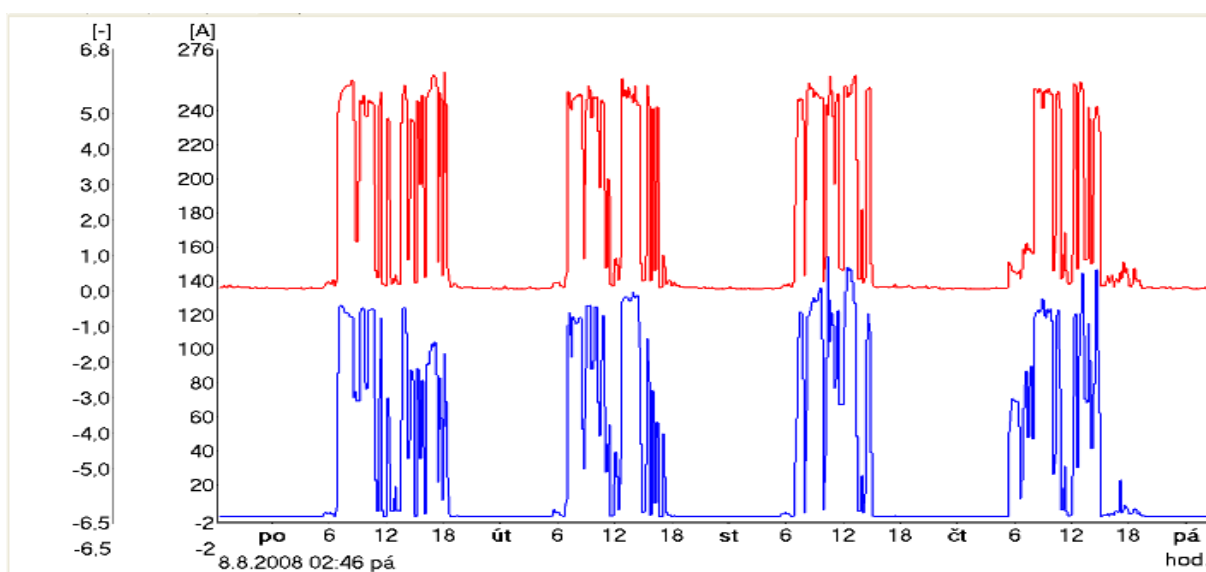
Při vyhodnocování/prokazování kvality napětí je nutné mít k dispozici minimálně **týdenní** měření po 10 minutových krocích (1008 měřicích intervalů za týden). Měření je vhodné začít v 00:00. Při měření se zaznamenávají průměrné efektivní hodnoty (RMS) napájecího napětí (příp. proudu) v měřicích intervalech 10 minut. Pro lepší představu RMS hodnoty je na *obr. 5.2* grafické znázornění měření odchylky napětí.



RMS je průměrná efektivní hodnota v daném časovém intervalu za 10 minut  
 Obr. 5.2 Průběh měření RMS hodnoty

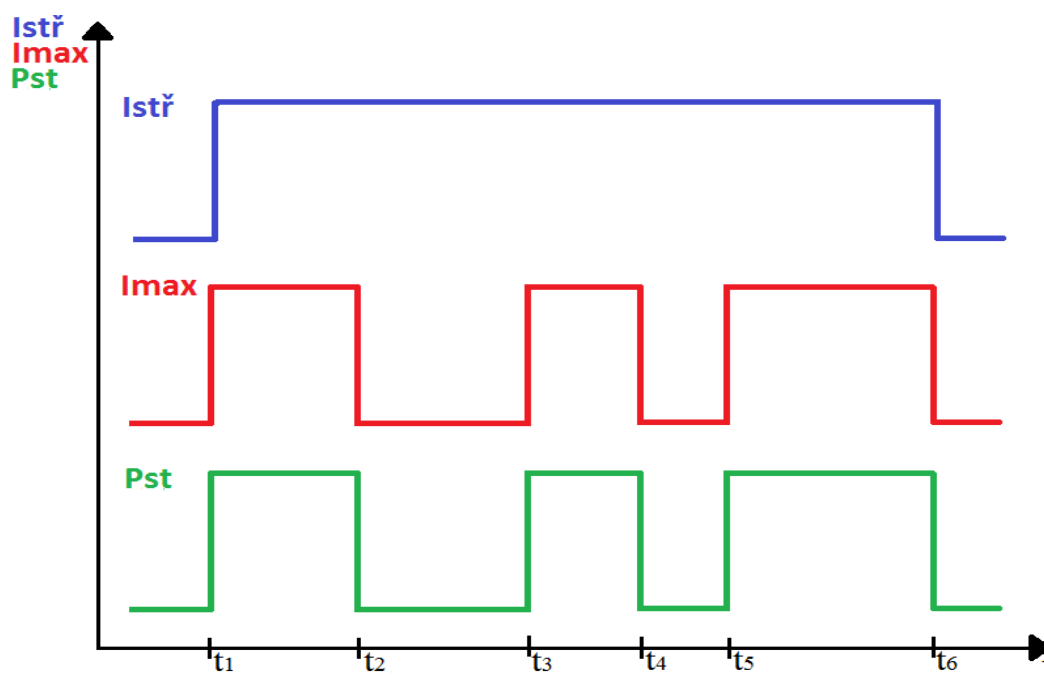
Takto získaná RMS hodnota je porovnána s normou ČSN EN 50160, zdali je odchylka napětí v dovolených mezích (pro NN musí být 95% času RMS hodnota napětí v mezích  $\pm 10\% U_N$ ) [1].

Při prokazování, že kolísání napětí (flikr), způsobuje daný odběratel, je nutné vycházet ze závislosti mezi velikostí odběru měřeného odběratele a úrovní zpětných vlivů na síť, tedy závislosti velikosti flikru na velikosti proudu/výkonu. Pokud průběhy měřeného odebíraného proudu a rušivé veličiny flikru spolu jednoznačně korespondují, jak je znázorněno na obr. 5.3, potom je možné říci, že právě daný odběratel může za negativní vlivy v síti.



Obrázek 5.3 Flikr  $P_{st}$  (červeně) v závislosti na odebíraném proudu  $I_{st}$  (modře) v NN síti [9]

V praxi pro identifikaci markantního přispěvovatele se používá krátkodobá míra flikru  $P_{st}$  v závislosti na zatížení  $I_{stř}$  (průměrná efektivní hodnota za 10 min), protože průběh  $P_{st}$  vykazuje ostřejší hrany než průběh flikru  $P_{lt}$ . V případě větších podniků a průmyslových závodů, který během dne mění svůj charakter výroby nebo provozují různé technologie a výrobní linky, je vhodné a někdy nezbytně nutné zatížení v grafu vynášet ve formě  $I_{max}$  (jednoperiodový proudový extrém zaznamenaný během intervalu měření 10 min.). Protože při odhalování působení zpětných vlivů na síť těchto odběratelů, není vždy možné zjistit jejich vliv na síť na základě  $I_{stř}$ . Na obr. 5.4 je příklad takové situace, kdy není zcela možné na základě průběhu zatížení  $I_{stř}$  jednoznačně určit negativní vliv na síť odběratele s takovým zatížením. Z průběhu  $I_{max}$  lze vypočítat (z intervalů  $t_1 - t_2$ ,  $t_3 - t_4$  a  $t_5 - t_6$ ), kdy se mění velikost  $I_{max}$ , což značí provoz technologie, která vykazuje markantní zpětné vlivy na napájecí síť a koresponduje průběhem flikru  $P_{st}$ . To by nebylo možné z průběhů zatížení ve formě střední hodnoty za 10 minut ( $I_{stř}$ ), protože celý měřený čas zůstává konstantní [15].

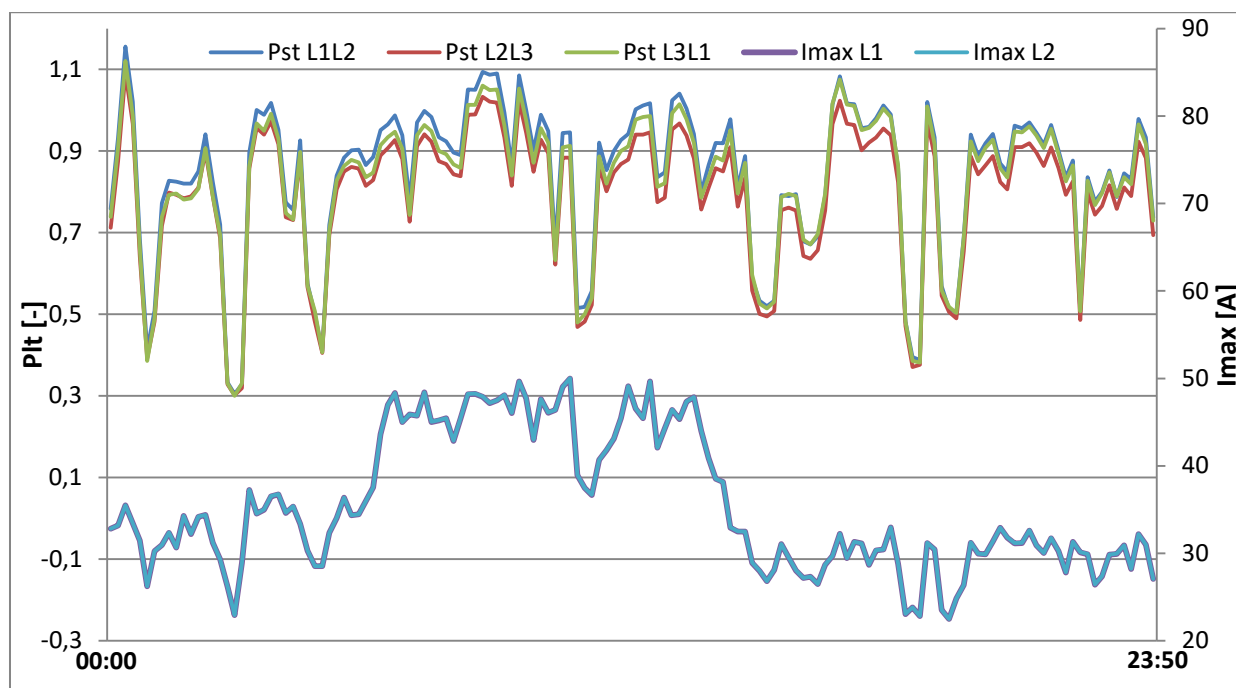


Obrázek 5.4 Prokázání zpětných vlivů na základě  $I_{max}$

Nyní se zaměřím na daného odběratele a pokusím se vysledovat korelaci (závislost) mezi velikostí odběru a úrovní zpětných vlivů na síť, tedy závislost velikosti flikru na odebíraném proudu a to jak na VN tak i na NN straně. Ke sledování závislosti flikru na odebíraném proudu lze použít jakýkoliv časový interval, ale je dobré zvolit si takový interval, ze kterého lze tuto závislost přehledně vysledovat. V tomto případě si zvolím jeden provozní den podniku.

