

VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V BRNĚ

BRNO UNIVERSITY OF TECHNOLOGY

**FAKULTA ELEKTROTECHNIKY A KOMUNIKAČNÍCH TECHNOLOGIÍ
ÚSTAV ELEKTROENERGETIKY**

**FACULTY OF ELECTRICAL ENGINEERING AND COMMUNICATION
DEPARTMENT OF ELECTRICAL POWER ENGINEERING**

KVALITA ELEKTRICKÉ ENERGIE V DISTRIBUČNÍCH SÍTÍCH NN

**BAKALÁŘSKÁ PRÁCE
BACHELOR'S THESIS**

**AUTOR PRÁCE
AUTHOR**

PAVEL MACOSZEK

BRNO 2011



VYSOKÉ UČENÍ
TECHNICKÉ V BRNĚ

Fakulta elektrotechniky
a komunikačních technologií

Ústav elektroenergetiky

Bakalářská práce

bakalářský studijní obor

Silnoproudá elektrotechnika a elektroenergetika

Student: Pavel Macoszek

ID: 115220

Ročník: 3

Akademický rok: 2010/2011

NÁZEV TÉMATU:

Kvalita elektrické energie v distribučních sítích nn

POKYNY PRO VYPRACOVÁNÍ:

1. Hlavní charakteristiky nízkého napětí.
2. Rušivé jevy ovlivňující kvalitu napájecího napětí - příčiny vzniku, šíření v síti, případně opatření vedoucí k potlačení negativních účinků na ostatní spotřebiče v síti.
3. Přístroje pro měření kvality napájecího napětí.
4. Měření a vyhodnocení parametrů kvality napětí v souladu s normou ČSN EN 50160.

DOPORUČENÁ LITERATURA:

podle pokynů vedoucího práce

Termín zadání: 7.2.2011

Termín odevzdání: 26.5.2011

Vedoucí práce: Ing. Jaromír Bok

doc. Ing. Petr Toman, Ph.D.

Předseda oborové rady

UPOZORNĚNÍ:

Autor bakalářské práce nesmí při vytváření bakalářské práce porušit autorská práva třetích osob, zejména nesmí zasahovat nedovoleným způsobem do cizích autorských práv osobnostních a musí si být plně vědom následků porušení ustanovení § 11 a následujících autorského zákona č. 121/2000 Sb., včetně možných trestněprávních důsledků vyplývajících z ustanovení části druhé, hlavy VI. díl 4 Trestního zákoníku č.40/2009 Sb.

Bibliografická citace práce:

MACOSZEK, P. *Kvalita elektrické energie v distribučních sítích nn*. Brno: Vysoké učení technické v Brně, Fakulta elektrotechniky a komunikačních technologií, 2011. 66 s. Vedoucí bakalářské práce Ing. Jaromír Bok.

Prohlašuji, že jsem svou bakalářskou práci vypracoval samostatně a použil jsem pouze podklady (literaturu, projekty, SW atd.) uvedené v přiloženém seznamu.

Na tomto místě bych chtěl poděkovat Ing. Jaromírovi Bokovi za velmi účinnou, pedagogickou a odbornou pomoc a za cenné rady při zpracování mé bakalářské práce.

.....



VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V BRNĚ

**Fakulta elektrotechniky a komunikačních technologií
Ústav elektroenergetiky**

Bakalářská práce

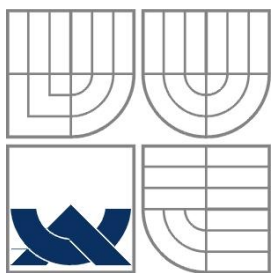
Kvalita elektrické energie v distribučních sítích nn

Pavel Macoszek

vedoucí: Ing. Jaromír Bok

Ústav elektroenergetiky, FEKT VUT v Brně, 2011

Brno



BRNO UNIVERSITY OF TECHNOLOGY



**Faculty of Electrical Engineering and Communication
Department of Electrical Power Engineering**

Bachelor's Thesis

The quality of electric energy in a low voltage public supply networks

by

Pavel Macoszek

Supervisor: Ing. Jaromír Bok

Brno University of Technology, 2011

Brno

ABSTRAKT

Tato práce obsahuje čtyři základní kapitoly, které popisují kvalitativní parametry napájecího napětí a měření a vyhodnocení získaných dat. Teoretickou část tvoří tři kapitoly. V úvodní kapitole jsou popsány hlavní charakteristiky nízkého napětí. Následuje kapitola zaměřená na popis rušivých jevů ovlivňující kvalitu napájecího napětí, příčiny jejich vzniku, šíření v síti, případně opatření vedoucí k potlačení negativních účinků na ostatní spotřebiče v síti. Poslední teoretická kapitola se zabývá přístroji pro měření kvality napájecího napětí. Důvod těchto kapitol je uvedení čtenáře do problematiky kvality elektrické energie. Teoretické kapitoly slouží také jako příprava pro měření a vyhodnocení kvality elektrické energie v distribučních sítích nízkého napětí v souladu s normou ČSN EN 50160 (*Charakteristiky napětí elektrické energie dodávané z veřejné distribuční sítě*). Měření a vyhodnocení sítě je závěrečná část této práce. Jsou v ní aplikovány dosažené teoretické znalosti pro analýzu skutečných stavů kvality elektrické energie v síti.

KLÍČOVÁ SLOVA: analýza; distribuční síť; flikr; frekvence; napájecí napětí; harmonická napětí; mezipharmonická napětí; měření; nesymetrie napětí; nízké napětí; pokles napětí; přepětí; přerušení napětí; rušivé jevy;

ABSTRACT

This thesis contains four main chapters, which describe qualitative parameters of supply voltage and measurement and analysis received information. The theoretical part consists of three chapters. Characteristics of low voltage are described in the first chapter. Next chapter describes disturbing events, which have influence on quality supply voltage, reasons for their occurrence spreading in network, eventually arrangement leading to the disappearance of disturbing events on other electric appliances in network. Last theoretical chapter describes measuring instruments of supply voltage. The purpose of these theoretical parts is to introduce the reader into supply voltage quality issues and can be used for preparation of measurement and evaluation of acquired data under norm ČSN EN 50160 (*Voltage characteristic of electricity supplied by public distribution systems*). An analysis of real network is the last part of this thesis. There is applied acquired knowledge with the aim of analysis of real states of qualitative parameters of supply voltage in network.

KEY WORDS:

analysis; distribution network; flicker; frequency; supply voltage; harmonic voltage; interharmonic voltage; measurement; unbalance voltage; low voltage; voltage drop; overvoltage; voltage interruption; disturbing events;

OBSAH

SEZNAM OBRÁZKŮ.....	10
SEZNAM TABULEK	12
SEZNAM SYMBOLŮ A ZKRATEK.....	13
1 ÚVOD	15
1.1 ELEKTRICKÁ ENERGIE, JEJÍ VÝROBA, DODÁVKA A SPOTŘEBA.....	15
1.2 ELEKTRIZAČNÍ SOUSTAVA	15
1.3 DISTRIBUČNÍ SÍTĚ NÍZKÉHO NAPĚTÍ.....	16
1.4 KVALITA ELEKTRICKÉ ENERGIE	17
2 HLAVNÍ CHARAKTERISTIKY NAPÁJECÍHO NAPĚTÍ V DISTRIBUČNÍCH SÍTÍCH NÍZKÉHO NAPĚTÍ.....	18
2.1 VELIKOST NAPÁJECÍHO NAPĚTÍ.....	18
2.2 ODCHYLKY NAPÁJECÍHO NAPĚTÍ.....	19
2.3 KMITOČET SÍTĚ.....	20
2.4 RYCHLÉ ZMĚNY NAPĚTÍ	22
2.4.1 VELIKOST RYCHLÝCH ZMĚN NAPĚTÍ	23
2.4.2 MÍRA VJEMU FLIKRU	23
2.5 POKLESY NAPÁJECÍHO NAPĚTÍ	25
2.5.1 HLOUBKA POKLESU ΔU	26
2.5.2 TRVÁNÍ POKLESU NAPĚTÍ ΔT	26
2.5.3 VYHODNOCENÍ KRÁTKODOBÝCH POKLESŮ A PŘERUŠENÍ NAPĚTÍ.....	26
2.6 PŘERUŠENÍ NAPÁJECÍHO NAPĚTÍ	28
2.6.1 KRÁTKODOBÉ PŘERUŠENÍ.....	28
2.6.2 DLOUHODOBÉ PŘERUŠENÍ	28
2.7 PŘEPĚTÍ	29
2.7.1 DOČASNÁ PŘEPĚTÍ O SÍŤOVÉM KMITOČTU MEZI ŽIVÝMI VODIČI A ZEMÍ	29
2.7.2 PŘECHODNÁ PŘEPĚTÍ MEZI ŽIVÝMI VODIČI A ZEMÍ.....	30
2.8 NESYMETRIE NAPÁJECÍHO NAPĚTÍ.....	32
2.9 HARMONICKÁ NAPĚTÍ	33
2.10 MEZIHARMONICKÁ NAPĚTÍ.....	35
2.11 ÚROVNĚ NAPĚTÍ SIGNÁLŮ V NAPÁJECÍM NAPĚTÍ.....	35
3 RUŠIVÉ JEVY OVLIVŇUJÍCÍ KVALITU NAPÁJECÍHO NAPĚTÍ.....	37
3.1 HARMONICKÉ ZKRESLENÍ.....	37
3.2 PŘERUŠENÍ DODÁVKY	39
3.3 PODPĚTÍ NEBO PŘEPĚTÍ.....	40
3.4 POKLESY NAPĚTÍ NEBO RÁZOVÉ NAPĚTÍ.....	41
3.5 PŘECHODNÉ DĚJE	42
4 PŘÍSTROJE PRO MĚŘENÍ KVALITY NAPÁJECÍHO NAPĚTÍ.....	43

4.1 BK-ELCOM ENA 500.22	43
4.1.1 TECHNICKÁ SPECIFIKACE	43
4.1.2 POPIS FUNKCÍ	44
4.2 OSTATNÍ ANALYZÁTORY	48
4.2.1 UNIVERZÁLNÍ MONITOR MEG40	48
4.2.2 PQ MONITOR MEG35	48
4.2.3 PQ MONITOR MEG30	49
4.2.4 MONITOR EGÚ MDT 9I	50
5 MĚŘENÍ A VYHODNOCENÍ PARAMETRŮ KVALITY NAPĚTÍ	51
5.1 NASTAVENÍ PŘÍSTROJE	51
5.2 ANALÝZA NAMĚŘENÝCH DAT	54
6 CÍLE	63
7 ZÁVĚR	64
POUŽITÁ LITERATURA	65

SEZNAM OBRÁZKŮ

<i>Obrázek 1 Struktura elektrizační soustavy [2]</i>	<i>16</i>
<i>Obrázek 2 Dovolené odchylky napájecího napětí dle [10]</i>	<i>19</i>
<i>Obrázek 3 Perioda sinusového průběhu napětí</i>	<i>20</i>
<i>Obrázek 4 Změna frekvence při zvětšení zátěže</i>	<i>21</i>
<i>Obrázek 5 Rychlá změna napětí způsobená spuštěním motoru dle [7]</i>	<i>23</i>
<i>Obrázek 6 Změna světelného toku způsobená dočasnou změnou napětí dle [14]</i>	<i>24</i>
<i>Obrázek 7 Charakteristika vnímání flikru pro napěťové změny (60 W žárovka) dle [14]</i>	<i>24</i>
<i>Obrázek 8 Zjednodušený tvar poklesu napětí dle [7]</i>	<i>25</i>
<i>Obrázek 9 Četnost poklesů napětí ve veřejné distribuční síti nn během roku dle [16]</i>	<i>27</i>
<i>Obrázek 10 Pokles napětí v síti nn po dobu dvou period a krátkodobé přerušení napětí po dobu tří period podle [16]</i>	<i>28</i>
<i>Obrázek 11 Průběh dočasného přepětí s dobou trvání t_1</i>	<i>29</i>
<i>Obrázek 12 Zobrazení symetrických složek dle [18]</i>	<i>32</i>
<i>Obrázek 13 Základní harmonická s třetí a pátou harmonickou dle [19]</i>	<i>33</i>
<i>Obrázek 14 Deformovaný časový průběh proudu dle [19]</i>	<i>34</i>
<i>Obrázek 15 Úrovně napětí na kmítočtech signálů v procentech U_c ve veřejných distribučních sítích dle [6]</i>	<i>36</i>
<i>Obrázek 16 Průběh odebíraného proudu spínaným zdrojem</i>	<i>38</i>
<i>Obrázek 17 Základní obvod ferorezonačního stabilizátoru napětí CVT dle [23]</i>	<i>40</i>
<i>Obrázek 18 ITIC křivka tolerance zařízení na napěťové poruchy všech možných druhů dle [20]</i>	<i>41</i>
<i>Obrázek 19 Analyzátor BK-ELCOM ENA 500.22 dle [24]</i>	<i>43</i>
<i>Obrázek 20 Panel funkcí analyzátoru dle [26]</i>	<i>44</i>
<i>Obrázek 21 Princip Rogowského cívky dle [25]</i>	<i>44</i>
<i>Obrázek 22 Volba způsobu připojení analyzátoru k měřené síti dle [26]</i>	<i>46</i>
<i>Obrázek 23 Hlavní panel pro volbu uživatele, projektu a měření</i>	<i>47</i>
<i>Obrázek 24 Univerzální monitor MEg40 dle [28]</i>	<i>48</i>
<i>Obrázek 25 PQ monitor MEg35 dle [29]</i>	<i>49</i>
<i>Obrázek 26 Přenosný PQ monitor MEg30 dle [30]</i>	<i>49</i>
<i>Obrázek 27 Monitor EGÚ MDT 9i dle [31]</i>	<i>50</i>
<i>Obrázek 28 Lokalizace měřícího pracoviště</i>	<i>51</i>
<i>Obrázek 29 Schéma nastavení připojení k síti</i>	<i>52</i>
<i>Obrázek 30 Nastavení rozsahů</i>	<i>52</i>

<i>Obrázek 31 Nastavení limitů dle normy ČSN EN 50160.....</i>	<i>53</i>
<i>Obrázek 32 Průběh kmitočtu první fáze</i>	<i>54</i>
<i>Obrázek 33 Histogram kmitočtu první fáze.....</i>	<i>54</i>
<i>Obrázek 34 Průběh napětí tří fází</i>	<i>55</i>
<i>Obrázek 35 Histogram velikosti napětí tří fází</i>	<i>55</i>
<i>Obrázek 36 Průběh krátkodobé míry vjemu flikru</i>	<i>56</i>
<i>Obrázek 37 Histogram krátkodobé míry vjemu flikru.....</i>	<i>56</i>
<i>Obrázek 38 Průběh dlouhodobé míry vjemu flikru</i>	<i>57</i>
<i>Obrázek 39 Histogram dlouhodobé míry vjemu flikru</i>	<i>57</i>
<i>Obrázek 40 Průběh činitele zkreslení THD_U.....</i>	<i>58</i>
<i>Obrázek 41 Histogram činitele zkreslení THD_U</i>	<i>58</i>
<i>Obrázek 42 Spektrum harmonických složek napětí.....</i>	<i>59</i>
<i>Obrázek 43 Hodnoty 2,5té mezipharmonické během analyzovaného týdne</i>	<i>60</i>
<i>Obrázek 44 Hodnoty 4,5té mezipharmonické během analyzovaného týdne</i>	<i>60</i>