Protože se jedná o VN odběratele připojeného k síti 22 kV, který má vlastní transformátor VN/NN, bude mě především zajímat závislost flikru na odebíraném proudu na straně VN. Napájecí bod na straně VN je důležitý z hlediska, protože napájí celý podnik. Tudiž tento napájecí bod je rozhodující pro rozhodnutí, zdali je tento odběratel markantním přispěvovatelem zpětných vlivů na síť.

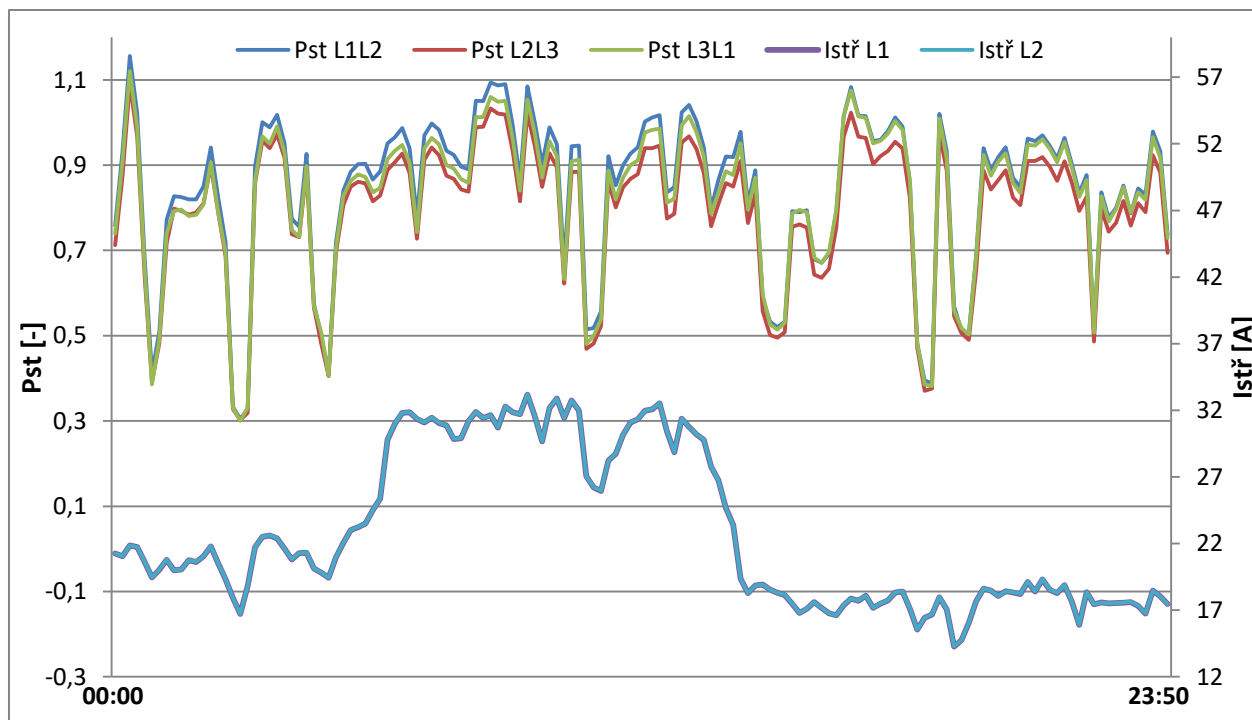
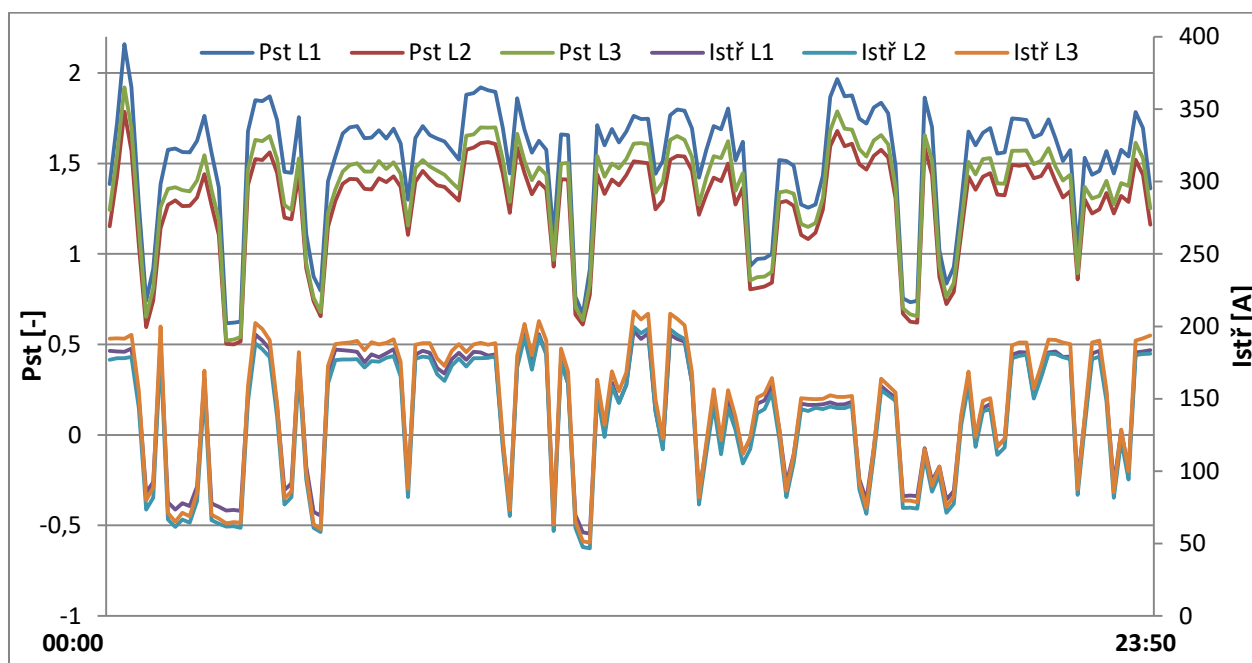
Na straně VN je vhodné vynášet zatížení ve formě  $I_{\max}$ , aby se předešlo situaci již výše popisovanou, kdy za přispění zpětných vlivů jiných technologií by průběh  $I_{\text{stř}}$  nekorespondoval s průběhem  $P_{\text{st}}$ . Pak by nebylo možné prokázat zpětné vlivy odběrateli, který je za ně odpovědný. V tomto případě to sice neplatí, ale  $I_{\max}$  vykazuje ostřejší hrany než  $I_{\text{stř}}$  a proto je dobré porovnat průběh  $I_{\max}$  s průběhem  $P_{\text{st}}$ . Obr. 5.5 zobrazuje tuto závislost a je vidět, že spolu průběhy veličin  $I_{\max}$  a  $P_{\text{st}}$  **korespondují**.



Obr. 5.5 Závislost  $P_{\text{st}}$  (horní graf) na  $I_{\max}$  (spodní graf) na straně VN

Pokud vycházím z předpokladu, že parametr flikru má korespondovat s odběrem markantního přispěvovatele, který nese dominantní podíl za zpětné vlivy na síť, pak právě sledovaný odběratel je **markantním přispěvovatelem**.

Na obr. 5.6 je potom vynesena závislost mezi odebíraným proudem  $I_{\text{stř}}$  a krátkodobou mírou flikru  $P_{\text{st}}$ , ze které je také patrné, že spolu tyto dva průběhy korespondují.

Obr. 5.6 Závislost  $P_{st}$  (horní graf) na  $I_{stř}$  (spodní graf) na straně VNObr. 5.7 Závislost  $P_{st}$  (horní graf) na  $I_{stř}$  (spodní graf) na straně NN

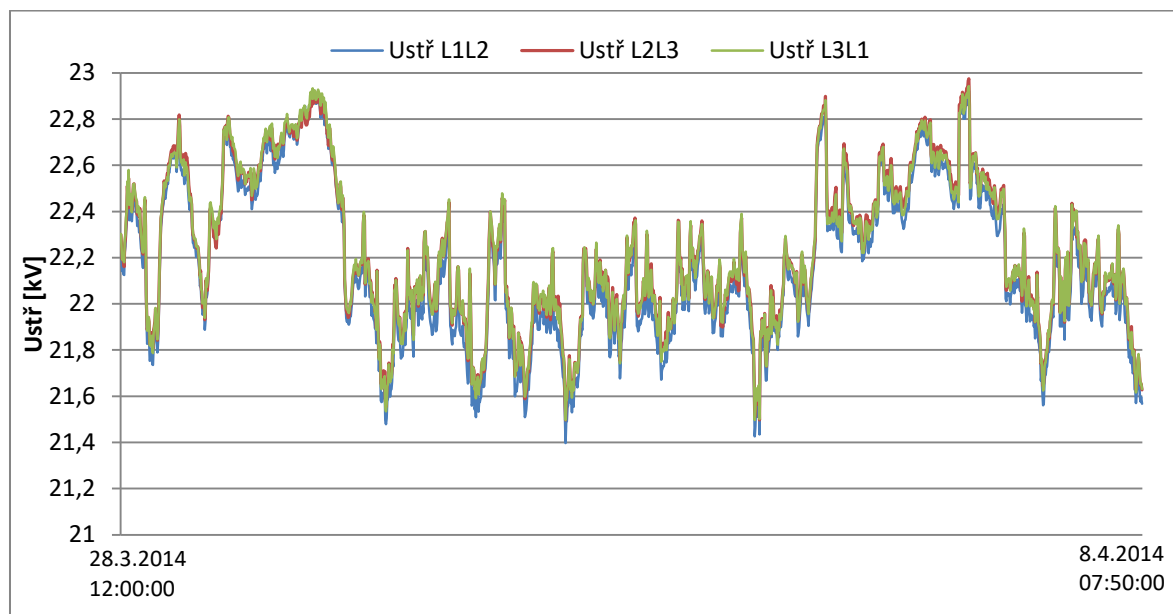
Na obr. 5.7 je vynesena závislost  $P_{st}$  na  $I_{stř}$  na straně NN (odběr lisu P-AIDA). Z grafu vyplývá, že průběh flikru koresponduje s průběhem odebíraného proudu. To vypovídá, že lis je dominantním zdrojem energetického rušení.

Tento podnik má třísměnnou pracovní dobu (neustálý pracovní režim) a odebíraný proud tudíž neklesl v celém měřicím intervalu na nulu. Proto nelze vidět, tak jednoznačnou



závislost mezi průběhem flikru a odebíraným proudem jako je na *obr. 5.3*, ale i tak je závislost mezi flikrem a odebíraným proudem zřetelná.

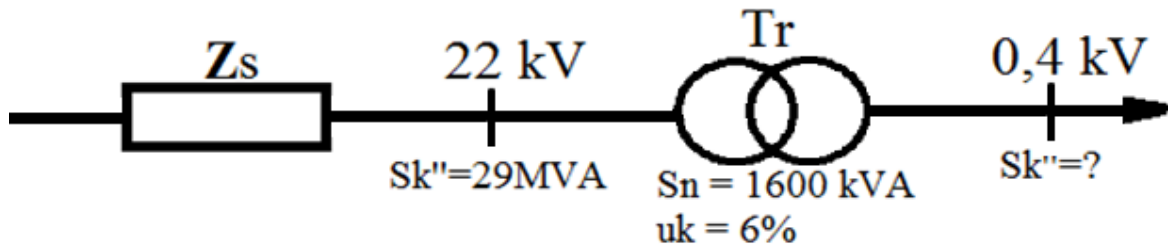
Na *obr. 5.8* je zobrazen průběh kolísání napětí v celém intervalu měření u sledovaného odběratele. Z průběhu napětí je viditelné, že velikost amplitudy napětí nepřesahuje hodnotu  $\pm 10\%U_n$ .



*Obr. 5.8 Průběh kolísání napětí (RMS hodnota) na straně VN v celém rozsahu vyhodnocení od 28.3.2014 (12:00:00) do 8.4.2014 (07:00:00)*

### 5.3 Porovnání naměřených hodnot s matematickým modelem pro šíření flikru v síti

Nyní porovnám výsledky praktického měření s teoretickými poznatky šíření flikru, které jsem již v této práci popisoval (kapitola 4.5). Podle teoretických předpokladů se flikr směrem k napájecí síti zmenšuje, protože rušivé napětí  $U_F$  se rozdělí v poměru sériových impedancí. K šíření flikru budu potřebovat zkratové výkony v bodech měření, tedy na straně VN a NN. Na straně VN již hodnotu zkratového výkonu znám  $S_K^{(VN)} = 29 \text{ MVA}$ . Na straně NN si zkratový výkon spočítám. Také budu potřebovat celkovou impedanci sítě  $Z_c$  vztaženou na napěťovou hladinu 0,4 kV. Vycházím z *obr. 5.9*, kde je zobrazeno jednoduché schéma pro výpočet.

Obr.5.9 Schéma sítě pro výpočet  $S_{K''}$  na NN

$$Z_S = \frac{U_N^2}{S_{K''(VN)}} \cdot \left(\frac{1}{p^2}\right) = \frac{22\,000^2}{29 \cdot 10^6} \cdot \left(\frac{400}{22 \cdot 10^3}\right)^2 = 5,517 \cdot 10^{-3} \, \Omega$$

$$Z_T \approx X_T = \frac{u_{k\%}}{100} \cdot \frac{U_N^2}{S_N} = \frac{6}{100} \cdot \frac{400^2}{1600 \cdot 10^3} = 6 \cdot 10^{-3} \, \Omega$$

$$Z_C = Z_S + Z_T = 5,517 \cdot 10^{-3} + 6 \cdot 10^{-3} = \mathbf{0,0115 \, \Omega}$$

$$NN: S_{K''(NN)} = \frac{U_N^2}{Z_C} = \frac{400^2}{0,0115} = \mathbf{13,913 \, MVA}$$

Zkratový výkon na straně NN vyšel 13,913 MVA. Výpočet jsem provedl pomocí normy PNE 33 3430-0, kde jsou uvedeny příklady výpočtu jednotlivých impedancí sítě a zkratových výkonů ve společném napájecím bodě sítě. Z poměru zkratových výkonů je již patrné, že flikr ze strany NN na stranu VN se bude snižovat směrem ke zdroji. Nyní dosadím do vzorce (4.11) pro teoretické šíření flikru na základě poměrů zkratových výkonů (za  $P_{st}^{(NN)}$  jsem dosadil naměřenou hodnotu krátkodobé míry flikru  $P_{st}^{(NN)} = 2,057$ ). Nejprve si spočítám krátkodobou míru vjemu flikru  $P_{st}$  na VN straně:

$$P_{st}^{(VN)} = P_{st}^{(NN)} \cdot \frac{S_{K}^{(NN)}}{S_{K}^{(VN)}}$$

$$P_{st}^{(VN)} = 2,057 \cdot \frac{13,913 \cdot 10^6}{29 \cdot 10^6}$$

$$P_{st}^{(VN)} = \mathbf{0,987}$$

Hodnota krátkodobé míry flikru na VN straně vyšla  $P_{st} = 0,987$ . Ten samý výpočet provedu také pro dlouhodobou míru flikru  $P_{lt}$ . Budu mít tak k dispozici k porovnání výsledky získané na základě matematického modelu popisující šíření flikru v síti s praktickými výsledky měření.

$$P_{lt}^{(VN)} = P_{lt}^{(NN)} \cdot \frac{S_K^{(NN)}}{S_K^{(VN)}}$$

$$P_{lt}^{(VN)} = 1,986 \cdot \frac{13,913 \cdot 10^6}{29 \cdot 10^6}$$

$$P_{lt}^{(VN)} = \mathbf{0,953}$$

Pokud nyní porovnáím hodnoty z tab. 5.1, které byly získány měřením a výpočtem, lze říci, že se neshodují. Rozdíl hodnot je však technicky přijatelný, protože při výpočtu zkratového výkonu jsem zanedbal přibližně 200 metrů VN kabelu, který vede od VN rozvaděče k transformátoru. Dále napětí nakrátko transformátoru  $u_k$ , se udává s přesností  $\pm 10\%$ . K rozdílu hodnot může přispívat také vliv druhého lisu a další provozovaná technologie tohoto podniku, které matematický model pro šíření flikru nezvažuje. Musím ale podotknout, že hodnoty získané měřím a výpočtem spolu nikdy nesouhlasí, protože v síti je spousta vlivů, s kterými právě matematický model nepočítá (např. vliv dalších technologií a odběratelů). V tomto případě hodnota flikru získaná měřením  $P_{lt} = 1,088$  a hodnota flikru získaná výpočtem  $P_{lt} = 0,953$  (nejhorší z fází) je poměrně dobrá přesnost.

Tab. 5.1 Hodnoty flikru získané měřením a výpočtem na straně VN

Fliktr (způsob určení)	měření	výpočet
$P_{lt}$ [-]	1,088	0,953
$P_{st}$ [-]	1,13	0,987

#### 5.4 Porovnání flikru s normou ČSN EN 50160 a PNE 333430-0

Nyní přejdu k vyhodnocení parametru flikru z hlediska shody s normou ČSN EN 50160. Norma říká že „Za normálních provozních podmínek musí být po 95% času, v libovolném týdenním období, dlouhodobá míra vjemu flikru  $P_{lt} \leq 1$ .“ [1]. Tedy 5% času může být hodnota dlouhodobé míry flikru  $P_{lt}$  nad limitní hodnotou flikru  $P_{lt} = 1$ . Pokud porovnáím hodnotu flikru  $P_{lt95\%}$  (95% pertencil) získanou měřením s limitní hodnotou flikru  $P_{lt} = 1$ , tak z uvedených hodnot v tab. 5.2 vidím, že na hladině NN limitní hodnotu

flikru  $P_{It} = 1$  přesahují všechny tři fáze. Na hladině VN je situace obdobná, s tím rozdílem že hodnota  $P_{It95\%}$  zde přesahuje limitní hodnotou flikru  $P_{It} = 1$  jen o velmi malou hodnotu, ale podle normy ČSN EN 50160 tato hodnota nevyhovuje kvalitě napětí v místě připojení. Obvykle se vyhodnocuje nejhorší hodnota ze všech tří fází (v tab. 5.2 označena červeně).

Tento odběratel pak několikanásobně překračuje normu PNE 333430-0, která udává limity zpětných vlivů pro jednoho odběratele. Při kumulaci většího počtu odběratelů by nemělo dojít k překročení limitních hodnot flikru, který činí pro jednoho VN odběratele  $P_{It} = 0,25$ .