SEZNAM TABULEK

<i>Tabulka 1 Dovolené odchylky systémů se synchronním připojením a bez synchronního připojení dle [7]</i>	<i>22</i>
<i>Tabulka 2 Zaznamenaná maxima a minima kmitočtu PS za rok 2010 [12].....</i>	<i>22</i>
<i>Tabulka 3 Třídění krátkodobých poklesů a přerušení napětí dle [15]</i>	<i>27</i>
<i>Tabulka 4 Úrovně jednotlivých harmonických napětí v předávacím místě v procentech U_n pro řady harmonických až do 25tého řádu dle [6]</i>	<i>35</i>
<i>Tabulka 5 Finanční ztráty vzniklé poruchami v jednotlivých odvětvích dle [20]</i>	<i>42</i>
<i>Tabulka 6 Základní časové intervaly pro měření s přístrojem BK-ELCOM ENA 500.22 dle [24]</i>	<i>45</i>
<i>Tabulka 7 Nastavení harmonických limitů do 25tého řádu</i>	<i>53</i>
<i>Tabulka 8 Hodnoty mezipharmonických 2,5tého a 4,5tého řádu.....</i>	<i>59</i>
<i>Tabulka 9 Tabulka naměřených harmonických složek.....</i>	<i>61</i>
<i>Tabulka 10 Tabulka naměřených mezipharmonických složek</i>	<i>61</i>
<i>Tabulka 11 Naměřená data za období jednoho týdne (31. března 2011 až 7. dubna 2011).....</i>	<i>62</i>

SEZNAM SYMBOLŮ A ZKRATEK

B	magnetická indukce	T
CFL	elektronické předřadníky kompaktních svítidel	-
COM	hardwarové rozhraní	-
CVT	ferorezonanční nebo konstantní transformátor napětí	-
ČEPS	česká energetická přenosová soustava	-
ČR	Česká republika	-
DS	distribuční soustava	-
ES	elektrizační soustava	-
EVS	elektronický stabilizátor napětí	-
FEKT	Fakulta elektrotechniky a komunikačních technologií	-
FSI	Fakulta strojního inženýrství	-
HDO	hromadné dálkové ovládání	-
$\bar{I}$	proud (odběrový)	A
I_{ζ}	činná složka (odebíraného) proudu	A
I_j	jalová složka (odebíraného) proudu	A
I_k	proud k-té harmonické	A
LCD	displej z tekutých krystalů	-
OZ	opětné zapnutí	-
P_{lt}	dlouhodobá míra vjemu	-
P_{st}	krátkodobá míra vjemu	-
P_v	ztráty způsobené vířivými proudy	J
PC	osobní počítač	-
PS	přenosová soustava	-
R	činná složka impedance sítě	Ω
SD	paměťová karta	-
SI	mezinárodní soustava jednotek fyzikálních veličin	-
SMPS	spínané napájecí zdroje	-
T	perioda	s
THD	činitel celkového harmonického zkreslení	-
THD_I	činitel celkového harmonického zkreslení proudu	-
THD_U	činitel celkového harmonického zkreslení napětí	-

U_1	napětí v místě odběru	V
$\bar{U}_{12}$	sdužené napětí mezi první a druhou fází	V
$\bar{U}_{23}$	sdužené napětí mezi druhou a třetí fází	V
$\bar{U}_{31}$	sdužené napětí mezi třetí a první fází	V
U_c	dohodnuté napájecí napětí	V
U_h	harmornické napětí	V
U_i	indukované napětí	V
U_k	napětí k-té harmonické	V
U_n	jmenovité napětí	V
U_{ret}	zbytkové napětí	V
UPS	malé zdroje nepřerušitelného napájení	-
USB	univerzální sériová sběrnice	-
VUT	Vysoké učení technické v Brně	-
X	jalová složka impedance sítě	Ω
$\bar{Z}$	impedance sítě	Ω
f	kmitočet	Hz
j	imaginární jednotka	-
nn	nízké napětí	-
rms	efektivní hodnota	-
t	čas	s
vn	vysoké napětí	-
vvn	velmi vysoké napětí	-
Δt	časová změna	s
ΔU	úbytek napětí	V
Φ	magnetický indukční tok	Wb

1 ÚVOD

1.1 Elektrická energie, její výroba, dodávka a spotřeba

Život a existence člověka na Zemi jsou závislé na energii. V přírodě vzniklo několik zdrojů energie, z nichž lze získat pro člověka nejvhodnější druh energie, a to elektrickou. Elektrická energie se hlavně díky svému snadnému přenosu a možnosti přeměny na jiné formy energie stala nejdůležitější formou energie.

Elektrickou energii na Zemi vyrábíme v různých typech elektráren (uhelné, jaderné, vodní, větrné, geotermální, sluneční, atd.). Základní specifické vlastnosti charakterizující elektrickou energii jsou jednoduchost, neskladnost a stejnorodost.

Na území České republiky působí několik samostatných subjektů, které zajišťují dodávku elektrické energie koncovým spotřebitelům. Každý subjekt působí ve své vyhrazené oblasti, kde má na starost veškeré činnosti přímo související s dodávkou elektrické energie, blíže specifikováno v následujících kapitolách.

1.2 Elektrizací soustava

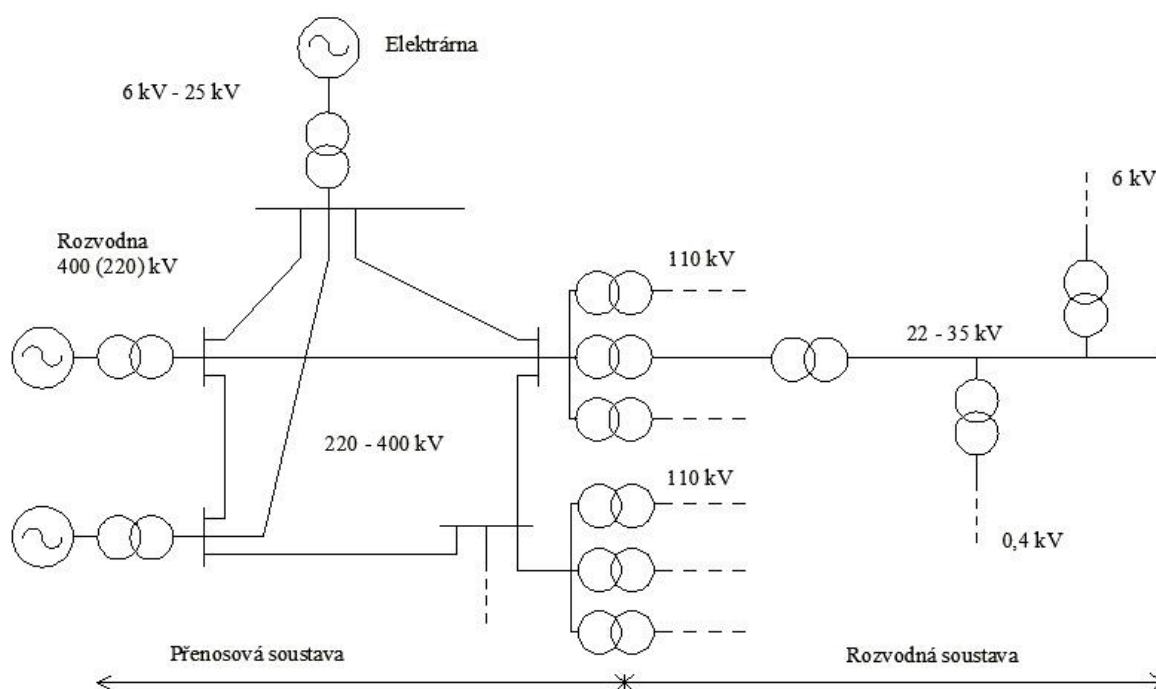
Elektrizací soustava (ES) je systém, který zajišťuje výrobu, přenos, rozvod (distribuci) a užití (spotřebu) elektrické energie. Hlavní prvky tohoto systému jsou výrobní, přenosové a distribuční zařízení, dále to mohou být prvky zajišťující měření, kontrolu, ochranu, regulaci a řízení. Elektrické sítě zajišťují v ES plynulé předávání elektrické energie. Elektrickou síť tvoří jednotlivé a vzájemně propojené elektrické stanice a elektrické vedení, je to tzv. spojovací článek mezi výrobou a spotřebou elektrické energie.

Elektroenergetiku ČR tvoří 2 hlavní subjekty. Správce přenosové soustavy (PS) a držitel licence na přenos elektrické energie v jednom, což je firma ČEPS, a.s. a jednotliví provozovatelé distribučních soustav (DS). V České republice působí několik provozovatelů distribučních soustav [3]:

- PREdistribuce, a.s. - působnost hlavně na území hlavního města Prahy a města Roztoky;
- E.ON Distribuce, a.s. - spravuje hlavně územní oblasti jižních Čech a jižní Moravy;
- ČEZ Distribuce, a.s. - spravuje především územní oblasti krajů: Plzeňského, Karlovarského, Ústeckého, Středočeského, Libereckého, Královéhradeckého, Pardubického, Olomouckého, Moravskoslezského a částečně v kraji Zlínském a Vysočina;
- SV Servisní, s. r. o.;
- CCH Centrum Praha Jih - Chodov s. r. o.;
- EPM European Property Management, s. r. o.

Provozovatelé DS mají povinnost zajistit nediskriminační přístup k DS všem oprávněným uživatelům. Užívání DS může mít různý charakter [10]:

- dodávku elektrické energie do DS (z PS, z výroby připojené k DS, z jiné DS, mezistátní);
- dodávku elektrické energie z DS do PS;
- odběr elektrické energie z DS (přes vstupní místa, k odběrateli, do jiné DS, mezistátní);
- distribuci elektrické energie po DS mezi vstupními a výstupními místy připojení;
- zajištění systémových a podpůrných služeb (např. regulace výkonu a napětí), pohotovostních dodávek a krytí spotřeby odběratele ze strany provozovatele DS (kvůli výpadku vlastního zdroje odběratele, výpadku dodávky od smluvního dodavatele nebo tento zdroj odběrateli nepostačuje).



Obrázek 1 Struktura elektrizační soustavy [2]

1.3 Distribuční síť nízkého napětí

Distribuční soustava je definována jako systém zařízení pro rozvod elektrické energie z přenosové soustavy (nebo ze zdrojů zapojených do ní) ke koncovým uživatelům.

V transformačních stanicích se napětí 400 (220) kV transformuje na napětí 110 kV, část elektrické energie se přitom odvádí do velkých průmyslových podniků a část do měniren, které zajišťují napájení elektrifikovaných železničních tratí. Zbývající část elektrické energie z transformačních stanic se distribuuje k dalším spotřebitelům (menší průmyslové podniky, města nebo obce), kde se transformuje na napětí o velikosti 22 kV. V posledním kroku, transformaci na nízké napětí 230 V a 400 V dochází v samotných podnicích, obcích a městských čtvrtí. Distribuční síť nízkého napětí v ČR pracují na napětí 230/400 V a slouží pro rozvod elektrické energie zpravidla hlavně maloodběratelům.

1.4 Kvalita elektrické energie

Elektrická energie přichází k uživateli přes soustavu zařízení výroby, přenosu a distribuce. Každá část této soustavy podléhá poškození a poruchám způsobeným elektrickým, mechanickým a chemickým namáháním, jejichž původ je v různých příčinách zahrnujících extrémní počasí, obvyčejné opotřebení, stárnutí a působení lidských činností, zvířat, atd. Takové poškození může znehodnotit nebo i přerušit dodávku jednomu nebo mnoha uživatelům. [6]

Ve stěžejní části práce je uveden přehled o kvalitativních požadavcích na napájecí napětí a povolených tolerancích jednotlivých parametrů a to především podle normy ČSN EN 50160. Mezi hlavní charakteristiky napájecího napětí patří jeho velikost a odchylky, kmitočet sítě, rychlé změny napětí (tzv. flickr), krátkodobá a dlouhodobá přerušení napájecího napětí, přepětí, nesymetrie, harmonická a meziharmonická napětí a úroveň napětí signálů v napájecím napětí.

V další části práce jsou pak uvedeny rušivé jevy ovlivňující kvalitu napájecího napětí, příčiny jejich vzniku, šíření v síti a případné opatření vedoucí k potlačení negativních účinků na ostatní spotřebiče v síti.

Nakonec bude provedeno praktické změření kvality napětí v distribuční síti nízkého napětí a její následné vyhodnocení.

2 HLAVNÍ CHARAKTERISTIKY NAPÁJECÍHO NAPĚTÍ V DISTRIBUČNÍCH SÍTÍCH NÍZKÉHO NAPĚTÍ

Tato kapitola se zaměřuje na veličiny a charakteristiky ovlivňující kvalitu dodávky elektrické energie. V bodech jsou nyní seřazeny kvalitativní požadavky na napájecí napětí a povolené tolerance jednotlivých parametrů.

2.1 Velikost napájecího napětí

Norma ČSN EN 50160 definuje dohodnuté napájecí napětí U_c jako normální jmenovité napětí sítě U_n . Existuje-li ovšem dohoda mezi dodavatelem a uživatelem, může být do předávacího místa přivedeno napětí odlišné od jmenovitého napětí, tím pádem pak lze i takové napětí odlišné od jmenovitého pokládat za dohodnuté napájecí napětí U_c . Předávací místo se dle normy [6] definuje jako bod připojení zařízení uživatele k veřejné distribuční síti.

Proud tekoucí přírodním vedením ke spotřebiteli vyvolává úbytky napětí závisící na vzdálenosti spotřebitele. Úbytek napětí ΔU je rozdíl mezi jmenovitým napětím U_n a napětím v místě odběru U_1 . Vypočte se ze vztahu:

$$\Delta U = U_n - U_1 \quad (\text{V}; \text{V}, \text{V}) \quad (1)$$

Jestliže $\bar{Z}$ značí impedanci sítě a jestliže $\bar{I}$ značí odběrový proud induktivního charakteru, může se úbytek napětí $\Delta \bar{U}$ vypočítat pomocí rovnice (2):

$$\Delta \bar{U} = \bar{Z} \cdot \bar{I} \quad (\text{V}; \Omega, \text{A}) \quad (2)$$

Jestliže R a X je činná, respektive jalová složka impedance sítě a jestliže I_c a I_j je činná, respektive jalová složka odběrového proudu (induktivního charakteru), může se rovnice (2) pro výpočet úbytku napětí $\Delta \bar{U}$ psát ve tvaru:

$$\Delta \bar{U} = (R + j \cdot X) \cdot (I_c - j \cdot I_j) \quad (\text{V}; \Omega, \Omega, \text{A}, \text{A}) \quad (3)$$

Pro výpočet úbytku napětí lze pro zjednodušení použít rovnici (4), v níž se zanedbává imaginární složka úbytku napětí:

$$\Delta U = R \cdot I_c + X \cdot I_j \quad (\text{V}; \Omega, \text{A}, \Omega, \text{A}) \quad (4)$$

Pro veřejnou síť nízkého napětí je normalizované napájecí napětí U_n definováno rozdílně pro čtyřvodičové a třívodičové trojfázové soustavy [6]:

- pro čtyřvodičové trojfázové soustavy
 $U_n = 230 \text{ V}$, mezi fází a uzlem;
- pro třívodičové trojfázové soustavy
 $U_n = 230 \text{ V}$ mezi fázovými vodiči.