Tab.5.2 Hodnoty flikru  $P_{It95\%}$  a  $P_{It100\%}$

fáze	NN			VN		
	L1	L2	L3	L1L2	L2L3	L3L1
$P_{It95\%}$	1,986	1,675	1,773	1,088	1,028	1,056
$P_{It100\%}$	2,679	2,269	2,377	1,448	1,378	1,422

Tento odběratel má ve vlastnictví transformátor VN/NN a je tedy připojen k síti 22 kV. Z hlediska dodržení kvality napětí jsou důležité hlavně hodnoty flikru na straně VN, protože na straně VN musí tento problém řešit distributor elektřiny, z důvodu aby tento odběratel neovlivňoval svými negativními vlivy další odběratele. V tab. 5.2 je ještě pro představu uvedena nejvyšší naměřená hodnota dlouhodobé míry flikru  $P_{It100\%}$  v celém měřeném intervalu.

Zjistil jsem tedy, že limitní hodnoty normy ČSN EN 50160 ani normy PNE 333430-0 nejsou sledovaným odběratelem dodrženy. Proto je nutné, aby se provedli nápravná opatření, která by negativní vlivy na síť omezily, a v bodě připojení odběratele by došlo ke splnění podmínek kvality elektrické energie.

## 6 Nápravná opatření pro omezení flikru

Dle Energetického zákona 458/2000 Sb.[5] je odběratel elektrické energie povinen provádět dostupná technická opatření zamezující ovlivňování kvality elektřiny v neprospěch ostatních odběratelů. Provozovatel distribuční soustavy má právo omezit nebo přerušit, dodávku elektřiny odběrateli se zařízením, které ovlivňuje kvalitu elektřiny v neprospěch ostatních odběratelů a odběratel nevybavil toto zařízení dostupnými technickými prostředky k omezení těchto vlivů. Za dostupná technická opatření lze považovat např. instalaci vhodného kompenzačního zařízení, zařízení pro filtraci harmonických, pro symetrizaci odběru, eliminaci flikru apod.

K řešení, že distributor odřízne od dodávky elektřiny svého zákazníka, ale dochází jen zřídka, zvláště pokud se k tomu ještě jedná o velký průmyslový závod. V takových případech se jedná o dlouhá jednání mezi distributorem a daným podnikem o nalezení nejlepšího technického řešení za nejnižší finanční náklady k omezení negativních zpětných vlivů na síť.

Překročení dovolené hodnoty flikru dle normy ČSN EN 50 160 je problém řešitelný a flikr lze snížit na přípustnou mez vhodnými technickými prostředky a řešeními. Řešení pro snížení flikru vyplývají z rovnice (6.1) pro rušivé napětí  $\Delta U_F$ .

$$\Delta U_F = R_S \cdot \Delta I \cdot \cos\varphi + X_S \cdot \Delta I \cdot \sin\varphi \quad (6.1)$$

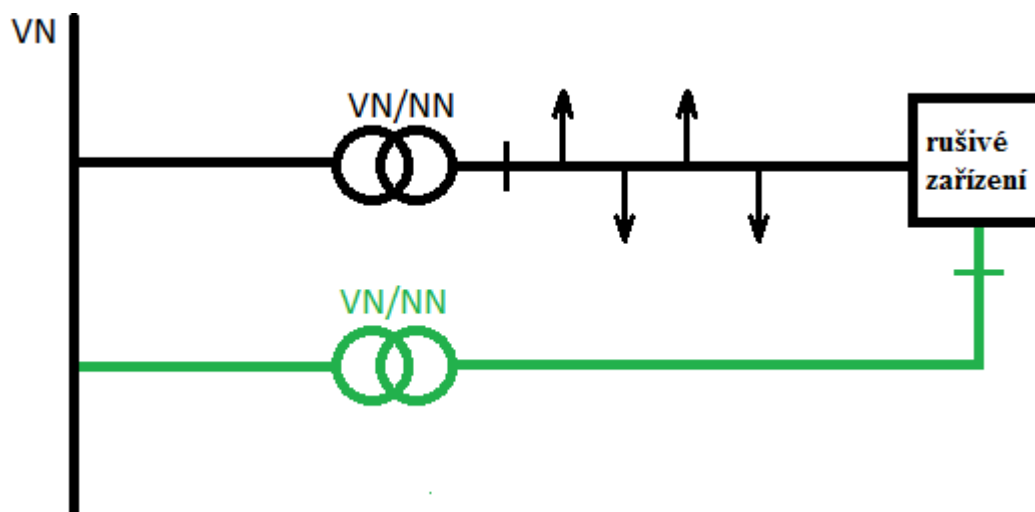
$R_S X_S$	Snížení impedance sítě resp. zvýšení zkratového proudu
$\Delta I$	Zmenšením proudového rázu (např. soft start)
$\cos\varphi, \sin\varphi$	Použitím dynamické kompenzace jalového výkonu

### 6.1 Omezení účinků flikru pomocí zvýšení zkratového výkonu

Účinky kolísání napětí závisí na velikosti amplitudy a počtu změn napětí v čase. Většina technických řešení bývá zaměřena na omezení amplitudy napětí, tzn. na zvýšení zkratového výkonu  $S_k''$  ve společném napájecím bodě sítě PCC následujícími způsoby[13]:

- Zmenšením impedance sítě (např. zvětšením průřezů přívodních vodičů, zkrácení vedení nebo nahradit stávající materiály vodičů vodivějšími materiály).
- Připojením zátěže na vyšší jmenovité napětí.

- Vybudování nové trafostanice (nejdražší, ale nejúčinnější řešení).
- Napájení zátěže z jiného vývodu NN resp. z jiné rozvodny 110/22 kV případně z jiného vývodu VN. Toto řešení je především možné ve městech nebo u VN odběratelů.
- Oddělení napájení kolísavé zátěže a stabilní zátěže z oddělených vinutí trojfázového transformátoru.
- Zvýšením jmenovitého výkonu transformátoru napájecího proměnlivou zátěž.
- Připojení sériových kondenzátorů.



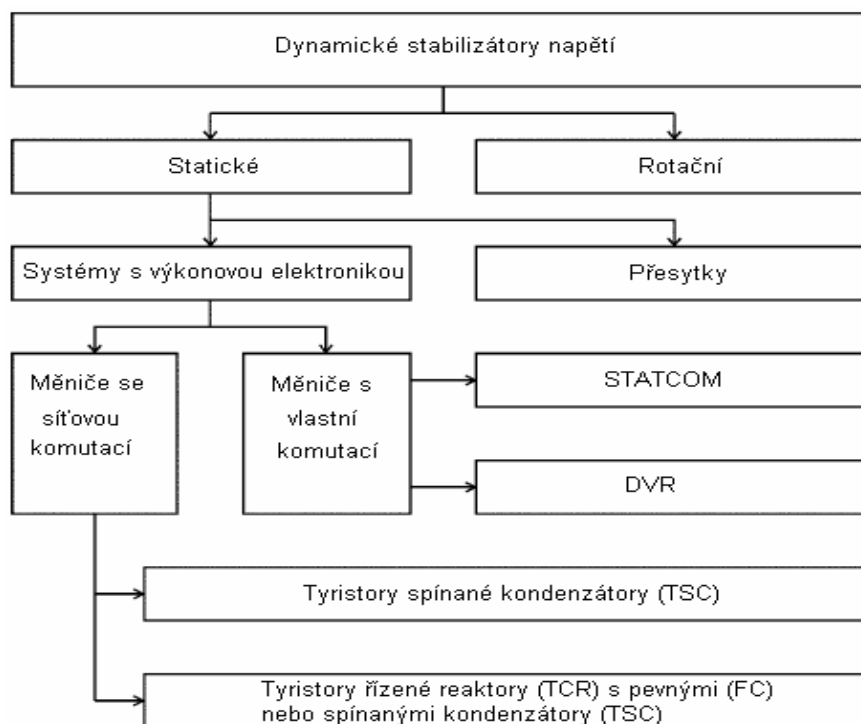
Obr. 6.1 Řešení s vlastní trafostanicí

## 6.2 Omezení účinků flikru pomocí dynamické kompenzace jalového výkonu

Činná složka impedance sítě, tedy odpor, je velmi malý, lze tedy říci, že rozhodující podíl na velikosti úbytku napětí má jalový proud. Změnami tohoto jalového proudu se mění i velikost úbytku napětí, což se projevuje kolísáním napětí. Pokud jalový výkon a v souvislosti s tím i jalový proud spotřebiče mění svoji velikost dynamicky ve velkém rozpětí, je i kolísání napětí značné, proto je nutné použít zařízení pro dynamickou kompenzaci jalového výkonu [8].

Hlavním rozdílem mezi dynamickou kompenzací a klasickou kompenzací jalového výkonu je způsob připojování kapacitní zátěže k síti. U klasické kompenzace je spínání realizováno pomocí elektromechanických stykačů. Přípustná četnost spínacích operací u stykačů větších výkonů je 120 operací za hodinu, průměrně jedno sepnutí/odepnutí za půl minuty. Dále připojují v neurčitěm okamžiku kapacitní zátěž k síti, což vyvolává výrazný

přechodový jev, který poškozuje kontakty stykačů a navíc je zdrojem impulzního rušení. To je také důvodem proč je klasická kompenzace nevhodná pro kompenzování jalového výkonu proměnlivé zátěže tam, kde se odběr jalového výkonu mění velice rychle (v řádech milisekund). Proto se používají dynamické kompenzátory jalového výkonu, které používají polovodičové spínače (tyristorové moduly nebo IGBT tranzistory), které mají spínací dobu menší než 20 ms. Jejich účinnost tedy závisí zejména na jejich jmenovitém výkonu a rychlosti reakce. Efektivní hodnota ve společném napájecím bodě, se může zvýšit nebo snížit, podle toho jestli je jalový výkon kapacitního nebo induktivního charakteru. Většinou se jedná o trojfázové systémy s vysokým jmenovitým výkonem, které jsou konstruovány pro stabilizaci napětí v hlavním bodě distribuční sítě nebo pro specifickou skupinu zátěží ve společném napájecím bodě PCC [11,13].



Obr. 6.3 Přehled dynamických stabilizátorů napětí [13]

### 6.2.1 Statické kompenzátory

Statické kompenzátory jsou považovány jako nejvýhodnější řešení pro zvýšení kvality elektrické energie a to jak z technického, tak i z ekonomického hlediska. Používají kapacitní nebo induktivní pasivní prvky, které jsou spínány polovodičovými spínacími prvky. Používají se především k řízení jalového výkonu za účelem regulace napětí. Jejich výhodou oproti dříve používaným synchronním rotačním kompenzátorům (synchronní stroj pracující naprázdno jako zdroj jalového výkonu) je nepřítomnost pohyblivých částí, tzn. menší náklady na údržbu, menší výskyt poruch a vyznačují se rychlou odezvou. Na

rozdíl od rotačních kompenzátorů, nejsou statické kompenzátory závislé na dodávce činné energie. V klasickém pojetí jsou tvořeny pasivními kompenzačními prvky, jako jsou výkonové kondenzátory. V novém pojetí to jsou tzv. aktivní filtry [8,17].

### 6.2.2 Aktivní filtry

Aktivní filtry jsou paralelně nebo sériově zapojené generátory, které využívají řízené střídače s pulzně šířkovou modulací (PWM), pomocí PWM lze dosáhnout, aby i v dynamických stavech byla zajištěna požadována kompenzace vyšších harmonických složek. Způsobem zapojení aktivního filtru lze vylepšit proud, napětí nebo obojí. Aktivní filtry se dělají paralelní, sériové nebo kombinované. Paralelní filtry upravují vlastnosti sítě od zátěže ke zdroji. Aktivní filtry zapojené sériově upravují síť od zdroje ke spotřebiči. A z toho tedy plyne, že pro omezení účinků kolísání napětí lze k rušivé zátěži připojit paralelně zapojené aktivní filtry [8].

### 6.2.3 Snížení proudových rázů $\Delta I$

Další opatření, které vyplývá z rovnice (6.1) lze realizovat přímo u motorů pro tlumení proudových rázů  $\Delta I$  např. použitím kotvy s nižším rozběhovým proudem, soft startu, frekvenčního měniče, přepínáním hvězda/trojúhelník nebo mechanického setrvačnicku, který tlumí rázy [7].

## 6.3 Možná nápravná opatření u sledovaného odběratele

Odběratel uzavřel s dodavatelem lisů smlouvu o koupi lisu ve které je psáno, že „Veškeré součásti a systémy musí splňovat požadavky stanovené normami podle evropského a českého práva a právních dohod v souladu s osvědčením CE“. Na základě vyhodnocení naměřených hodnot musím konstatovat, že při provozu lisů dochází k nesplnění normy ČSN EN 50160, kvůli překročení limitní hodnoty flikru. Z důvodu že dodavatel lisů je na základě kupní smlouvy odpovědný, aby lisy nepřekračovaly parametry stanovené normou ČSN EN 50160, navrhl zástupci dodavatele lisů řešení, kdy regulací bude snížena maximální hodnota proudů lisů, aby se snížila hodnota flikru na dovolenou mez. Toto řešení již bylo realizováno z důvodu finanční nenáročnosti a rychlosti realizace [9].



### 6.3.1 Snížení flikru stupněm zálohy síly prolisu

Nyní popíši, jaký vliv na snížení hodnoty flikru mělo navrhované řešení dodavatelem lisů. Lisy AIDA pracují s určitým stupněm zálohy síly prolisu, je to záloha při které je zaručeno že výlisek nebude zmetek. Tento stupeň zálohy byl na začátku provozu obou lisů nastaven na 100%. Snížení tohoto stupně zálohy se předpokládalo, že dojde ke snížení zpětných vlivů na napájecí síť, tak že dojde ke snížení velikosti proudových špiček při zachování jejich četnosti. Stupeň rezervy výkonu lisů označme jako koeficient R [9].

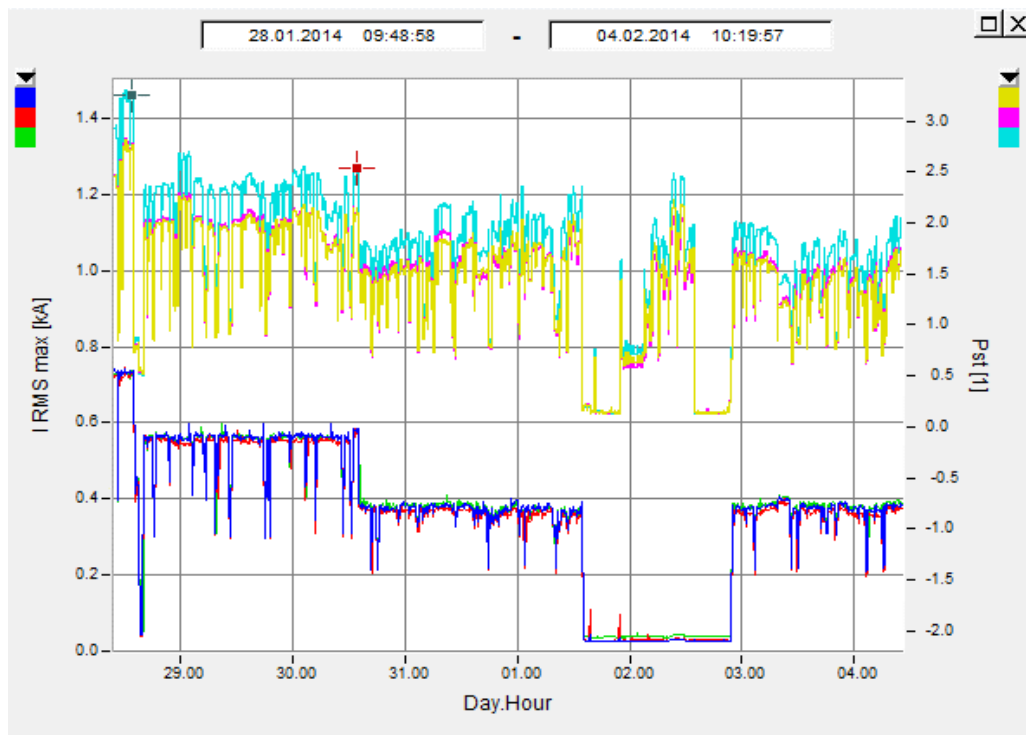
Toto opatření se realizovalo na zkoušku na lisu P-AIDA v následujících časových intervalech 28.1.2014 14:00 nastavení R = 75% a 28.1.2014 nastavení R = 60%. Měření bylo provedeno (pracovníky E.ON) na zkušební svorkovnici na hladině VN obchodního měření a na vývodu NN z transformátoru 22/0,4 kV [9].

Tab. 6.1 Vliv 20 ms (RMS) extrémů dle koeficientu R na lis P-AIDA

R=100%			R=75%			R=60%		
P <sub>max</sub> (kW)	Q <sub>max</sub> (Kw)	I <sub>max</sub> (A)	P <sub>max</sub> (kW)	Q <sub>max</sub> (kW)	I <sub>max</sub> (A)	P <sub>max</sub> (kW)	Q <sub>max</sub> (kW)	I <sub>max</sub> (A)
466	123	700	350	94	538	251	67	405

Z tab. 6.1 je patrné, že přenastavení koeficientu R má za následek výrazné snížení elektrických veličin  $I_{\max}$ ,  $P_{\max}$  a  $Q_{\max}$  a to jak při nastavení koeficientu prolisu R = 75% tak i při R = 60% oproti původnímu stavu lisu při nastavení koeficientu R = 100%.

Na obr. 6.4 je znázorněno, že snižování koeficientu R má poměrně značný vliv na snížení hodnoty flikru, zejména značný přínos na snížení flikru má přenastavení koeficientu R z hodnoty R = 100% na hodnotu R = 75%. Tato změna se také promítla v celkovém hodnocení flikru, kdy z předešlé hodnoty flikru  $P_{ft} = 1,489$  klesla na hodnotu  $P_{ft} = 1,147$ , která ale stále nevyhovuje normě ČSN EN 50160. Z obr. 6.4 je dále patrné, že v období kdy byl lis P-AIDA odstaven (interval s nulovým proudem  $I_{\max}$ ), objevují se v tomto období velice vysoké hodnoty flikru, které jsou způsobeny druhým lisem a další provozovanou technologií. Tento vliv dalších technologií způsobuje, že nelze objektivně posoudit snížení koeficientu R na lis P-AIDA z hlediska vlivu na snížení flikru [9].



Obr. 6.4 Závislost  $P_s$  (horní graf) na proudu  $I_{max}$  (spodní graf) na NN vývodu pro lis P-AIDA [9]

Kvůli poměrně velkému vlivu na snížení flikru na lis P-AIDA bylo doporučeno snížení koeficientu R také na lisu TR-AIDA. Měření bylo opět uskutečněno na zkušební svorkovnici obchodního měření na hladině VN a na vývodu z transformátoru 22/0,4 kV. Měření bylo provedeno při provozu obou lisů přenastavených na  $R = 60\%$  [9].

Výsledky z tohoto konkrétního měření při provozu obou lisů přenastavených na  $R = 60\%$  jsou zpracovány v této práci v 5. kapitole. Kdy flikr dosáhl hodnoty  $P_{ft} = 1,088$  a opět nevyhovuje normě ČSN EN 50160, ale oproti předchozímu měření je to zlepšení i když nepatrné. Na lis TR-AIDA není zaznamenán tak znatelný vliv přenastavení koeficientu R na snížení elektrických veličin  $I_{max}$ ,  $P_{max}$  a  $Q_{max}$  jako u lisu P-AIDA. Důležité je si uvědomit, že při porovnávání obou období měření byl zřejmě používán jiný výrobní proces. V tomto konkrétním případě se podařilo úroveň flikru podstatně snížit pouhým přenastavením lisu bez negativního vlivu na výrobu. Obecně bývají nápravná opatření finančně nákladná (např. dynamická kompenzace jalového výkonu).