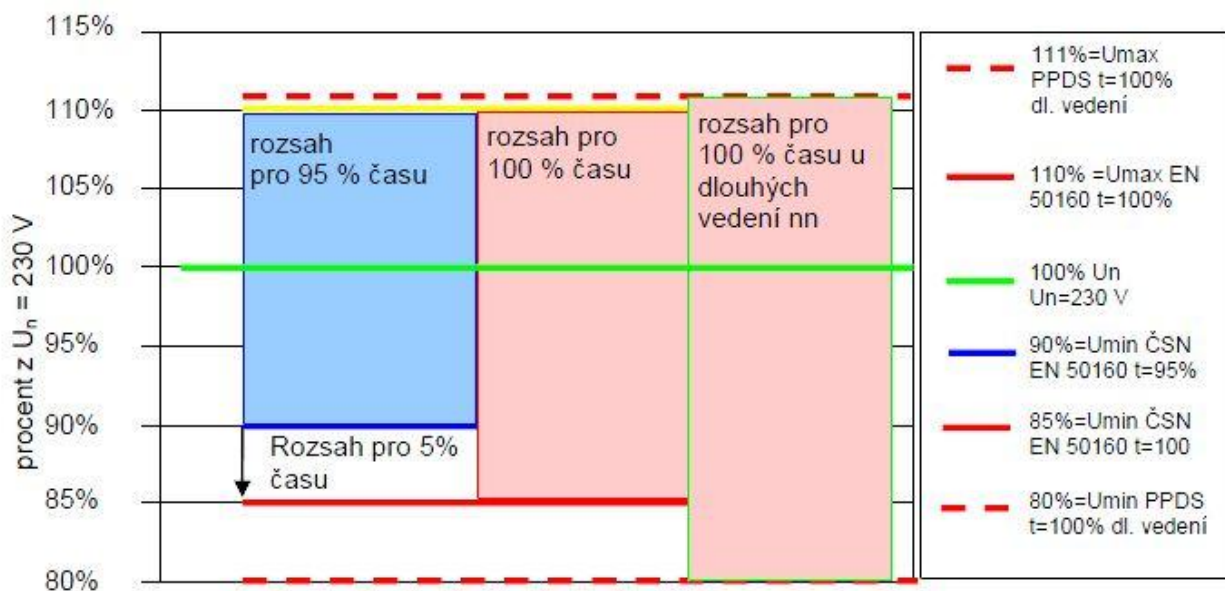
2.2 Odchyłky napájecího napětí

V distribučních sítích nízkého napětí není prováděno žádné řízení napětí. Sítě jsou navrženy s ohledem na to, že provozovatel distribuční sítě má omezené možnosti ovlivňovat zvyšování zatížení odběratelů.

Odchyłky napájecího napětí v distribučních sítích by ovšem neměly přesáhnout $\pm 10 \%$ (výjimkou jsou situace způsobené poruchami nebo přerušením napětí).

Dle pravidel provozu distribučních soustav, přílohy 3., jsou dovolené odchyłky napájecího napětí pro síť nn [10]:

- $+10 / -10 \%$ od jmenovité hodnoty ($\geq 207 \text{ V}$; $\leq 253 \text{ V}$) u 95% měřicích intervalů;
- $+10 / -15 \%$ od jmenovité hodnoty ($\geq 195,5 \text{ V}$; $\leq 253 \text{ V}$) pro 100% měřicích intervalů;
- u dlouhých vedení $+11 / -20 \%$ od jmenovité hodnoty ($\geq 184 \text{ V}$; $\leq 255,3 \text{ V}$) pro 100% měřicích intervalů;
- v sítích vn a 110 kV $\pm 10 \%$ od jmenovité (dohodnuté) hodnoty u 95% měřicích intervalů.



Obrázek 2 Dovolené odchyłky napájecího napětí dle [10]

2.3 Kmitočet sítě

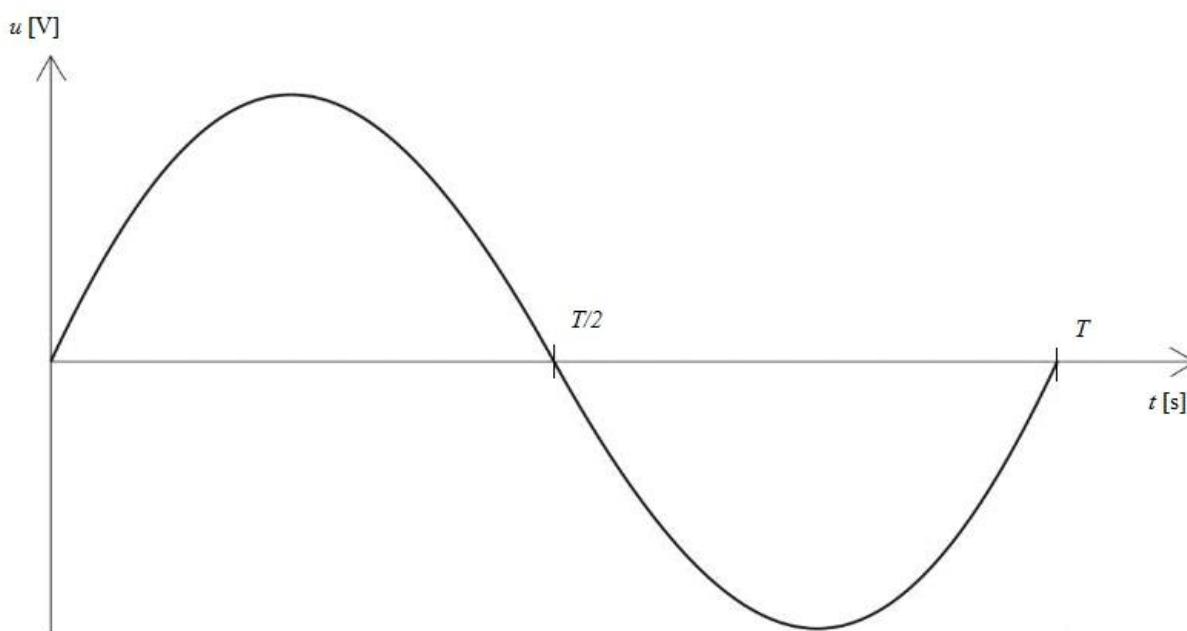
V této kapitole je důležité nejprve definovat pojem frekvence neboli kmitočet. Kmitočet udává počet kmitů, které jsou dokončeny v průběhu každé sekundy, označujeme jej písmenem f a jeho jednotkou dle SI soustavy je Hertz (zkratka Hz, což je vlastně 1 kmit za sekundu).

S frekvencí dále úzce souvisí perioda, která je označována písmenem T a její jednotka je sekunda (zkratka s). Perioda nám udává dobu, za kterou se uskuteční jeden úplný cyklus.

Perioda T se počítá z jednoduchého vztahu, kdy je nepřímo úměrná frekvenci f :

$$T = \frac{1}{f} \quad (\text{s}; \text{Hz}) \quad (5)$$

Na obrázku 3 je znázorněna perioda T (i její půlperioda $T/2$) sinusového průběhu napětí.

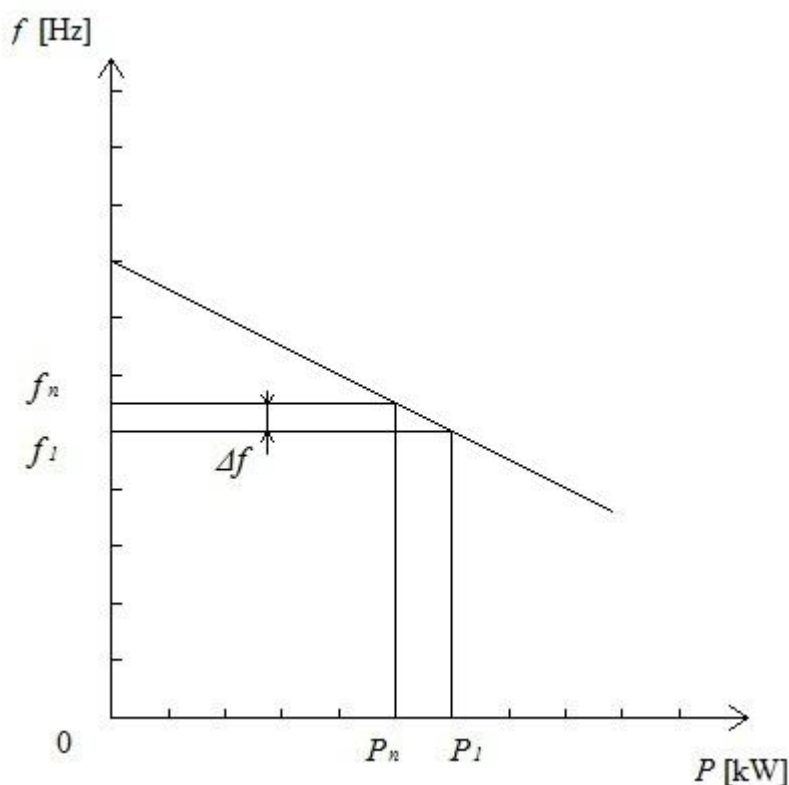


Obrázek 3 Perioda sinusového průběhu napětí

V normě [6] je uvedeno, že jmenovitá hodnota kmitočtu distribučních sítí je 50 Hz. Kmitočet napájecí sítě závisí na vzájemném působení mezi generátory a zatížením a rozsah odchylek klesá s rostoucím poměrem mezi výkonem generátorů a kolísáním zatížení. Dle normy [6] se tedy systémy dělí do dvou skupin:

- systémy synchronně propojené s okolními systémy;
- slabě izolované systémy, které se například typicky vyskytují v některých ostrovních provozech.

Udržení konstantní frekvence soustavy tedy vyžaduje vysoký výkon výroby (možnost velké dodávky elektrické energie), který se přizpůsobuje v reálném čase jednotlivým odběrům. Budicí soustava s regulací turbíny společně řídí energetický blok výroby. Budicí soustavu tvoří zdroj regulovaného stejnosměrného proudu, který je dodáván do budicího vinutí synchronního generátoru a ovlivňuje velikost napětí a jalový výkon stroje. Regulace turbíny pak řídí velikost činného výkonu a kmitočet.



Obrázek 4 Změna frekvence při zvětšení zátěže

Během normálních provozních podmínek v systémech propojených sítí se má udržovat kmitočet ve velmi úzkém pásmu. Z tohoto důvodu se podle [6] definuje rozsah $50 \text{ Hz} \pm 1 \%$ pro 99,5 % roku a pro zbývajících 0,5 % roku stanovuje rozsah $50 \text{ Hz} - 6 \%$ až $+ 4 \%$, jenž je nezbytný pro občasné případy (náhlé výpadky velké části výroby).

V sítích ostrovních provozů je nutný vzhledem k nižšímu poměru mezi výrobou a spotřebou širší provozní rozsah. Dle [6] se tedy definuje rozsah $50 \text{ Hz} \pm 2 \%$ pro 95 % týdne a pro zbývajících 5 % týdne je stanoven rozšířený rozsah $50 \text{ Hz} \pm 15 \%$, jenž je nutný pro občasné případy (náhle ztráty velkého objemu výroby nebo spínání velkého objemu zatížení). Určité poruchové stavy dovolují případné odpojení částí propojeného systému a pokračování v provozu jako „ostrovní síť“.

Pro statistickou analýzu je důležité základní měření, v němž se provádí stanovení průměrné hodnoty kmitočtu během po sobě jdoucích 10 sekundových intervalů. Shoda s uvedenými limity se v systémech se synchronním připojením k propojenému systému vyhodnotí za období sledování jednoho roku (v systémech bez synchronního připojení k propojenému systému za týden včetně soboty a neděle) statistickou analýzou za sled 10 sekundových měření.

Tabulka 1 Dovolené odchylky systémů se synchronním připojením a bez synchronního připojení dle [7]

Systémy se synchronním připojením k propojenému systému		
50 Hz $\pm$ 1%	(tj. 49,5 Hz ... 50,5 Hz)	během 99,5 % roku
50 Hz + 4% / - 6%	(tj. 47 Hz ... 52 Hz)	po 100 % času
Systémy bez synchronního připojení k propojenému systému (ostrovní napájecí systémy)		
50 Hz $\pm$ 2%	(tj. 49 Hz ... 51 Hz)	během 95 % týdne
50 Hz $\pm$ 15%	(tj. 42,5 Hz ... 57,5 Hz)	po 100 % času

Společnost ČEPS, a.s. na svých webových stránkách v sekci „Provoz a řízení“ zobrazuje údaje o stavu přenosové soustavy. V tabulce 2 jsou zobrazené průběžné maximální a minimální hodnoty kmitočtu (1 minutové hodnoty) za období měsíců leden až říjen roku 2010.

Tabulka 2 Zaznamenaná maxima a minima kmitočtu PS za rok 2010 [12]

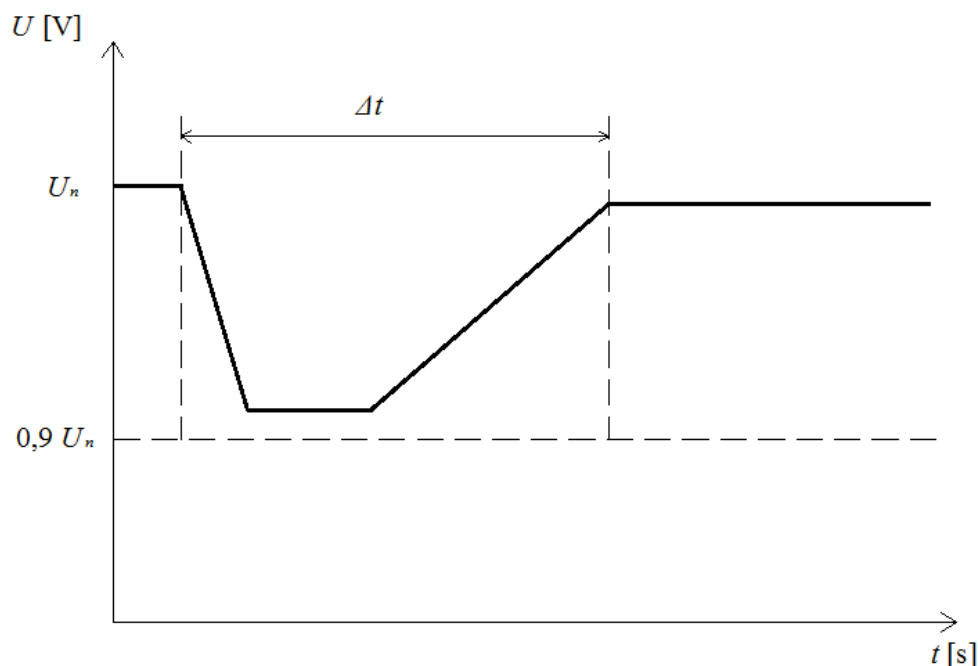
Průběžné maximum	Průběžné minimum
50,145 Hz	49,859 Hz
dne 29. 1. 2010 v 6:01 hod.	dne 19. 1. 2010 v 20:01 hod.

2.4 Rychlé změny napětí

V distribučních sítích nn se mohou objevovat rychlé změny napětí. Rychlou změnu napětí lze chápat jako rychle snížení efektivní hodnoty napětí mezi dvěma po sobě následujícími ustálenými stavy. Charakterizujeme ji parametry rozdílu mezi ustálenou hodnotou po změně a počáteční ustálenou hodnotou a také dobou trvání přechodného jevu mezi dvěma stavy. Rychlé změny napětí mohou být způsobeny několika jevy. Jako příklad lze uvést náhlé zvýšení nebo snížení zatížení, jenž je někdy spojované s vypínáním poruchy.

Jsou-li rychlé změny napětí způsobeny rozběhovým proudem motoru, tak rychlá změna napětí začíná často strmým poklesem (čelo může být krátké jen 10 ms), následuje postupné zotavování napětí (může trvat řadu period napájecího napětí) a vše končí na hodnotě, která je menší než hodnota napětí před spuštěním motoru.

Doba Δt , po níž lze tuto charakteristiku sledovat je závislá na specifických okolnostech (může být ovlivněna například velikostí motoru, impedancí napájecí sítě a metodou spouštění motoru). Jestliže během rychlé změny poklesne napětí pod úroveň 90 % napájecího napětí U_n ($0,9 U_n$), je to nutné považovat za krátkodobý pokles napětí. Na obrázku 5, jenž slouží pro objasnění rychlé změny napětí, je na ose y napětí U a na ose x čas t , který závisí na velikosti proudu motoru a impedance sítě.



Obrázek 5 Rychlá změna napětí způsobená spuštěním motoru dle [7]

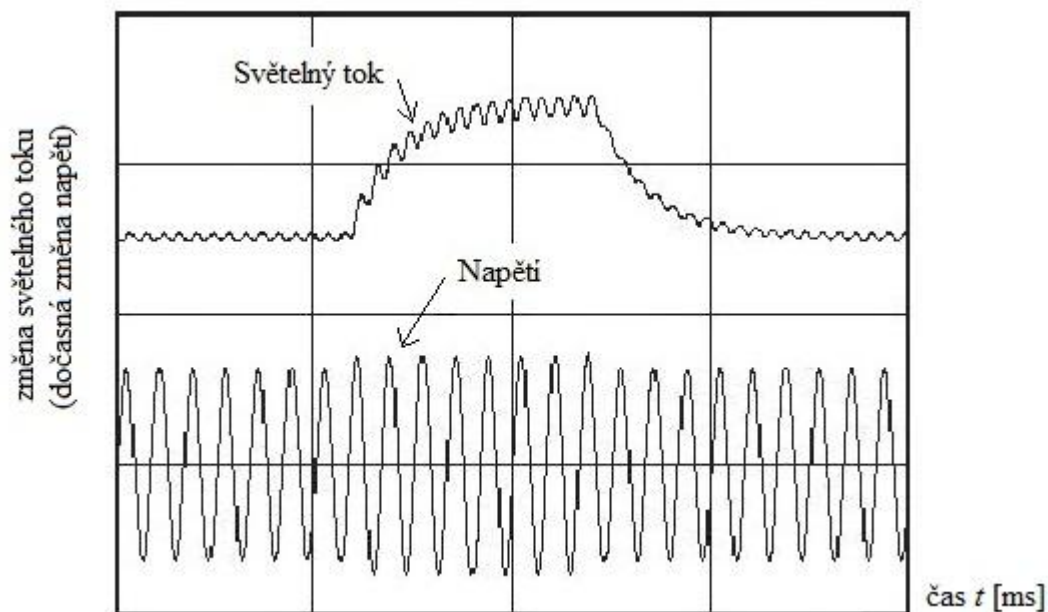
2.4.1 Velikost rychlých změn napětí

Rychlé změny napětí jsou často typické jakožto důsledek spínání zatížení a nepřesahují velikost $\pm 5 \%$ jmenovitého nebo dohodnutého napětí. Omezení je možné z důvodu připojování zatížení, které vyvolávají rychlé změny napětí podléhající směrnicím. Za určitých podmínek ovšem může nastat výskyt vyšších hodnot až do 10% (například v místech na koncích dlouhých vedení, ve venkovských oblastech, napájení zemědělských usedlostí, kde se používají velké motory, ventilátory, čerpadla, kompresory). Dle normy [6] platí, že za normálních podmínek:

- rychlá změna napětí v sítích nn obvykle nepřesáhne 5% U_c , ovšem za určitých problémových okolností mohou několikrát za den nastat krátkodobé změny do 10% U_c ;
- pro srovnání rychlá změna napětí v sítích vn za normálních provozních podmínek nepřesáhne 4% U_c , ovšem za určitých problémových okolností mohou několikrát za den nastat krátkodobé změny až do 6% U_c (užší rozsah u sítí vn je proto, že pro připojení zatížení do sítí vn se uplatňují přísnější omezení než u sítí nn, větší počet odběratelů ovlivněno událostmi v síti vn).

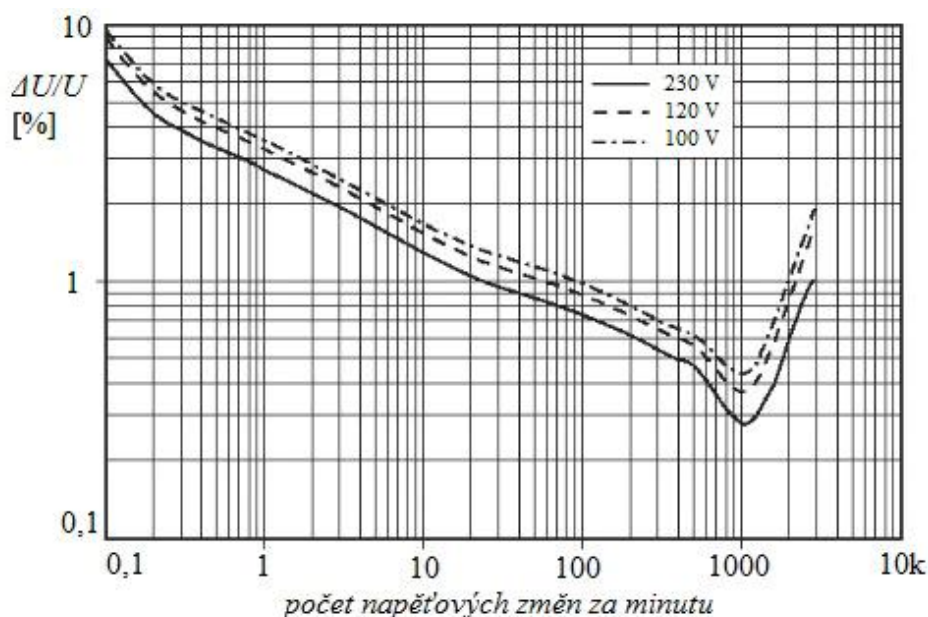
2.4.2 Míra vjemu flikru

Flikr je jev působící na vizuální vnímání člověka změnami světelného toku světelných zdrojů, které jsou způsobeny rychlým kolísáním napájecích napětí. Flikr lze tedy definovat pomocí kolísání napětí spočívajících ze sledu jejich rychlých změn, které následují dostatečně těsně po sobě tak, že stimulují odezvu oka v mozku. Na obrázku 6 je znázorněno, jak malá změna napětí má zřetelný vliv na světelný tok žárovky.



Obrázek 6 Změna světelného toku způsobená dočasnou změnou napětí dle [14]

Flikr je znám v podstatě již od zavedení energetických sítí. Rychle rostl s nárůstem počtu zátěží a spotřeby elektrické energie. Zpočátku byly konstrukce zařízení založeny na jednoduchém sledování světelného toku. Dalším krokem bylo vytvoření modelu lidské reakce (v podobě nepohodlí a nepříjemnosti při kolísání světelného toku). Model byl vytvořen pro wolframovou žárovku 60 W, 230 V (kdysi nejpoužívanější světelný zdroj v Evropě). Obrázek 7 ukazuje práh vnímání flikru vykreslený pro procentuální napěťovou změnu (osa y) a počet změn (osa x). Tam, kde velikost a frekvence změn leží nad křivkou, dochází pravděpodobně k rušení lidského pozorovatele, zatímco pod křivkou je účinek pravděpodobně nevnímání. Čárkovaná a čerchovaná křivka jsou pro wolframové žárovky s jiným jmenovitým napětím (120 V používáno v Severní Americe, respektive 100 V používáno v Japonsku). [14]



Obrázek 7 Charakteristika vnímání flikru pro napěťové změny (60 W žárovka) dle [14]

Obtěžování způsobené flikrem je funkcí intenzity vnímání a trvání jeho působení. Závažnost flikru popisují dva parametry:

- krátkodobá míra vjemu P_{st} , která je měřena po 10 minutách;
- dlouhodobá míra vjemu P_{lt} , která je měřena po 120 minutách.

Dlouhodobá míra vjemu P_{lt} se vypočte z posloupnosti dvanácti hodnot P_{st} po dobu dvouhodinového intervalu dle vztahu [6]:

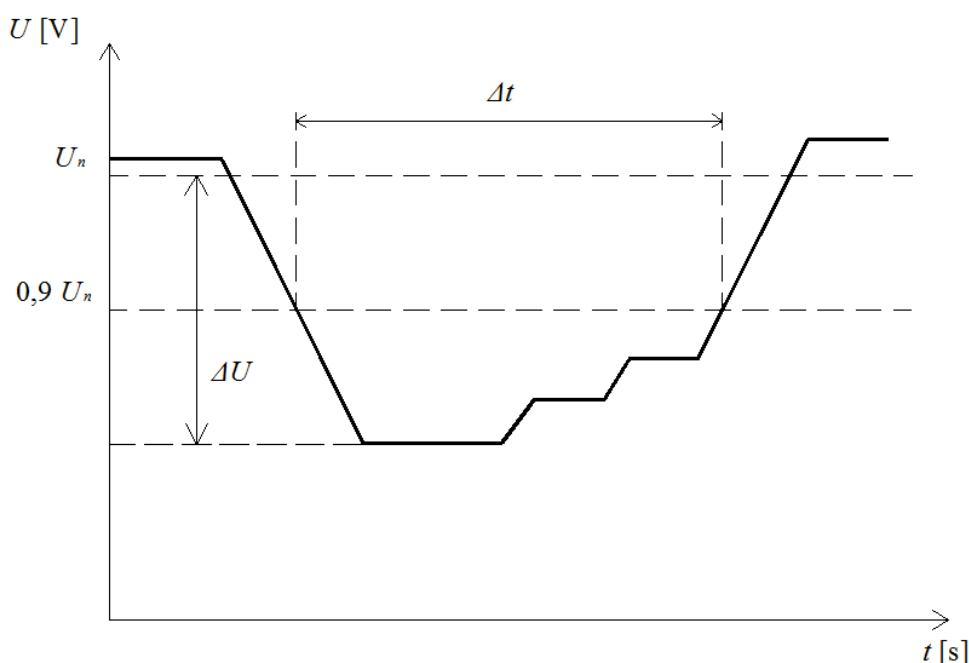
$$P_{lt} = \sqrt[3]{\sum_{i=1}^{12} \frac{P_{sti}^3}{12}} \quad (-; -) \quad (6)$$

Pouze pro parametr dlouhodobá míra vjemu se stanovuje limit činící 95 % procentního rozdílu (důležitější pro popis napětí).

Dle normy [6] flikr způsobuje pro každého subjektivní reakci, která je závislá na příčině flikru a na délce doby jeho výskytu ($P_{lt} = 1$ může způsobit potíže, zatímco jindy vyšší hladina P_{lt} obtíže nezpůsobí). Z toho vyplývá, že zařízení způsobující flikr podléhá určitým emisním limitům. Úroveň rušení zařízení je funkcí velikosti proudu a vztažné impedance.

2.5 Poklesy napájecího napětí

Náhlé snížení efektivní hodnoty napětí se nazývá pokles napájecího napětí. Efektivní hodnota napětí klesne pod 90 % jeho dohodnuté hodnoty a následně se vrátí na hodnotu nad 90 % dohodnuté hodnoty, to vše za dobu od 10 ms do 180 s. Zjednodušený tvar poklesu napětí je znázorněn na obrázku 8, jsou na něm zřetelně vidět charakterizující parametry a to hloubka (ΔU) a trvání (Δt).



Obrázek 8 Zjednodušený tvar poklesu napětí dle [7]

Veličiny popisující pokles napájecího napětí [7]:

- hloubka poklesu ΔU – [%] tvoří procentuální rozdíl mezi referenčním napětím a zbytkovým napětím;
- zbytkové napětí U_{ret} – minimální hodnota napětí zaznamenaná během poklesu udávaná jako procentuální nebo poměrná hodnota referenčního napětí;
- trvání poklesu Δt – [s] časový interval označující dobu trvání poklesu napětí od snížení pod prahovou hodnotu do okamžiku návratu na hodnotu prahovou nebo vyšší, plus případné hysterezní napětí, což je okrajová hodnota prahového napětí používána pro měření.

2.5.1 Hloubka poklesu ΔU

Z důvodu praktických měření je vyžadováno, aby se úroveň napětí, registrovaná během poklesu napětí, vztahovala k referenčnímu napětí (typicky vůči jmenovitému napětí nebo dohodnutému napětí), spíše než ke skutečnému napájecímu napětí na začátku poklesu. Tím se v podstatě zajistí to, že snížení napájecího napětí na 0 V je rovno snížení o 100 % hodnoty. Hloubka poklesu napětí je tedy rozdíl mezi referenčním napětím a zbytkovým napětím. Pokles napětí je tedy pouze jedna událost (bez ohledu na průběh a na počet postižených fází). Většina průmyslových a komerčních odběratelů v distribučních sítích nn má v současné době třífázové napájení s instalacemi, které však často obsahují jednofázová zařízení citlivá na poklesy napětí. Potom se může vícefázová událost považovat za jednu událost, jestliže se události v jednotlivých fázích časově překrývají.

Ohled se také musí brát na rozdíl mezi poklesem napětí a přerušením napětí. Norma [6] uvádí konvenční práh 1 % dohodnutého napětí (hloubka poklesu 99 %). Jestliže potom úroveň napájecího napětí poklesne pod 1 % dohodnutého napájecího napětí U_c , můžeme daný jev považovat za krátké přerušení (v opačném případě je to pokles napětí).

2.5.2 Trvání poklesu napětí Δt

Trvání poklesu napětí definováno jako časový interval mezi okamžikem, kdy napětí poklesne pod prahovou hodnotu do okamžiku, kdy je napětí rovno nebo vyšší než prahová hodnota, plus případné hysterezní napětí. Hystereze je okrajová hodnota prahových hodnot používaná při měření, aby se zamezilo kmitání naměřených hodnot, když se měřený parametr pohybuje kolem prahové úrovně. [8]

Dolní hranice trvání je obecně 10 ms. Je to minimální doba, za kterou lze stanovit efektivní hodnotu. Horní hranice trvání je 60 s. Musí být zahrnuty účinky spínání zatížení a činnosti přepínače odboček transformátoru v napájení síti nebo v instalaci odběratele.

2.5.3 Vyhodnocení krátkodobých poklesů a přerušení napětí

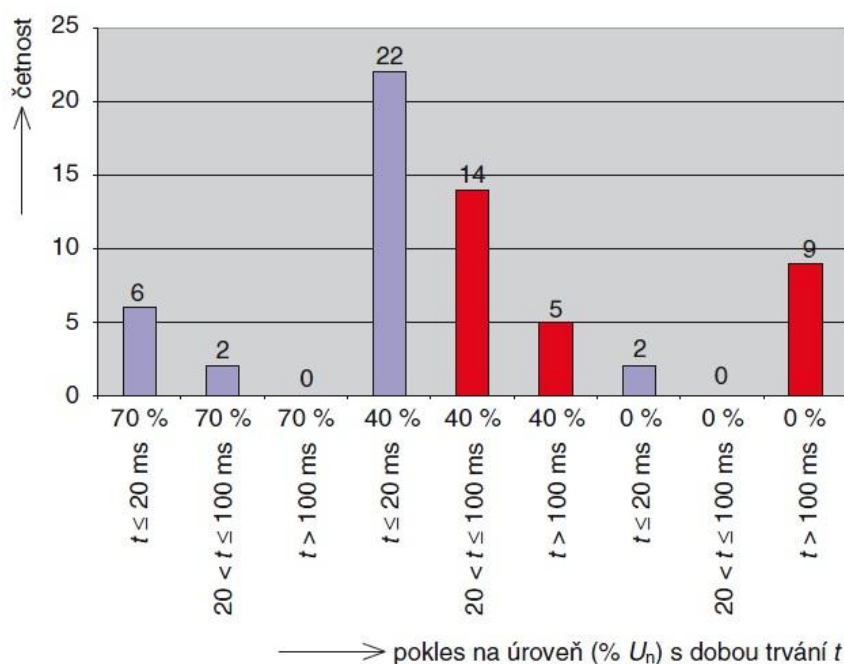
Krátkodobé poklesy napájecího napětí se vyhodnocují dle tabulky 3. Pro tabulku 3 jsou důležité tyto poznámky [15]:

- interval zbytkového napětí 85 % až 90 % se překrývá s pásmem dovolených 95 % průměrných efektivních hodnot napájecího napětí v měřicích intervalech 10 minut, přesto se považují údaje pro toto pásmo za důležité vzhledem k pracovnímu rozsahu stykačů, relé, apod.;
- podle výsledků sledování bude počet tříd případně zvýšen;
- řádek se zbytkovým napětím $< 5\% U_{ret}$ je určen pro napět'ové poklesy, při kterých pod $5\% U_{ret}$ kleslo napětí v jedné nebo dvou fázích a není tedy splněna podmínka pro vyhodnocení události jako přerušení napětí.