### 6.3.2 Výstavba nové rozvodny 110/22kV

Další možné řešení, které by mělo výrazný vliv na snížení flikru je zvýšení zkratového výkonu  $S_k''$  v bodě připojení sledovaného VN odběratele. Společnost E.ON uvažuje o výstavbě nové rozvodny 110/22 kV v Českých Velenicích, což by mělo za následek zvýšení zkratového výkonu v bodě připojení u sledovaného odběratele. Výstavba nové rozvodny by způsobila nárůst zkratového výkonu ze stávající hodnoty 29 MVA na hodnotu 150 MVA. Tento nárůst zkratového výkonu je způsoben tím, že nová rozvodna zkrátí délku VN vedení ze současných cca 30 km na pouhé 2 km (tzn. značné snížení impedance sítě tj. zvýšení zkratového výkonu).

Nyní zkusím přepočítat šíření flikru z NN strany na VN stranu, kdy za zkratový výkon na VN straně dosadíme zkratový výkon, který by odpovídal hodnotě po výstavbě nové rozvodny 110/22 kV tedy  $S_k''^{(VN)} = 150 \text{ MVA}$ , na NN straně zkratový výkon dopočítám stejně jako v kapitole 5.3. Poté provedu posouzení k limitní hodnotě flikru  $P_{lt} = 1$  dle normy ČSN 50160, tak i k hodnotě pro jednoho odběratele dle normy PNE 33340-0.

$$Z_S = \frac{U_N^2}{S_k''^{(VN)}} \cdot \left(\frac{1}{p^2}\right) = \frac{22\,000^2}{150 \cdot 10^6} \cdot \left(\frac{400}{22 \cdot 10^3}\right)^2 = 1,067 \cdot 10^{-3} \Omega$$

$$Z_T \sim X_T = \frac{u_k\%}{100} \cdot \frac{U_N^2}{S_N} = \frac{6}{100} \cdot \frac{400^2}{1600 \cdot 10^3} = 6 \cdot 10^{-3} \Omega$$

$$Z_C = Z_S + Z_T = 1,067 \cdot 10^{-3} + 6 \cdot 10^{-3} = 7,067 \cdot 10^{-3} \Omega$$

$$NN: S_k''^{(NN)} = \frac{U_N^2}{Z_C} = \frac{400^2}{7,067 \cdot 10^{-3}} = \mathbf{22,64 \text{ MVA}}$$

Zkratový výkon na straně NN vyšel  $S_k'' = 22,64 \text{ MVA}$ . Nyní si dosadím do vzorce (4.11) pro teoretické šíření flikru na základě poměrů zkratových výkonů (dosadím  $P_{st}^{(NN)} = 2,057$  a  $P_{lt}^{(NN)} = 1,986$ , což jsou hodnoty získané měřením, které odpovídají upravenému provozu lisů) a zjistím hodnoty krátkodobé a dlouhodobé míry vjemu flikru na straně VN, které by odpovídali výstavbě nové rozvodny.

$$P_{st}^{(VN)} = P_{st}^{(NN)} \cdot \frac{S_K''^{(NN)}}{S_K''^{(VN)}}$$

$$P_{st}^{(VN)} = 2,057 \cdot \frac{22,64 \cdot 10^6}{150 \cdot 10^6}$$

$$P_{st}^{(VN)} = \mathbf{0,31}$$

$$P_{lt}^{(VN)} = P_{lt}^{(NN)} \cdot \frac{S_K^{(NN)}}{S_K^{(VN)}}$$

$$P_{lt}^{(VN)} = 1,986 \cdot \frac{13,913 \cdot 10^6}{29 \cdot 10^6}$$

$$P_{lt}^{(VN)} = \mathbf{0,3}$$

Z vypočítaných hodnot flikru  $P_{st}$  a  $P_{lt}$  je zřejmé, že výstava nové rozvodny 110/22kV v Č. Velenicích má velký přínos pro snížení hodnoty flikru. Nová rozvodna by přispěla ke snížení flikru o víc jak 70% původní hodnoty. V tab. 6.2 jsou uvedeny aktuální a přepočítané hodnoty flikru, které zahrnují výstavbu nové rozvodny. Nutné je ale zdůraznit, že tyto hodnoty jsou jen teoretické, protože matematický model nezahrnuje jiné vlivy ovlivňující kvalitu elektrické energie, jak jsme mohli vidět v kapitole 5.3 kde jsou porovnány naměřené hodnoty s hodnotami získanými za použití matematického modelu pro šíření flikru v síti. Porovnáním těchto hodnot jsem zjistil, že se liší, ale rozdíl hodnot je technicky přijatelný.

Tab. 6.2 Porovnání aktuálních naměřených a přepočítaných hodnot flikru

Flikr	aktuální	přepočítané (nová rozvodna)	pokles v %
Plt [-]	1,088	0,3	72,43
Pst [-]	1,13	0,31	72,57

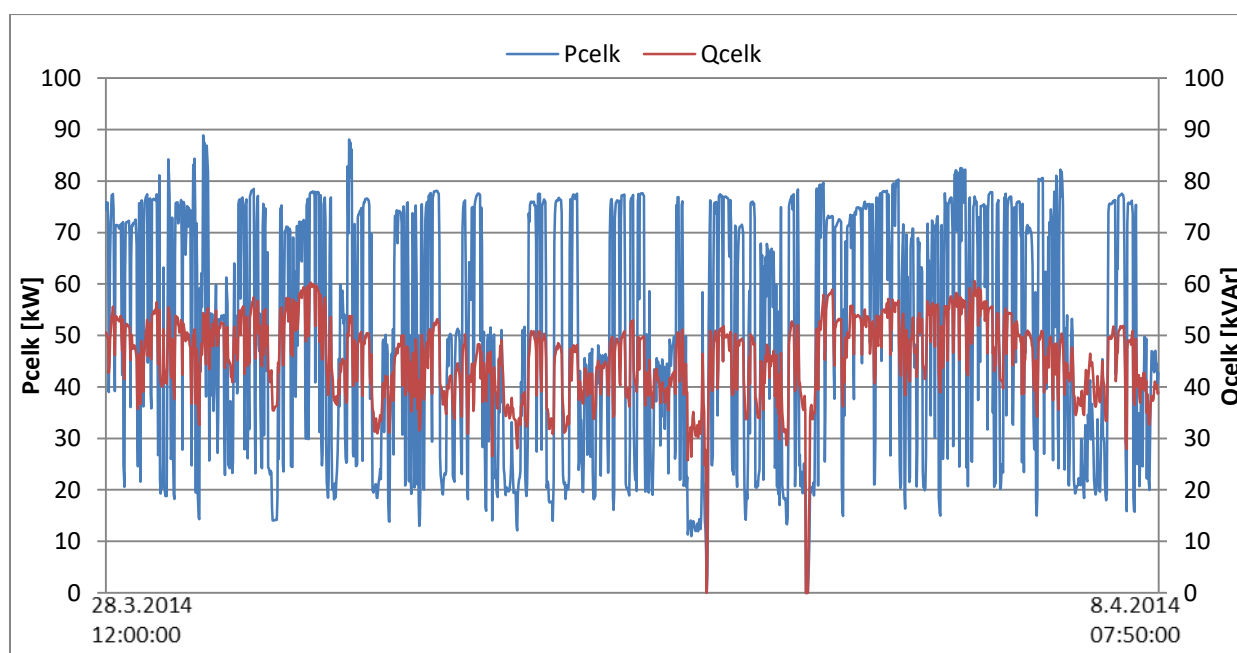
Pokud porovnáme přepočítané hodnoty flikru odpovídající výstavbě nové rozvodny s limitní hodnotou flikru  $P_{lt} = 1$  dle normy ČSN EN 50160, dojdeme k závěru, že přepočítaná dlouhodobá míra flikru  $P_{lt}$  (zahrnující výstavbu nové rozvodny) je značně pod

limitní hodnotou flikru a sledovaný odběratel by splnil podmínky dle normy ČSN EN 50160.

Nyní posoudím, zdali přepočítané hodnoty flikru, splňují podmínky normy PNE 33 3430-0, která udává limitní hodnoty flikru pro jednoho odběratele. Přípustné limitní hodnoty pro jednoho VN odběratele činí pro krátkodobou míru flikru  $P_{st} = 0,35$  a pro dlouhodobou míru flikru  $P_t = 0,25$ . Při porovnání přepočítaných hodnot s přípustnými hodnotami dle normy PNE 33 3430-0 vidím, že krátkodobá míra flikru  $P_{st}$  splňuje tuto normu ale dlouhodobá míra flikru  $P_t$  tuto hodnotu stále překračuje, ale již o velmi malou hodnotu. Na rozdíl od aktuální hodnoty, kdy přípustnou limitní hodnotu pro jednoho odběratele dle normy PNE 33 3430-0 překračuje několikanásobně a to již od počátku jeho výroby od roku 2001.

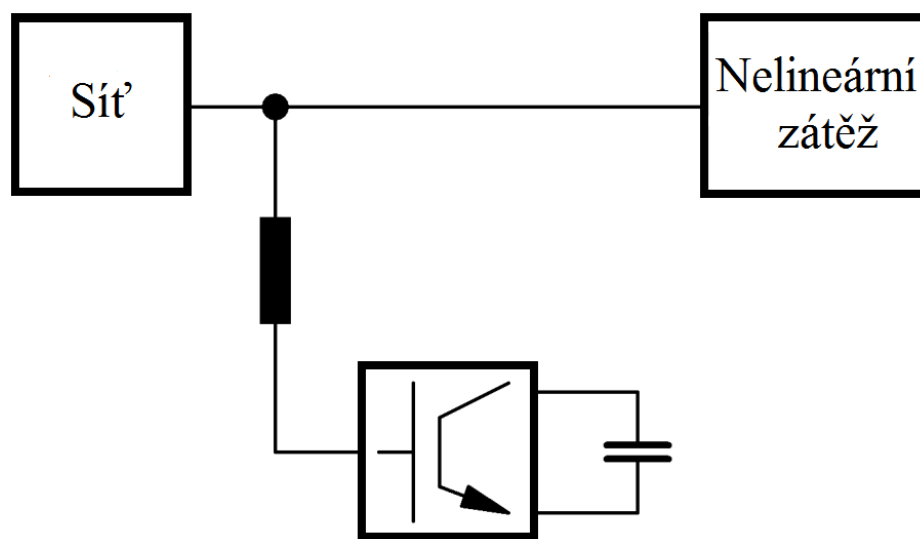
### 6.3.3 Aktivní filtr zapojený paralelně

Z analýzy naměřených dat vyplývá, že dynamicky měnící se odběr činného a jalového výkonu lisem P-AIDA, je velkým zdrojem energetického rušení v síti. Dalším možným teoretickým řešením k omezení zpětných vlivů na síť, protože nelze prakticky ověřit jeho reálný vliv u daného odběratele na snížení hodnoty flikru pod limitní hodnotu  $P_t = 1$ , je paralelní zapojení aktivního filtru k zátěži. V této práci toto řešení popíši jen teoreticky.