Tabulka 3 Třídění krátkodobých poklesů a přerušení napětí dle [15]

Zbytkové U_{ret} [%]	10 ms $\leq t <$ 100 ms	100 ms $\leq t <$ 200 ms	200 ms $\leq t <$ 500 ms	500 ms $\leq t <$ 1 s	1 s $\leq t <$ 3 s	3 s $\leq t <$ 20 s	20 s $\leq t <$ 1 min	1 min $\leq t <$ 3 min
$85 \leq d < 90$	N ₁₁	N ₂₁	N ₃₁	N ₄₁	N ₅₁	N ₆₁	N ₇₁	N ₈₁
$70 \leq d < 85$	N ₁₂	N ₂₂	N ₃₂	N ₄₂	N ₅₂	N ₆₂	N ₇₂	N ₈₂
$40 \leq d < 70$	N ₁₃	N ₂₃	N ₃₃	N ₄₃	N ₅₃	N ₆₃	N ₇₃	N ₈₃
$5 \leq d < 40$	N ₁₄	N ₂₄	N ₃₄	N ₄₄	N ₅₄	N ₆₄	N ₇₄	N ₈₄
$d < 5$	N ₁₅	N ₂₅	N ₃₅	N ₄₅	N ₅₅	N ₆₅	N ₇₆	N ₈₆

Na obrázku 9 je četnost výskytů jednotlivých typů poklesů napětí, která nepříznivě ovlivňují spolehlivost výpočetní a řídicí techniky, v grafu jsou červenou barvou stejně tak, jako počet poklesů o 100 % U_n respektující krátkodobé přerušení napětí. [16]



Obrázek 9 Četnost poklesů napětí ve veřejné distribuční síti nn během roku dle [16]

2.6 Přerušení napájecího napětí

Dle normy [6] dělíme přerušení napájecího napětí do dvou skupin:

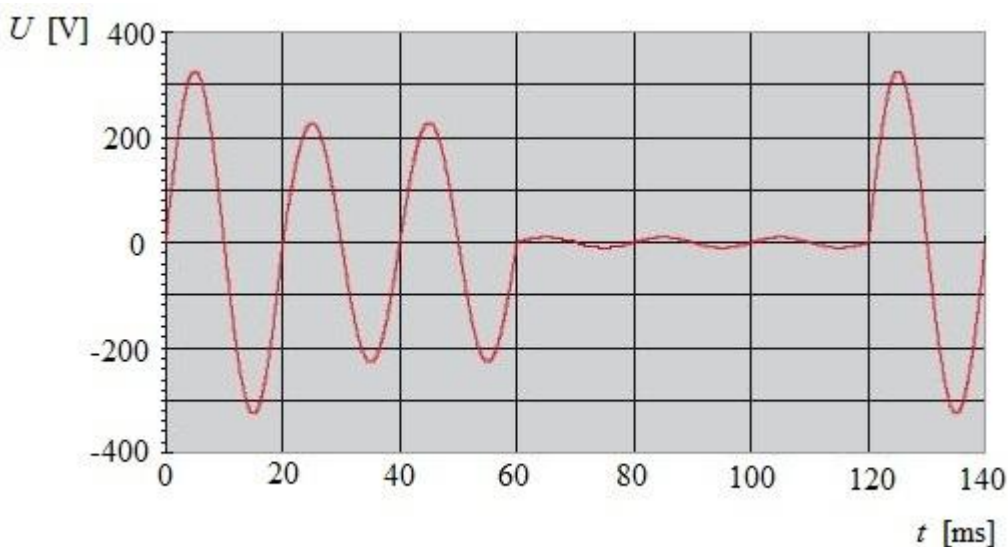
- krátkodobé přerušení napájecího napětí, které trvá do 3 minut včetně;
- dlouhodobé přerušení napájecího napětí, které trvá 3 minuty a déle.

Toto rozdělení bere v úvahu používané systémy chránění a automatické opětné zapínání v sítích.

2.6.1 Krátkodobé přerušení

Za normálních provozních podmínek je roční výskyt krátkodobých přerušení napájecího napětí v rozsahu od několika desítek až do několika stovek. Přibližně 70 % krátkodobých přerušení může mít dobu trvání do 1 sekundy. [6]

Norma [6] dodavateli elektrické energie předepisuje maximální přípustné tolerance průměrné efektivní hodnoty napájecího napětí, nejsou však stanoveny žádné meze pro okamžité hodnoty napětí v případě krátkodobých přerušení. Na obrázku 10 je vidět pokles napětí sítě nn na 70 % po dobu dvou period a krátkodobé přerušení napětí po dobu tří period.



Obrázek 10 Pokles napětí v síti nn po dobu dvou period a krátkodobé přerušení napětí po dobu tří period podle [16]

2.6.2 Dlouhodobé přerušení

Náhodná přerušení napětí jsou obvykle způsobena vnějšími událostmi nebo vlivy, kterým provozovatel distribuční sítě nemůže předcházet. Pro roční četnost a doby trvání dlouhodobých přerušení není možné udat typické hodnoty. Dlouhodobá přerušení jsou způsobena velkými rozdíly v uspořádání a struktuře elektrických sítí a rovněž nepředvídatelnými důsledky činnosti třetích stran a počasí. [6]

Za normálních provozních podmínek se pro směrné hodnoty dle normy [6] uvádí roční četnost přerušení napětí v rozmezí 3 až 10 minut, ovšem v závislosti na oblasti může dosahovat až 50 minut. Pro předem dohodnutá, plánovaná přerušení se směrné hodnoty neuvádějí, protože tato přerušení se ohlašují v dostatečném předstihu. [6]

2.7 Přepětí

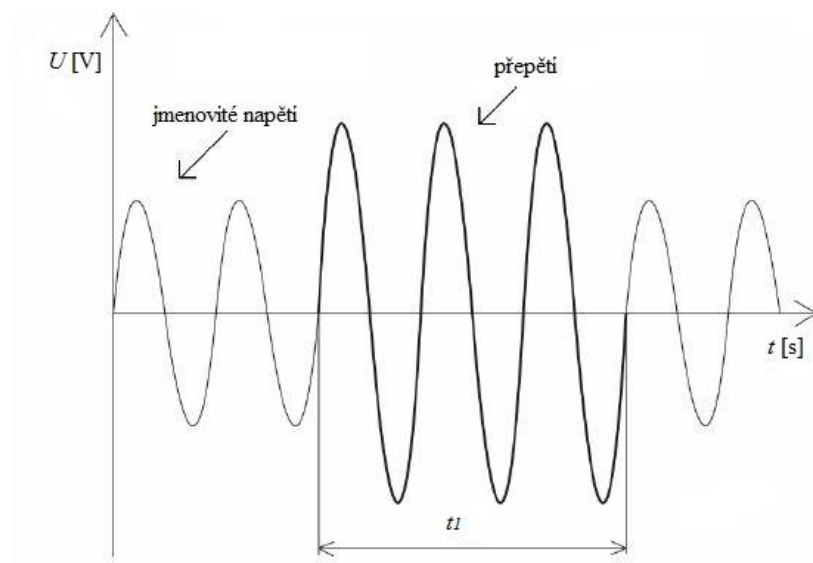
Přepětí v trojfázových střídavých soustavách je ve své podstatě jakékoli napětí mezi fázemi nebo mezi fází a zemí, které svou velikostí překračuje amplitudu jmenovitého napětí. Přepětí se liší svou velikostí, časovým průběhem, příčinou svého vzniku či frekvencí výskytu. [17]

Přepětí v elektrických sítích vzniká v důsledku provozních manipulací a změn, provázených přechodovými ději (např. tzv. spínací přepětí), v důsledku rezonance nebo v důsledku vnějších příčin (atmosférická přepětí). Elektrická zařízení je nutné konstruovat tak, aby vydržela určitou úroveň přepětí po určitou dobu. Proti přepětí (při němž se zařízení může poškodit) je nutné zařízení chránit vhodnou ochranou (bleskosvody, zemnicí lana, ochranná jiskřiště, svodiče přepětí).

2.7.1 Dočasná přepětí o síťovém kmitočtu mezi živými vodiči a zemí

Dočasná přepětí o síťovém kmitočtu mezi živými vodiči a zemí v síti nn jsou následkem poruch v sítích vn. Dle normy [6] lze říci, že dočasná přepětí o síťovém kmitočtu se obecně objeví během poruch (v distribuční síti nebo v instalaci uživatele) a zaniknou po odstranění poruchy. Doba trvání a velikost těchto přepětí závisí především na zemní impedanci sítě vn.

Distribuční síť nn se většinou provozují s účinně uzemněným uzlem. V případě, že nastane zemní spojení v síti vn, které zvýší zemní potenciál v blízkosti sítě nn, může se v síti nn vytvořit přepětí mezi fázovými a uzemněnými vodiči. Doba trvání je obvykle omezená odpojením do 5 s (čas ochrany vn a vypínač). Velikost přepětí všeobecně nepřekročí hodnotu 1,5 kV (efektivní hodnota), závisí na zemní impedanci nn sítě a na velikosti proudu zemního spojení v síti vn.



Obrázek 11 Průběh dočasného přepětí s dobou trvání t_1

Pro porovnání, v distribučních sítích vn mohou být dočasná přepětí hlavně dvojího druhu:

- jednopólové zemní spojení;
- ferorezonance.

2.7.2 Přechodná přepětí mezi živými vodiči a zemí

Přechodná přepětí mezi živými vodiči a zemí mají různé charakteristiky a lze je dělit podle:

- amplitudy;
- četnosti výskytu;
- trvání;
- hlavní složky frekvence přepětí;
- míry změny napětí a obsahu energie.

Energetický obsah přechodného přepětí je závislý na jeho původu. Indukovaná přepětí způsobená úderem blesku mají nízký energetický obsah, avšak větší amplitudu v porovnání s přepětím způsobeným spínáním (obecně trvají déle než atmosférická přepětí).

Přechodná přepětí se mohou objevit i v zásuvkách instalací, jsou ovšem nižší než ta, která se objevují ve veřejných distribučních sítích. Špičková hodnota přechodných přepětí ve veřejných distribučních sítích nn obecně nepřekračuje 6 kV. Mohou se ovšem vyskytnout i hodnoty vyšší. Obecně se pak zařízení ve veřejných distribučních sítích nn upřesňuje a následně volí na tomto základě. Doba náběhu impulsu je v rozmezí milisekund až mikrosekund. Jsou-li instalovány ochrany před přepětím, pak mají být zvoleny s uvážením vyššího energetického obsahu, spojeného se spínacími přepětími. [7]

Nyní je uveden popis přechodných přepětí vyskytujících se v distribučních sítích nn (utříděných podle trvání).

2.7.2.1 Dlouho trvajících přepětí v distribučních sítích nn

Trvají déle než 100 μ s a jejich příčinou jsou především [7]:

- Působení omezujících pojistek:
 - amplituda do 1 kV až 2 kV;
 - tvar vlny unipolární;
 - vysoký obsah energie.
- Spínání kondenzátorů z důvodu kompenzace účinníku:
 - amplituda do 2 až 3 násobku špičkové hodnoty jmenovitého napětí;
 - tvar vlny oscilační, kmitočet v rozsahu od desetin Hz až po několik kHz;
 - vysoký obsah energie.
- Přenos přechodných přepětí ze strany vn na nn stranu transformátorů elektromagnetickou vazbou:
 - amplituda do 1 kV;
 - tvar vlny je oscilační, kmitočet v rozsahu od desetin Hz až po několik desítek kHz.

2.7.2.2 Středně dlouho trvající přepětí v distribučních sítích nn

Trvají od 1 μ s do 100 μ s. Příčina těchto přepětí je způsobena především bleskovou činností. Typické příklady jsou [7]:

- Přímé údery blesků do vodičů vedení distribučních sítí nn (neočekávané impulsy):
 - amplituda až do 20 kV;
 - tvar vlny je unipolární;
 - vysoká hladina energie.
- Indukce od úderu blesku do vodičů blízkých vedení distribučních sítí nn:
 - amplituda nepřekročí 6 kV (může být ovšem až 20 kV);
 - tvar vlny unipolární, někdy unipolární oscilační.
- Odporová vazba
 - souvisí s bleskovými proudy do země, protékajícími společným uzemněním sítě
 - amplituda nepřesáhne 10 kV;
 - vysoký obsah energie;
 - tvar vlny unipolární, někdy unipolární oscilační.
- Přenos rázu způsobených přímými úderem blesku z vn na nn kapacitní vazbou, je-li ráz způsoben přímým úderem blesku do vedení vn, může to naopak vést k rychlému poklesu napětí, způsobeného působením bleskojistky s jiskřištěm při likvidaci poruchy:
 - amplituda přepětí v distribuční síti nn obecně nepřesáhne 6 kV;
 - typicky unipolární, někdy oscilační tvar vlny.
- Opětné zápaly, spojené se spínáním v distribučních sítích nn mohou rezonovat s přirozenou frekvencí místní sítě:
 - amplituda přepětí do několikanásobku jmenovitého napětí;
 - tvar vlny oscilační a složený s kmitočtem v rozsahu od desítek kHz do 1 MHz.
- Činnost vypínačů s velmi krátkou dobou hoření oblouku (do 2 μ s):
 - amplituda několikanásobek jmenovitého napětí;
 - tvar vlny oscilační s kmitočtem v rozsahu od několika desítek kHz do 1 MHz.
- Činnost spínacích zařízení v instalaci odběratele:
 - obecně nízký obsah energie a rychle se s vzdáleností tlumí (nepřesáhnou 2,5 kV).

2.7.2.3 Krátce trvající přepětí v distribučních sítích nn

Trvají maximálně do 1 μ s. Příčinou jsou hlavně [7]:

- Místní spínání malých indukčních proudů:
 - amplituda do 1 kV až 2 kV;
 - oscilační tvar vlny s kmitočtem od několika MHz do několika desítek MHz.
- Rychlé přechodné jevy způsobené spínáním v síti nn spínači se vzduchovou dráhou (relé a stykače):
 - vyvolávající postupné přerušování a opětné zápaly (skupiny impulsů, jeden impuls: čelo asi 5 ns, a trvání asi 50 ns).

2.8 Nesymetrie napájecího napětí

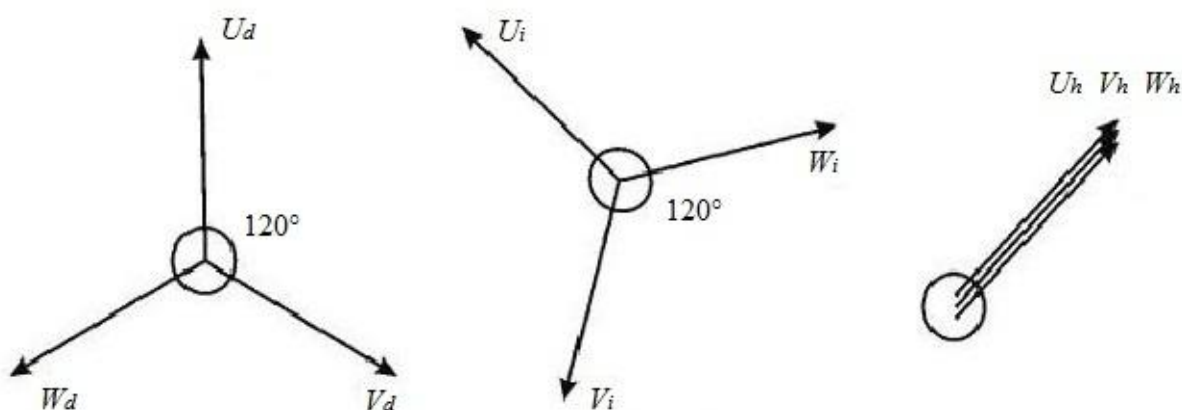
Nesymetrie třífázového napájecího napětí je způsobená ztrátou symetrie vektorů fázového napětí (ztráta velikosti a úhlu nebo alespoň velikosti či úhlu), vyvolané obvykle nesymetrií zatížení.

Normální provozní podmínky definují, že během libovolného týdenního měření má být 95 % desetiminutových středních efektivních hodnot nulové složky napájecího napětí v rozsahu od 0 % do 2 % sousledné složky. V místech nebo oblastech odběratelů elektrické energie na hladině nn, které mají hodně jednofázových nebo dvoufázových přípojek, může nesymetrie dosahovat v trojfázových předávacích místech až 3 %.

Dle normy [6] je nesymetrie uvažována pouze ve vztahu k trojfázovému systému a pouze ke zpětné složce napětí. Přiměřeně přesné výsledky pro úroveň nesymetrie, obvykle počítané jako poměr zpětné a sousledné složky poskytuje několik aproximací. [6]

Nesymetrii napětí pak lze vyjádřit pomocí vztahu ($\bar{U}_{12}$, $\bar{U}_{23}$ a $\bar{U}_{31}$ představují tři sdružená napětí):

$$\text{Nesymetrie napětí} = \sqrt{\frac{6 \cdot (\bar{U}_{12}^2 + \bar{U}_{23}^2 + \bar{U}_{31}^2)}{(\bar{U}_{12} + \bar{U}_{23} + \bar{U}_{31})^2}} - 2 \quad (-; V, V) \quad (7)$$



Obrázek 12 Zobrazení symetrických složek dle [18]

K vyčíslení nesymetrie napětí nebo proudu trojfázového systému, jsou používány symetrické složky. Trojfázový systém se rozkládá na tzv. sousledný neboli stejnosměrný, zpětný a netočivý neboli nulový systém, označován indexy d, i, h (někdy je značení 1, 2, 0). Indexy u, v, w uvádějí rozdílné fáze (někdy je značení a, b, c). Sousledná složka odpovídá kladnému točivému poli, zatímco zpětná složka zápornému točivému poli. V případě střídavých elektrických strojů to představuje fyzikálně správnou interpretaci pro točivé magnetické pole. [18]

2.9 Harmonická napětí

Harmonické napětí U_h je definováno jako napětí s kmitočtem rovným celému násobku základního kmitočtu napájecího napětí v síti. Harmonická napětí lze rozpoznávat následujícími způsoby:

- jednotlivě, pomocí jejich relativní amplitudy U_h vztahující se k napětí základní harmonické;
- souhrnně, pomocí činitele celkového harmonického zkreslení THD .

Harmonické popisujeme frekvencí nebo poměrem k základní frekvenci (tzn. řád harmonické). Parametr charakterizující nelinearitu se nazývá činitel harmonického zkreslení THD .

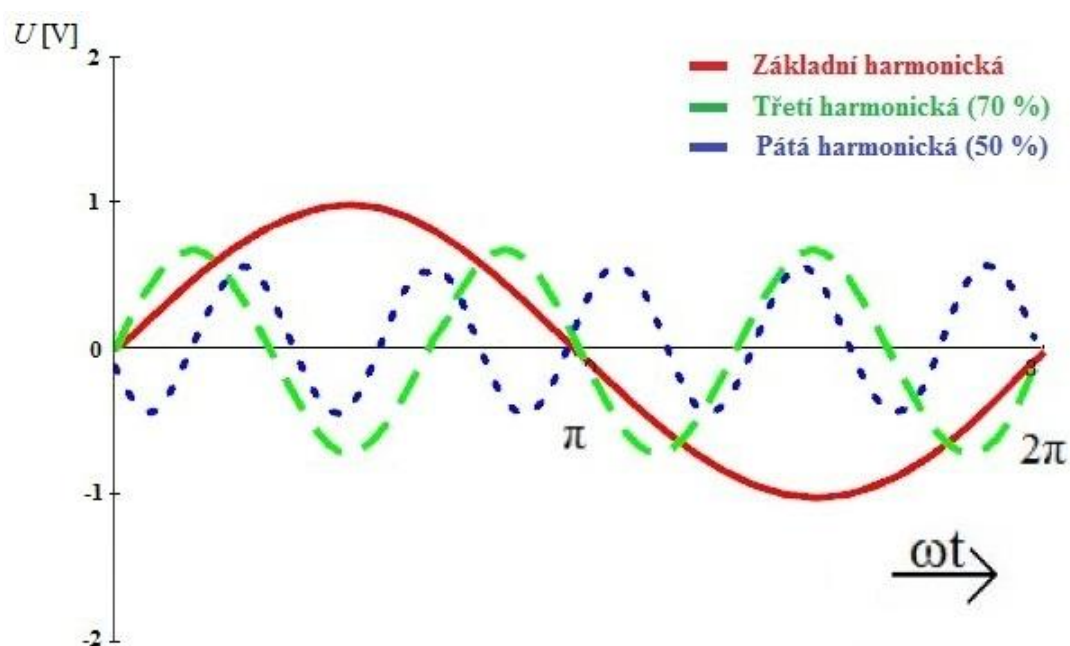
- Pro proudy platí vztah:

$$THD_I = \frac{\sqrt{\sum_{k=2}^{25} (I_k)^2}}{I_1} \quad (-; A, A) \quad (8)$$

- Pro napětí platí vztah:

$$THD_U = \frac{\sqrt{\sum_{k=2}^{25} (U_k)^2}}{U_1} \quad (-; V, V) \quad (9)$$

I_1 (U_1) je proud (napětí) základní harmonické, I_k (U_k) je proud (napětí) k -té harmonické, k značí řád harmonické. Maximální řád harmonické je uveden 25tý, což je horní hranice pro níž jsou normou uvedené hodnoty.

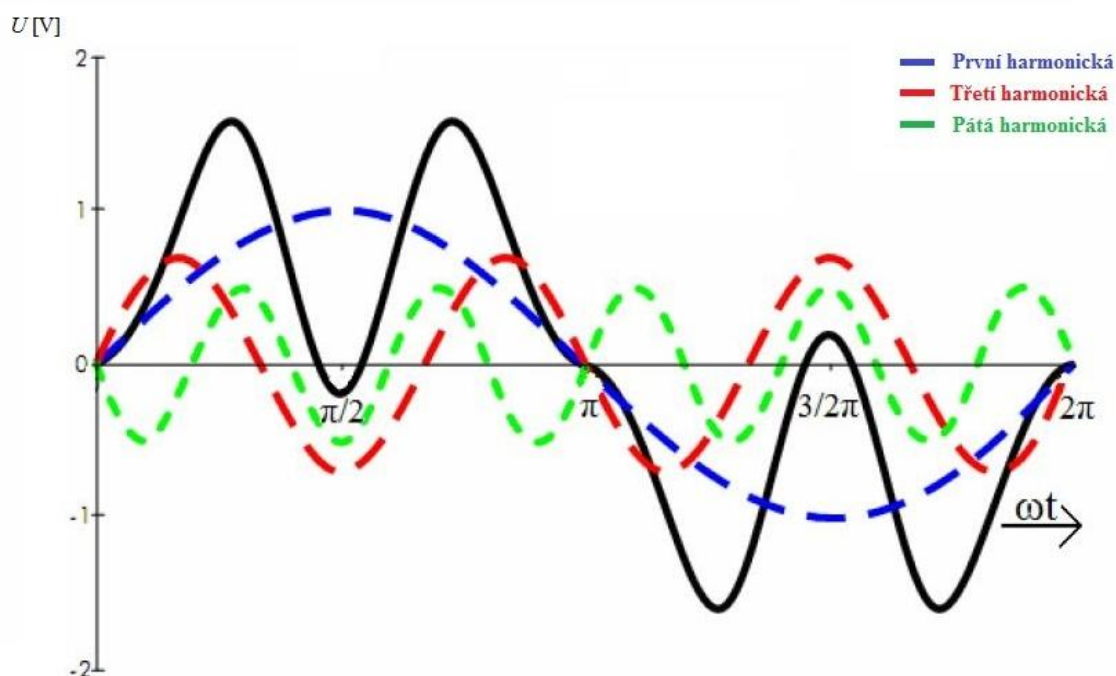


Obrázek 13 Základní harmonická s třetí a pátou harmonickou dle [19]

Harmonické napájecí napětí je způsobeno nelineárním zatížením uživatelů připojených do všech napěťových úrovní distribučních sítí. Harmonické proudy, impedance sítě a harmonická napětí v odběrných místech sítě jsou časově proměnlivé.

Harmonické frekvence jsou celé násobky základního harmonického napájecího napětí, tzn. při základní harmonické 50 Hz je třetí harmonická 150 Hz a pátá harmonická je 250 Hz. Obrázek 13 ukazuje sinusový průběh základní, třetí a páté harmonické. [19]

Během normálních provozních podmínek má být v náhodném týdenním období 95 % desetiminutových středních efektivních hodnot napětí všech harmonických menší nebo rovno hodnotě uvedené v tabulce 4. U jednotlivých harmonických mohou rezonance způsobit napětí vyšší. *THD* napájecího napětí, který zahrnuje všechny harmonické až do řádu 40 (omezení do řádu 40 přijato dohodou v mnoha zemích), má být menší nebo roven 8 %.



Obrázek 14 Deformovaný časový průběh proudu dle [19]

Na obrázku 14 je časový průběh, který není pouze sinusový, což znamená, že běžné měřicí zařízení (například multimetr) měřící efektivní hodnoty nemusí měřit správně. Deformovaný průběh proudu obsahuje šest průchodů nulou za periodu (místo obvyklých dvou) a tedy každé zařízení využívající průchod proudu nulou jako referenční nebude fungovat správně. Skutečnost, že takový průběh obsahuje i jiné harmonické než základní, musí být brána v úvahu. [19]

Tabulka 4 Úrovně jednotlivých harmonických napětí v předávacím místě v procentech U_n pro řády harmonických až do 25tého řádu dle [6]

liché harmonické				sudé harmonické	
ne násobky 3		násobky 3			
řád harmonické h	harmonické napětí (U_h)	řád harmonické h	harmonické napětí (U_h)	řád harmonické h	harmonické napětí (U_h)
5	6,0 %	3	5,0 %	2	2,0 %
7	5,0 %	9	1,5 %	4	1,0 %
11	3,5 %	15	0,5 %	6...24	0,5 %
13	3,0 %	21	0,5 %		
17	2,0 %				
19	1,5 %				
23	1,5 %				
25	1,5 %				
POZNÁMKA: Úrovně pro harmonické vyšších řádů než 25 se neuvádějí, jelikož jsou obvykle malé, avšak vlivem rezonančních jevů obtížně předvídatelné.					

V normě [6] je obecnou snahou interpretovat všechny charakteristiky napětí vůči jmenovitému napětí U_n nebo dohodnutému napětí U_c . U měřicích přístrojů je typické vztahovat se při měření harmonických k hodnotě základního napětí. Mnohé přístroje pro měření harmonických popisují výsledky měření vůči základní harmonické složce (zvláště ty, které měří *THD*).

2.10 Meziharmonická napětí

Meziharmonická napětí jsou v podstatě sinusová napětí s kmitočtem ležícím právě mezi harmonickými. Kmitočet tedy není celý násobek základního kmitočtu síťového napětí. Meziharmonická napětí, s kmitočty blízkých základnímu kmitočtu, mohou při nízkých hladinách vyvolávat flickr. Jindy mohou meziharmonická napětí působit rušivě pro HDO.

Meziharmonické napětí jsou stále ve stádiu zkoumání a shromažďování poznatků. Ovšem specifikace měřicích přístrojů meziharmonických napětí prakticky odpovídá těm, která se používají pro harmonická napětí. [7]

2.11 Úrovně napětí signálů v napájecím napětí

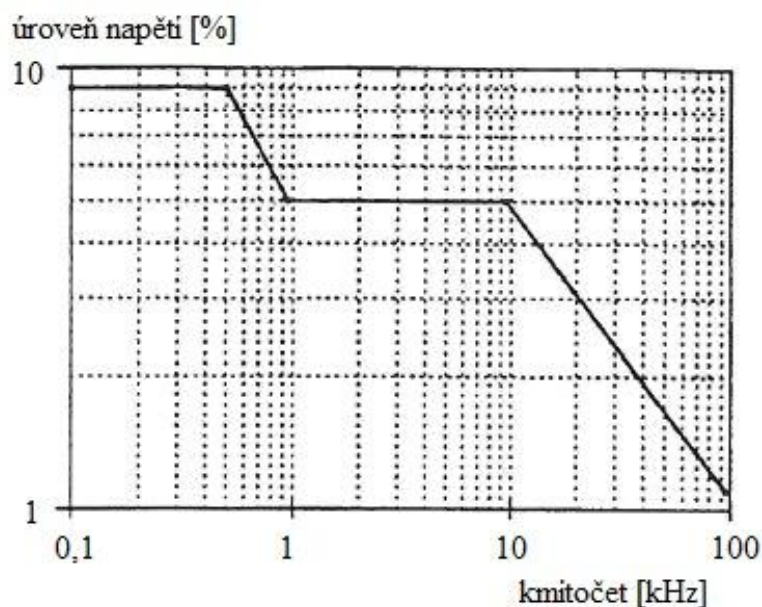
Provozovatelé distribučních sítí využívají distribuční síť také pro přenos informací. Střední hodnota napětí signálu měřeného po dobu tří sekund musí být v 99 % dne menší nebo rovná hodnotám daným na obrázku 15.

Pokud mluvíme o přenosech signálů ve veřejné distribuční síti, musíme rozlišovat dva základní systémy:

- HDO systémy, které mají rozsah kmitočtů od 100 Hz až do 3 kHz;
- komunikační systémy s nosnými signály, které mají rozsah kmitočtů od 3 kHz až do 148,5 kHz.

Úrovně napětí, uváděné v normě [6] obecně vycházejí z těchto pravidel (3 úrovně rozsahů):

- Rozsah frekvence od 100 Hz až do 900 Hz:
 - hodnoty jsou podle tzv. „Meister-křivky“ (ta definuje maximální dovolené napětí HDO v distribučních sítích nn);
 - „Meister-Křivka“ je složena z horizontální části pro nízké kmitočty (maximální úroveň 20 V) a z klesající části (od 500 Hz dle vztahu $10\,000/f$ (v Hz)).
- Rozsah frekvence od 900 Hz až do 3 kHz:
 - hodnota 5% U_n je shodná s maximální úrovní ovládacích napětí (pro rozsah kmitočtů od 500 Hz do 2 kHz).
- Rozsah frekvence od 3 kHz až do 148,5 kHz:
 - hodnoty signalizace v sítích nn v kmitočtovém rozsahu od 3 kHz až do 148,5 kHz jsou vzhledem k metodě měření dvojnásobné.