Obr. 6.5: Průběh celkového činného a jalového výkonu (RMS), na NN vývodu pro lis P-AIDA

Paralelně aktivní filtr tvoří řízený generátor proudu zapojený paralelně k zátěži. Generátor proudu generuje shodné harmonické proudy s nežádoucími harmonickými složkami proudu sítě, které jsou ovšem v protifázi a dojde k jejich vzájemnému vyrušení. Generátor proudu nebo napětí může být tvořen můstkovým zapojením polovodičových spínačů (IGBT tranzistorů). Vhodným spínáním tranzistorů můstku lze dosáhnout požadovaného tvaru proudu tekoucího do filtru. Tento proud však obsahuje velké množství harmonických v oblasti spínací frekvence, proto se zařazuje mezi vývody aktivního filtru a napájecí síť pasivní filtr (tlumivka), pracující jako dolní propust. Obr. 6.6 představuje schématické zapojení paralelního filtru do sítě [8].

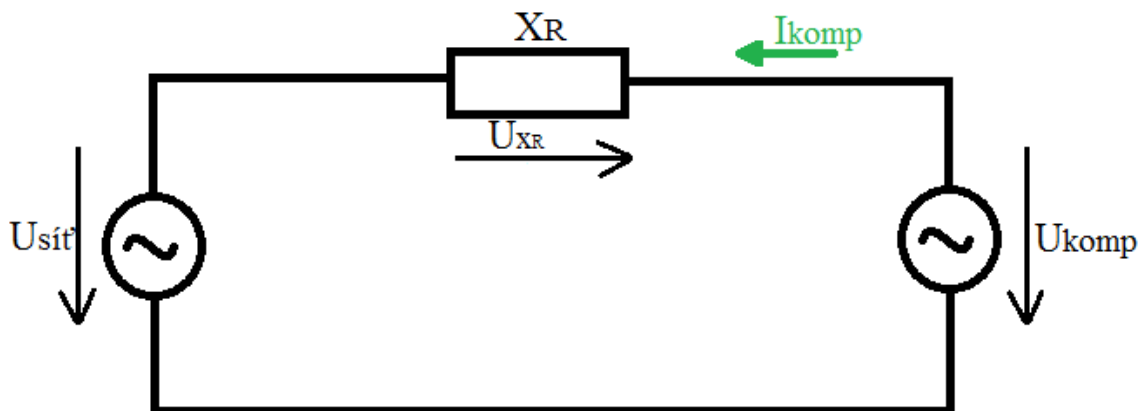


Obr. 6.6 Paralelní filtr připojený k síti

Firma ELCOM, a.s. nabízí statický regulátor jalového výkonu STELCOM®, který je postaven na principu paralelně zapojeného aktivního filtru. Toto zařízení je především určeno pro kompenzování kolísavého výkonu, dodávajícího do sítě od rozptýlených zdrojů (např. fotovoltaické a větrné elektrárny). Zařízení lze ale použít v průmyslových sítích, kde jsou kladeny vysoké nároky na regulaci jalového výkonu a zajištění stability napětí v síti. K takovému řešení dochází v případě, že jinými technickými prostředky nelze zajistit stabilitu napětí, protože zařízení pro dynamickou kompenzaci jalového výkonu je poměrně finančně náročná záležitost. Tyto náklady by se měly projevit ve slevě z ceny lisů, pokud by tato opatření realizoval daný odběratel, protože dle smlouvy dodavatel lisů plně zodpovídá za vady zařízení [16].

Kompenzátor STELCOM® je v principiálně totéž jako kompenzátor STATCOM, ale konstrukčně proveden na nižší napětí a výkon. STELCOM® dokáže regulovat velikost a směr proudu 1. harmonické a tím jalový výkon. Kompenzátor je vlastně zdrojem jalového proudu, který dodává takovou velikost proudu, aby byl docílen požadovaný účinník. Generování proudu je principiálně provedeno řízením napěťového zdroje připojeného přes indukčnost do sítě. Pokud generovaný proud předbíhá napětí, nacházíme se v kapacitní oblasti a kompenzátor se chová jako výkonový kompenzátor, tzn. dochází ke kompenzaci. V opačném případě, pokud generovaný proud se zpožďuje za napětím, nacházíme se v induktivní oblasti a zařízení se chová jako tlumivka a dochází k dekompenzaci. Jedná se o zařízení se součástmi výkonové elektroniky, proto lze proud regulovat zcela plynule s možností rychlé odezvy [16].

Princip funkce kompenzátoru, je takový, že jalový výkon se řídí změnou napětí kompenzátoru. IGBT tranzistory měniče jsou řízeny pulsně šířkovou modulací (PWM). Tranzistory jsou spínány tak, aby měnič kompenzátoru generoval napětí, které přes tlumivku  $X_R$  vyvolá požadovaný proud tekoucí do sítě. Pokud je toto napětí vyšší než napětí sítě, vznikne na reaktanci  $X_R$  úbytek napětí se stejnou fází jako má napětí kompenzátoru a do sítě teče kompenzační proud a zařízení se chová jako kondenzátor *obr. 6.7*. Při napětí kompenzátoru nižším než je napětí sítě, je napětí na reaktanci v opačném směru a proud má induktivní charakter a dochází k dekompenzaci [16].



Obr. 6.7 Zjednodušené schéma kompenzace

## Závěr

Cílem této bakalářské práce bylo popsat problematiku vlivu kolísání napětí na síť a na jeho nepříznivý jev tzv. flickr z hlediska vlivu na kvalitu napětí. Praktickou částí této práce bylo vyhodnocení účinku zpětných vlivů na síť u konkrétního odběratele, na základě naměřených dat a na teoreticky možná opatření pro omezení vlivu kolísání napětí.

Analýzou naměřených dat u sledovaného VN odběratele jsem došel k závěru, že tento odběratel je **markantním přispěvovatelem** negativních vlivů na síť, protože průběh rušivé veličiny flickru koresponduje s průběhem odebíraného proudu odběratele. Dále při vyhodnocování dat jsem zjistil, že odběratel překračuje limitní hodnotu pro síť dlouhodobé míry flickru  $P_{It} = 1$ , kterou udává norma ČSN EN 50160. Sledovaný odběratel dosahuje hodnoty dlouhodobé míry flickru  $P_{It} = 1,088$ , což je pro síť nepřijatelné. Také jsem porovnal tuto hodnotu s normou PNE 33 3430-0, která udává limitní hodnoty pro jednoho odběratele, která činí pro VN odběratele  $P_{It} = 0,25$ , odběratel tuto hodnotu přesahuje víc jak čtyřnásobně. Z toho tedy plyne, že odběratel **nesplňuje** podmínky normy ČSN EN 50160 ani normy PNE 33 3430-0.

Nejideálnějším řešením s ohledem na snížení míry flickru je výstavba nové rozvodny 110/22 kV v Českých Velenicích, o které uvažuje společnost E.ON. Nová rozvodna by měla vliv na zvýšení zkratového výkonu  $S_k''$  odběratele na straně VN ze současných 29 MVA na 150 MVA. Tento nárůst zkratového výkonu by zapříčinil na VN straně pokles dlouhodobé míry flickru na hodnotu  $P_{It} = 0,3$ , která odpovídá podmínkám pro síť dle normy ČSN EN 50160, ale stále neodpovídá limitním hodnotám pro jednoho odběratele dle normy PNE 33 3430-0, ale již jen o malý rozdíl. Dalším možným řešením, ale finančně náročným řešením pro odběratele, je zařízení pro dynamickou kompenzaci jalového výkonu, bohužel reálný vliv tohoto zařízení není vždy zaručený.

Kontrola a posuzování kvality elektrické energie resp. kvality napětí je důležitou oblastí energetiky, protože distributor se zaručuje svým zákazníkům za kvalitativní parametry napětí. Za nedodržení těchto parametrů, plynou sankce pro distributora tak i pro zákazníka. Z tohoto důvodu jsou kladeny značné nároky na měřicí přístroje, na teoretickou a praktickou analýzu dat.