Obrázek 15 Úrovně napětí na kmitočtech signálů v procentech U_c ve veřejných distribučních sítích dle [6]

3 RUŠIVÉ JEvy OVLIVŇUJÍCÍ KVALITU NAPÁJECÍHO NAPĚTÍ

V předchozí kapitole jsou definovány jednotlivé charakteristiky napájecího napětí v distribučních sítích nízkého napětí. V této kapitole jsou popsány jednotlivé rušivé jevy a s nimi související faktory, dále také jejich příčiny vzniku, šíření v síti, případně opatření vedoucí k potlačení negativních účinků na ostatní spotřebiče v síti.

V dnešní době se může elektrická energie pokládat za jednu z nejdůležitějších komodit, která je využívána v průmyslu a obchodu. Její základní specifika jsou jednoduchost, neskladnost a stejnorodost. Podle typu odběratele se může lišit přijatelná úroveň kvality elektrické energie.

Existuje několik základních jevů, které způsobují případné zhoršení kvality elektrické energie. Tyto jevy jsou ve své podstatě odchylky od ideálního stavu a lze je rozdělit do pěti kategorií:

- harmonické zkreslení;
- přerušení dodávky;
- podpětí nebo přepětí;
- poklesy napětí nebo rázové napětí;
- přechodné děje.

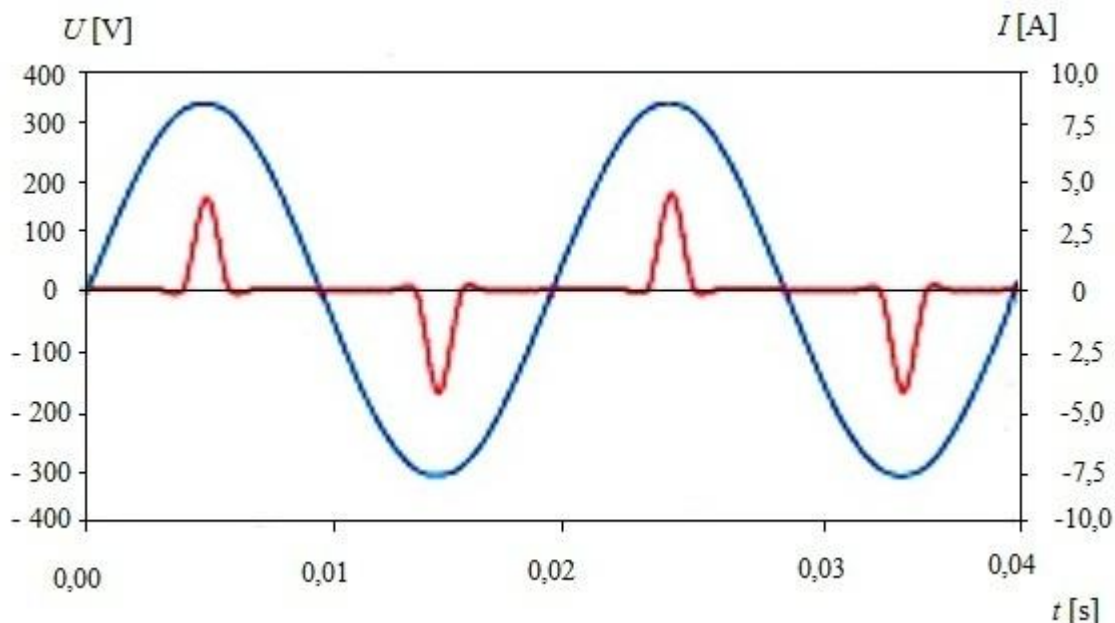
Z důvodu značných investic a lepší hospodárnosti si uživatelé (spotřebitelé), kteří vyžadují extrémně vysoké nároky na kvalitu elektrické energie, zajistí vše potřebné na vlastní náklady. Nelze očekávat, že by dodavatelé zajistili velmi vysokou kvalitu dodávky elektrické energie pro všechny odběratele v celé elektrické síti. [11]

3.1 Harmonické zkreslení

Harmonické zkreslení v trojfázových soustavách je způsobeno nelineárním zatížením. Vyvolává v soustavě proudy s poměrně velkou amplitudou, které obsahují harmonické složky. Jelikož tyto proudy nelze sledovat pomocí jednoduchého měřicího zařízení (které mají běžně k dispozici montéři a údržbáři), tak se stává, že jejich úroveň je značně podceňována (mnohdy až o 40 %). Tyto chyby amplitud se mohou objevit v obvodech s vodiči o nedostatečném průřezu. V případě, že obvody nejsou vybaveny dostatečnou nadproudovou ochranou, provozní teplota vodičů se zvyšuje a dochází ke ztrátám energie (2 % až 3 % odběru).

Harmonické proudy jsou generovány všemi nelineárními spotřebiči, jimiž jsou:

- Jednofázové zátěže, například:
 - spínané napájecí zdroje (SMPS);
 - elektronické předřadníky kompaktních svítidel (CFL);
 - malé zdroje nepřerušitelného napájení (UPS).
- Trojfázové zátěže, například:
 - elektronické regulační pohony;
 - velké UPS jednotky.



Obrázek 16 Průběh odebíraného proudu spínaným zdrojem

Na obrázku 16 lze vidět průběh odebíraného proudu spínaným zdrojem (červená barva) a síťové napětí (modrá barva). Spínaný zdroj je běžně v každém počítači, v televizorech a nabíječkách. Spínaný zdroj plní funkci transformátoru, mění velikost napětí a galvanicky odděluje vstupní a výstupní obvod.

Vlivem harmonických dochází ke značnému zvýšení ztrát vířivými proudy v transformátorech, protože tyto ztráty jsou úměrné druhé mocnině kmitočtu. Kvůli vyšším ztrátám je vyšší i provozní teplota transformátoru a jeho životnost se značně zkracuje. [20]

Je-li známá frekvence f a magnetická indukce B mohou se určit ztráty způsobené vířivými proudy ze vztahu:

$$P_v \cong f^2 \cdot B^2 \quad [\text{J; Hz, T}] \quad (10)$$

Ekonomickým důsledkem harmonických je [20]:

- zkrácení životnosti zařízení;
- snížení energetické účinnosti;
- náchylnost k častému vybavování ochran.

U transformátorů se předpokládá životnost 30 až 40 let. Je-li potřeba vyměnit zařízení například již po 7 až 10 letech, může to mít vážně finanční důsledky. Zkrácení životnosti zařízení je tedy finančně náročné.

Prevence spočívá v dobře navrženém rozvodu. Je rozhodně vhodnější použití kabelů s průřezem o jeden nebo dva stupně vyšší, než je potřebná minimální hodnota. Sníží se tím ztráty i provozní náklady. To vše při mírném zvýšení investičních nákladů.

3.2 Přerušování dodávky

Přerušování dodávky je další problém, který může nastat při dodávce elektrické energie. Může být plánované (z důvodu oprav) nebo neplánované (z důvodů poruch). Doba trvání přerušování dodávky se pohybuje od několika sekund až po několik minut (v extrémních případech to může být několik dní, týdnů či měsíců).

Dodávka elektrické energie se rozděluje podle důležitosti do tří skupin [21]:

- první stupeň (dodávka elektrické energie musí být zabezpečena za každých okolností, její přerušování může způsobit ohrožení lidských životů a velké národohospodářské ztráty, dodávka musí být zajištěna ze dvou nezávislých zdrojů);
- druhý stupeň (dodávka elektrické energie má být podle možnosti zabezpečena, protože její přerušování může způsobit podstatné zmenšení nebo i zastavení výroby, následkem přerušování však nenastane ohrožení lidských životů, způsob napájení se provádí zálohováním);
- třetí stupeň (dodávka elektrické energie nemusí být zabezpečena zvláštními opatřeními, napájení se provádí z jednoho zdroje bez zálohování).

V domovních a průmyslových instalacích existuje několik míst, kde porucha jediného prvku, kabelu nebo spojení způsobí naprostý výpadek dodávky. Ochrana proti úplnému přerušování dodávky je dvojitá. Rozvod musí být navržen tak, aby se odstranila slabá místa nebo alespoň ta, která představují největší riziko. Za slabá místa se dají považovat části elektrických sítí, které jsou na poruchu nejcitlivější. [20]

Velké a energeticky náročné podniky by měly mít zajištěné záložní napájení. Například papírny vyrábí papír v kontinuálním procesu. Výroba papíru vyžaduje přesné řízení rychlosti stovky válců ve výrobní lince (jejich délka může přesáhnout 500 m). Porucha v zásobování elektrickou energií (dokonce i pokles napětí) má za následek ztrátu synchronizace a zastavení celého procesu. Pro obnovení výroby je potřebné odstranit celulózu a papír v jednotlivých částech výrobní linky (může trvat až několik hodin). Vážným důsledkem pro výrobce je i to, že není schopen zásobovat odběratele (zákazníka). Například novinový papír se používá v tak obrovském množství, že je znemožněno v podstatě veškeré skladování (jak u odběratele, tak dodavatele). Neschopnost dodat papír znamená, že vydavatel nemůže tisknout. To vše může mít za následek vážné finanční ztráty. Vše to může nakonec vyústit ve změnu dodavatele papíru nebo změnu smlouvy v neprospěch dodavatele (postihování sankcemi).

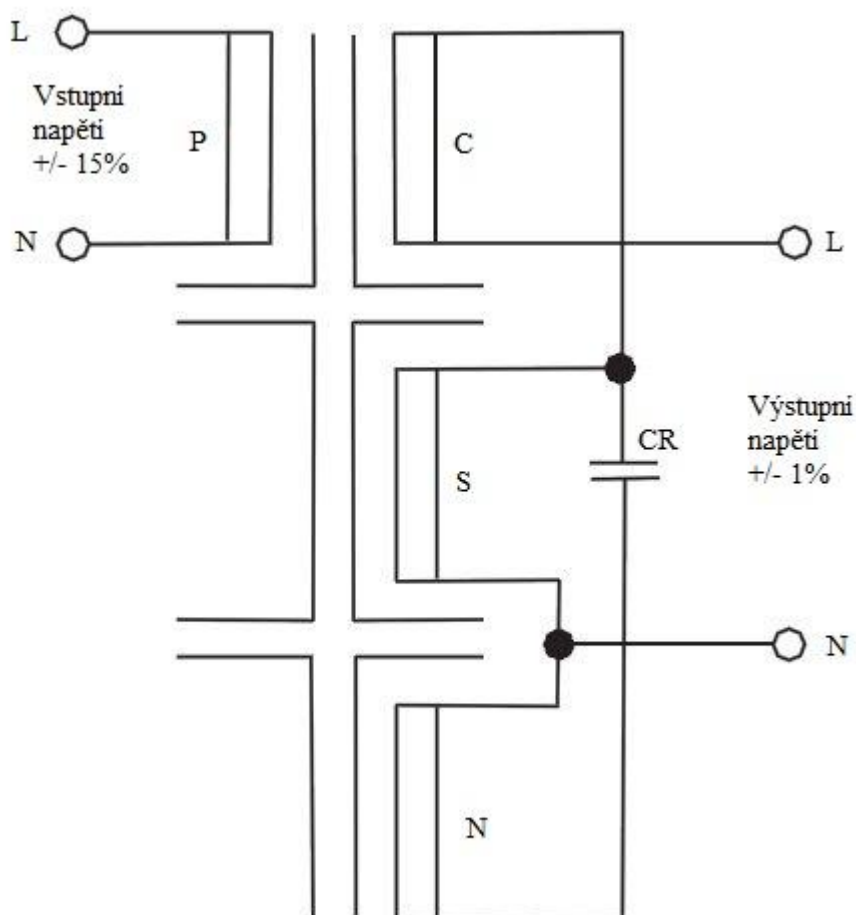
Pro menší podniky s nižšími nároky na elektrickou energii (například projektantské firmy), může být výhodné pořízení vlastního zdroje, který je v případě výpadků napájení schopen zásobovat nejdůležitější zařízení. Jako záložní zdroje se například používají UPS, které mají ovšem omezenou kapacitu a musí se použít pouze pro skutečně nezbytné spotřebiče (například servery počítačové sítě a důležité pracovní stanice).

Zkratka UPS je odvozena z anglických slov „uninterruptible power supply“, které v překladu znamenají „nepřerušitelný zdroj energie“. Je to zařízení nebo systém, který zajišťuje souvislou dodávku elektrické energie pro zařízení, která nesmějí být neočekávaně vypnuta. [22]

3.3 Podpětí nebo přepětí

Přepětí je ve své podstatě jakékoli napětí mezi fázemi nebo mezi fází a zemí, které svou velikostí překračuje amplitudu jmenovitého napětí. Podpětí je napětí, jehož velikost je menší než jmenovité napětí. Zařízení zmírňující problémy vyvolané podpětím v síti se všeobecně nazývají automatické stabilizátory napětí.

Automatické stabilizátory napětí mají za úkol vyřešit konkrétní problém, aniž by vytvářely problémy další. Jedním z příkladů by bylo připojení ferorezonančního stabilizátoru napětí k výstupu generátoru horší jakosti, aby se snížily změny napětí. Výsledný efekt by byl nepříznivě ovlivněn změnami frekvence generátoru horší jakosti, který by generoval 1,5 % změnu střídavého napětí pro každou 1 % změnu frekvence. [23]



Obrázek 17 Základní obvod ferorezonančního stabilizátoru napětí CVT dle [23]

Na přepětí je citlivá celá řada přístrojů, mezi něž patří například počítače, mikroprocesorová ovládání, audiovizuální technika, světelné regulátory, satelity, faxy, apod. Na podpětí jsou zvláště citlivé ledničky, mrazničky, automatické pračky, apod.

Hlavní typy automatických stabilizátorů napětí jsou následující [23]:

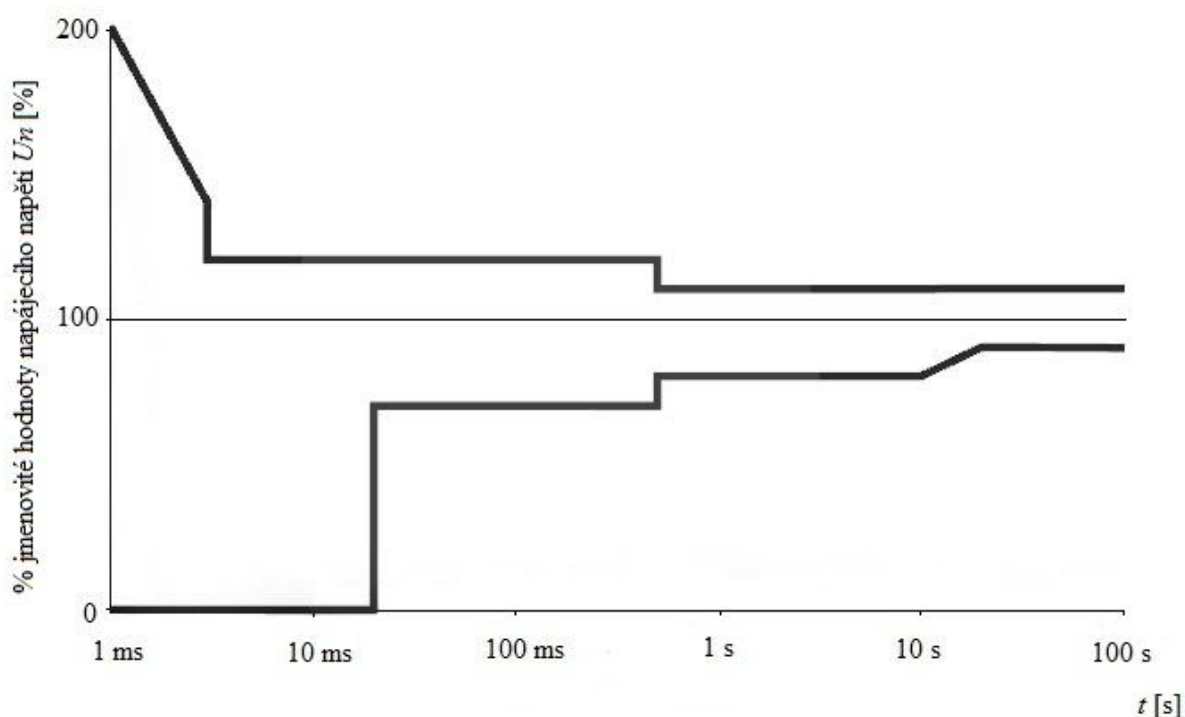
- elektromechanický;
- ferorezonanční nebo konstantní transformátor napětí (CVT);

- elektronické krokové regulátory;
- nasycené reaktory (transduktory);
- elektronický stabilizátor napětí (EVS).