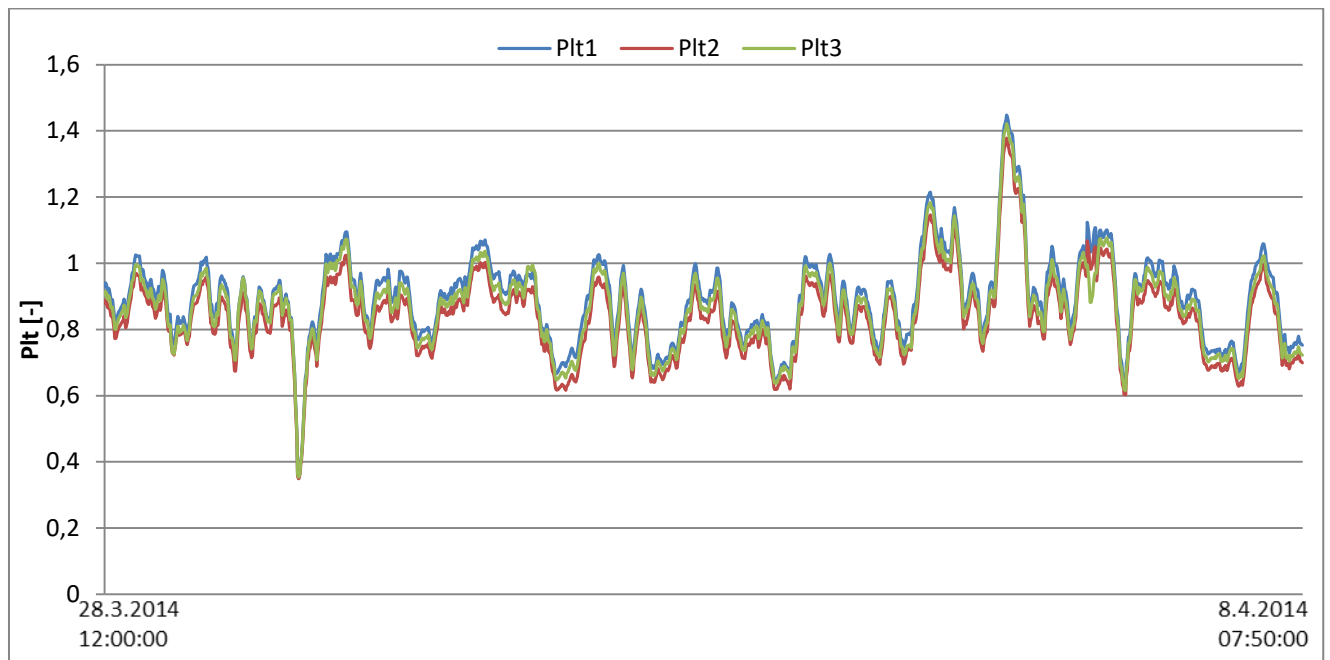
## Seznam literatury a informačních zdrojů

- [1] Norma ČSN EN 50160: *Charakteristiky napětí elektrické energie dodávané z veřejné distribuční sítě*, 3 vydání, 2012.
- [2] Pravidla provozování distribučních soustav, Příloha 3. *Kvalita napětí v distribuční soustavě, způsoby jejího zjišťování a hodnocení*. Energetický regulační úřad, 2016
- [3] PNE 333430-0: *Výpočetní hodnocení zpětných vlivů odběratelů a zdrojů distribučních soustav*. Podniková norma energetiky pro rozvod elektrické energie, 5. vydání 2015
- [4] TESAŘOVÁ, Miloslava. *Přednášky z předmětu průmyslová energetika*. Plzeň, 2016
- [5] Zákon 458/2000 Sb. v platném znění, *O podmínkách podnikání a výkonu státní správy v energetických odvětvích a o změně některých zákonů*. (Energetický zákon)
- [6] Vyhláška 540/2005 Sb., v platném znění, *O kvalitě dodávek elektřiny a souvisejících služeb v elektroenergetice*.
- [7] TESAŘOVÁ, Miloslava a ŠROBLOVÁ, Milada. *Průmyslová energetika*. 1. vyd. Plzeň: Západočeská univerzita, 2000. 154 s. ISBN 80-7082-703-3.
- [8] KORENC, Vladimír a HOLOUBEK, Jiří. *Kompenzace jalového výkonu v praxi*. Praha: IN-EL, 1999, 121 s, ISBN 80-86230-07-4.
- [9] KAŠPÍREK, Martin, KREJČÍ, Petr, SANTARIUS, Pavel a PROCHÁZKA, Karel. *Flickr vlivem průmyslových technologií*. XI. Konference „Energetické rušení v distribučních a průmyslových sítích“ ERU, Brno, 2014, 44 s, ISBN 978-80-905933-035.
- [10] KAŠPÍREK, Martin. *Problematika vyhodnocování parametru flicker*, , Brno, X. Konference „Energetické rušení v distribučních a průmyslových sítích“ ERU, 2012, 24 s, ISBN 978-80-260-3431-5.
- [11] ČESKÁ ENERGETIKA. *Dynamická kompenzace účinníků* [online]. [cit. 2017-04.20]. Dostupné z: [http://www.ceskaenergetika.cz/kompenzace\\_jaloveho\\_vykonu\\_ucinik\\_dekompenzace/dynamicka\\_kompenzace\\_uciniku\\_2.html](http://www.ceskaenergetika.cz/kompenzace_jaloveho_vykonu_ucinik_dekompenzace/dynamicka_kompenzace_uciniku_2.html)
- [12] HANZELKA, Zbigniew, BIEN, Andrzej. *Poruchy napětí* [online] 2005 [cit. 2016-11.11]. Dostupné z: <http://copperalliance.eu/docs/librariesprovider3/kvalita-elektrick%C3%A9-energie5-2-3-pdf.pdf?Status=Master&sfvrsn=0>
- [13] HANZELKA, Zbigniew, BIEN, Andrzej. *Poruchy napětí* [online], 2006 [cit. 2016-11.12]. Dostupné z : <http://copperalliance.eu/docs/librariesprovider3/kvalita-elektrick%C3%A9-energie5-1-4-pdf.pdf?Status=Master&sfvrsn=0>

- [14] KAŠPÍREK, Martin, *Šíření flickeru v paprskových VN a NN distribučních sítí*, Brno, XI. Konference „Energetické rušení distribučních v a průmyslových sítí“ ERU, 2014, 44 s, ISBN 978-80-905933-035.
- [15] KAŠPÍREK, Martin. *Problematika prokázání zpětných vlivů markantních příspěvovatelů*. Kouty nad Desnou, „Proceedings of the 14th International Scientific Conference ELECTRIC POWER ENGINEERING 2013, VSB – Technical University of Ostrava, Faculty of Electrical Engineering and Computer Science, Department of Electrical Power Engineering, MAY 28-30.2013, 4 s, ISBN 978-80248-2988-3.
- [16] ELCOM. *Statický regulátor jalového výkonu Stelcom®* [online]. [cit. 2017-04.25]. Dostupné z : <http://www.elcom.cz/cz/produkty/silnopruda-elektrotechnika/vykonove-specialni-menice/vylepseni-kvality-elekriny/staticky-regulator-jaloveho-vykonu-stelcom>
- [17] MAJLING, Eduard. *Způsoby řízení výkonových toků v přenosových soustavách* [online]. [cit. 2017-04.20]. Dostupné z: <http://oenergetice.cz/technologie/elektroenergetika/zpusoby-rizeni-vykonovych-toku-v-prenosovych-soustavach/>

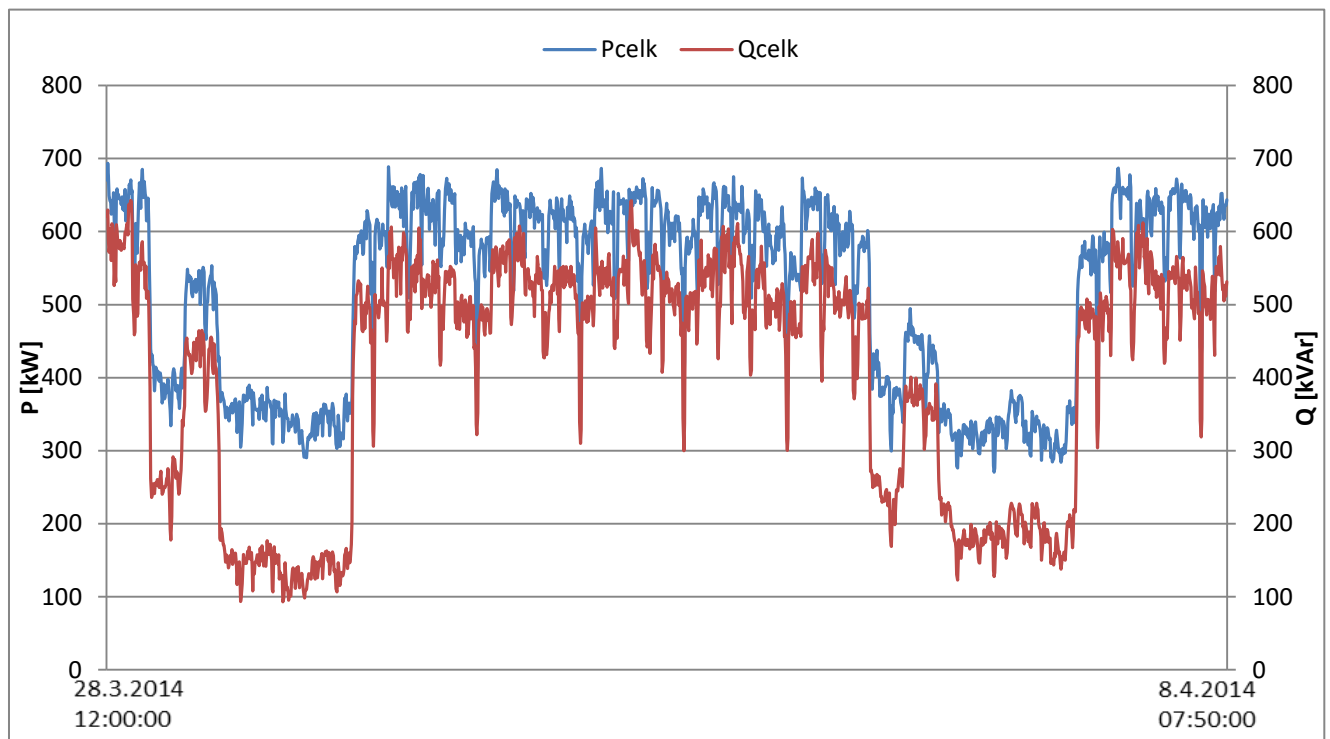
## Přílohy

### Příloha A – Průběh dlouhodobé míry flikru $P_{lt}$ na VN



Obrázek 1: Průběh dlouhodobé míry flikru  $P_{lt}$  (RMS) na VN

### Příloha B – Odběr celkového činného a jalového výkonu (RMS) na VN



Obrázek 2: Odběr celkového činného a jalového výkonu (RMS) na VN

### Příloha C – Transformátor VN/NN a rozvaděč NN napájecí oba lisy



Obrázek 3: Transformátor VN/NN a rozvaděč NN napájecí oba lisy [10]

### Příloha D – Lis P-AIDA



Obrázek 4: Lis P-AIDA [10]