Řešení problému s podpětím nebo přepětím spočívá ve zlepšení vlastností napájecí sítě. To je ovšem velice drahá a mnohdy téměř nerealizovatelná záležitost. Ve zvláštních případech, kde jsou náklady oprávněné, je možno zajistit napájení ze dvou oddělených zdrojů, které jsou považovány jako nezávislé.

3.4 Poklesy napětí nebo rázové napětí

Pokles napětí je krátkodobé zmenšení efektivní hodnoty napájecího napětí. Křivka znázorněna na obrázku 18 popisuje toleranci zařízení na napěťové poruchy všech možných druhů. Křivka byla původně vyvinuta pro potřeby uživatelů výpočetní techniky. Kvůli definici nároků na dané zařízení, bylo mnohem jednodušší určit měřením u odběratele, zda je kvalita elektrické energie dostatečná. [20]



Obrázek 18 ITIC křivka tolerance zařízení na napěťové poruchy všech možných druhů dle [20]

Většina případů poklesu napětí je způsobeno poruchami v napájecí síti. Příčinou těchto poruch mohou být například spínací operace (zapnutí velkých odběrů, zkratové poruchy a následná funkce ochrany) nebo změny jalových a činných proudů odebíraných zátěžemi, které jsou připojené k síti (změny úbytků napětí na impedanci sítě). V některých případech

mohou poruchy v napájecích sítích zapříčinit velké finanční ztráty. V tabulce 5 jsou uvedeny přibližné hodnoty finančních ztrát v různých odvětvích.

Tabulka 5 Finanční ztráty vzniklé poruchami v jednotlivých odvětvích dle [20]

Odvětví	Finanční ztráta na poruchu
Výroba polovodičů	95 miliónů Kč
Finančnictví	150 miliónů Kč za hodinu
Výpočetní středisko	20 miliónů Kč
Telekomunikace	750 tisíc Kč za minutu
Ocelárny	10 miliónů Kč
Sklárny	8 miliónů Kč

Jedná se o obrovské náklady vzniklé zdánlivě bezvýznamnými jevy trvajících méně než jednu sekundu. Reakce jednotlivých typů zařízení (výpočetní technika, pohony s říditelnou rychlostí) není známa a není možné odhadnout nebo řídit chování celého systému. Při nepřetržité výrobě (výroba papíru) mohou důsledky poklesu napětí být stejně vážné, jako při úplném přerušení dodávky (stejně náklady na vyčištění výrobní linky, stejné ztráty na materiálu a produkci). V případě výrobních operací využívajících počítače, může celková doba potřebná na restartování velkého počtu pracovních stanic a obnovení nedokončených transakcí a neuložených dokumentů dosáhnout až několika hodin.

Zdroje nepřerušného napájení (UPS), ve kterých je odběr napájen z nepřetržitě dobíjené baterie, jsou proti následkům poklesu napětí imunní. Výpadek napětí je nejprve detekován a následně dojde k přepnutí odběru z náhradního zdroje. [20]

3.5 Přejídné děje

Přejídné děje způsobují napěťové poruchy o velmi krátkém trvání (jednotky milisekund), s velkou amplitudou (několik tisíc voltů) a s velmi rychlým nárůstem. Přejídné děje většinou způsobuje úder blesku nebo spínání velkých či induktivních zátěží. Ochrany v síti zajišťují, že přejídné děje nepřesáhnou bezpečnou hodnotu a většina problémů má tak původ v blízkosti rozvodů nebo přímo v rozvodech uživatele. Následky se mohou projevit okamžitě (výpadek elektrárny, spotřebičů, ztráta dat v počítačích) nebo postupně, kdy při každé poruše dojde k částečnému porušení izolace (havárie s velmi vážnými následky).

Základním požadavkem případné prevence je, aby uzemňovací systém byl navržen tak, že bude mít nízkou impedanci ve velkém rozsahu kmitočtu s kvalitním nízkoimpedančním spojením svodů a zemničů. Při návrhu ochranného zařízení proti účinkům atmosférického přepětí je potřeba zohlednit místní podmínky (počet dnů v roce, kdy dochází k bouřkám). [20]

4 PŘÍSTROJE PRO MĚŘENÍ KVALITY NAPÁJECÍHO NAPĚTÍ

Tato kapitola popisuje přístroje sloužící pro měření kvality napájecího napětí. Blíže je popsán především přístroj BK-ELCOM ENA 500.22 od společnosti ELCOM, s nímž byla provedena samotná analýza v praktické části bakalářské práce. Ohledně ostatních přístrojů jsou v této kapitole uvedeny pouze základní informace.

4.1 BK-ELCOM ENA 500.22

Analyzátor BK-ELCOM ENA 500.22 je součást systému BK-ELCOM pro monitoring a analýzu kvality elektrické energie v souladu s platnými normami. Moderní koncepce tohoto systému je založena na bázi technologie virtuální instrumentace. Analyzátor BK-ELCOM ENA 500.22 splňuje požadavky normy ČSN EN 61000-4-30 pro přístroj třídy A.



Obrázek 19 Analyzátor BK-ELCOM ENA 500.22 dle [24]

4.1.1 Technická specifikace

Analyzátory firmy BK-ELCOM umožňují měření a následnou analýzu několika třífázových systémů v různých kombinacích, jedná-li se o analyzátor BK-ELCOM ENA 500.22, tak konkrétně lze měřit a vyhodnocovat dva napěťové a dva proudové systémy (každý o čtyřech měřených kanálech).

Základní systém je výkonné PC zabudované do přenosné a mechanicky odolné skříně. Komunikační vybavení analyzátoru tvoří rozhraní Ethernet, dva USB porty a dva sériové porty COM. Základní jednotka má rozměry 300 x 300 x 120 mm a celková hmotnost analyzátoru

BK-ELCOM ENA 500.22 je přibližně 7,5 kg. Pracovní teplota se pohybuje v rozmezí -25°C až $+50^{\circ}\text{C}$. [24]

4.1.2 Popis funkcí

Analyzátor BK-ELCOM ENA 500.22 je schopen vykonávat následující funkce [24]:

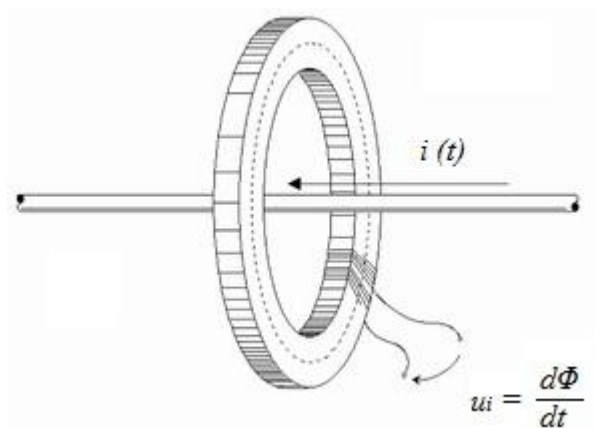
- analyzátor harmonických;
- osciloskop a vektorskop;
- monitor napětí;
- zapisovač poruchových dějů;
- analyzátor signálu HDO;
- transientní zapisovač – monitor rychlých dějů;
- analyzátor symetrických složek;
- PAD zapisovač – monitor pomalých dějů;
- měřič blikání (flickrmetr);
- monitor výkonů a energií.

Všechny výše uvedené funkce je možné vykonávat najednou. Jednotlivé funkce lze prohlížet pomocí tlačítek na spodním okraji grafického rozhraní.



Obrázek 20 Panel funkcí analyzátoru dle [26]

Měření se provádí pomocí kleští v provedení s magnetickým obvodem nebo pomocí Rogowského cívky. Její princip je zobrazen na obrázku 21. Napájecí zdroj měřicí jednotky má poměrně velkou kapacitu a je tím umožněno udržet přístroj aktivní při výpadcích menších než tři sekundy.



Obrázek 21 Princip Rogowské cívky dle [25]

Vstupní rozsahy napěťových kanálů jsou 65, 110, 250 a 450 V AC, analyzátor měří až do 600 V rms. Přepětová ochrana modulu je 1 kV rms a izolační pevnost 4,2 KV, 50 Hz po dobu 1 minuty. Přesnost modulu je lepší než $\pm 0,1$ %. [24]

Vstupní rozsahy proudových kanálů jsou dány připojením proudových kleští s napěťovým výstupem nebo kleští Ampflex, pro které jsou v analyzátoru zabudovány zesilovače jejich výstupního signálu. Přesnost je lepší než $\pm 0,1$ % s kleštěmi MN71. [24]

Společné vlastnosti pro napěťové a proudové kanály: rozsahy jsou přepínatelné softwarově, vyhlazovací filtr na vstupu má frekvenci řezu 3 kHz, šířka měřeného pásma modulu je od 50 Hz do 2,50 kHz. [24]

Firmware analyzátoru může být pro tuto hardwarovou platformu řešen jako multisystém, uživatel přepíná mezi analyzovanými třífázovými systémy, přičemž každý z nich má k dispozici plnohodnotná grafická rozhraní jako u jednosystémového analyzátoru. [24]

Vstupy se signály proudů a napětí se mohou vzorkovat s frekvencí až 38400 vz/s na daný kanál. Základním vyhodnocovacím intervalem je doba deseti period měřeného signálu. Při frekvenci 50 Hz je doba jedné periody 0,02 s, doba 10 period je 0,2 s. Do této doby ($T = 0,2$ s) se tedy vejde 10 period proudového nebo napěťového signálu při frekvenci 50 Hz. Dále se vyhodnocují harmonické složky až do řádu padesáté harmonické, fázové hodnoty a fázové posuvy proudových a napěťových signálů, výkony a energie.

Základní měřicí cyklus charakteristik dle normy [6] je jeden týden. Pro zhuštění naměřených hodnot udává norma [8] další tři intervaly:

- 150 period (3 sekundy);
- 10 minut;
- 2 hodiny.

Tabulka 6 Základní časové intervaly pro měření s přístrojem BK-ELCOM ENA 500.22 dle [24]

Měřená hodnota	Základní šířka okna	Časový interval pro vyhodnocení
Frekvence	200 ms	10 s
Fázové napětí	200 ms	10 min
Harmonické napětí	200 ms	10 min
Flikr	200 ms	120 min
Krátkodobé poklesy	20 ms	-
Krátkodobá přerušení	20 ms	-
Dlouhodobá přerušení	20 ms	-
Dočasná přepětí	20 ms	-
Nesymetrie	200 ms	10 min

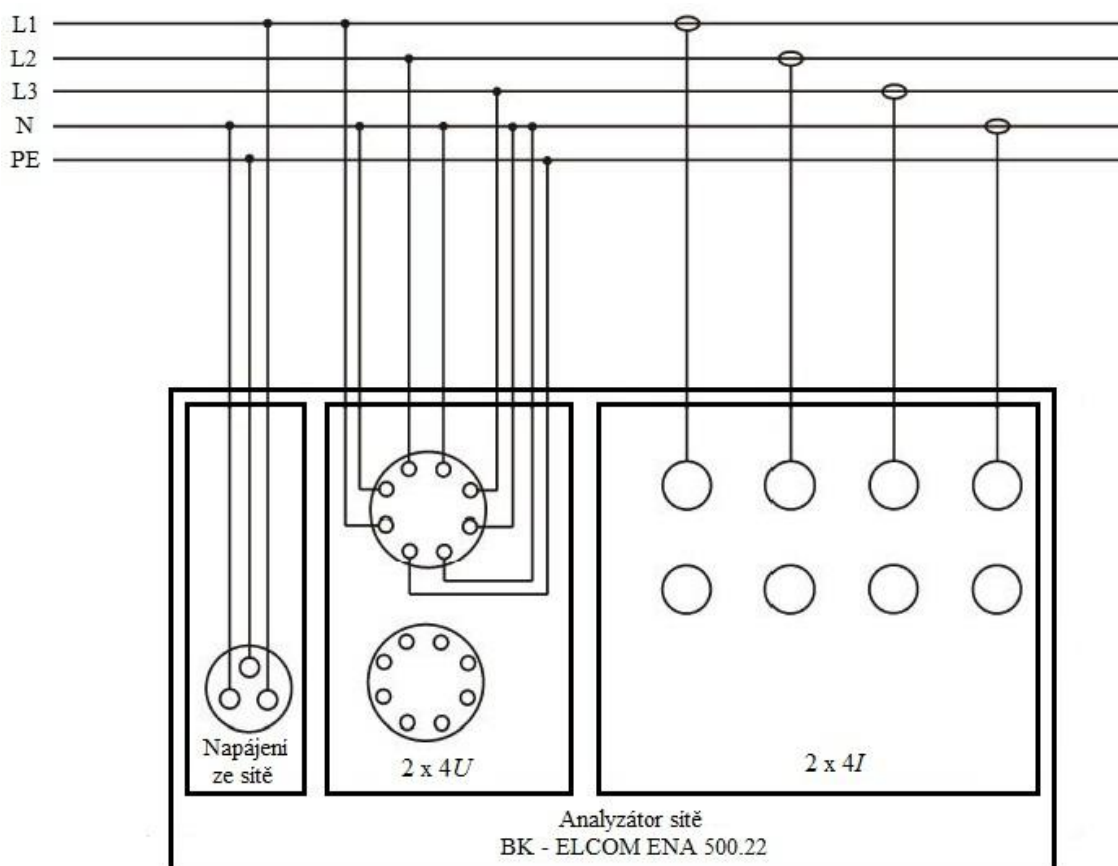
Analyzátor BK-ELCOM ENA 500.22 je vybaven tzv. transientním zapisovačem, který plní funkci záznamníku rychlých dějů. Vzorkovací frekvence je závislá na počtu kanálů (pro 8 kanálů

činí 9600 vz/s, pro 2 kanály činí 38400 vz/s, atd.). Transientní zapisovač ukládá naměřené vzorky na disk, ale neprovádí s nimi žádnou analýzu dat. [24]

Pro správné nastavení analyzátoru se musí správně zvolit zapojení měřicího přístroje, nastavení měřicích rozsahů napěťových a proudových vstupů a nastavení jednotlivých modulů. V programu pro nastavení analýzy měřené sítě se přes tlačítko *nastavení* vstoupí do grafického prostředí, v němž jdou upravit jednotlivé parametry [26]:

- napěťové a proudové rozsahy;
- přepočítávací konstanty převodů měřicích transformátorů proudů a napětí;
- zapojení;
- vzorkovací frekvence pro transientní zapisovač;
- úroveň referenčního napětí podle normy ČSN EN 50160;
- jmenovitá frekvence;
- krok pro analýzu spekter (harmonické a meziharmonické);
- mód analyzátoru (reálné měření či simulace).

Obrázek 22 znázorňuje jedno z možných připojení analyzátoru BK-ELCOM ENA 500.22 k analyzované síti. Při tomto připojení k analyzované síti jsou měřeny proudy tekoucí všemi fázemi, proud protékající středním vodičem, tři fázová napětí a rozdíl potenciálů mezi středním a ochranným vodičem.

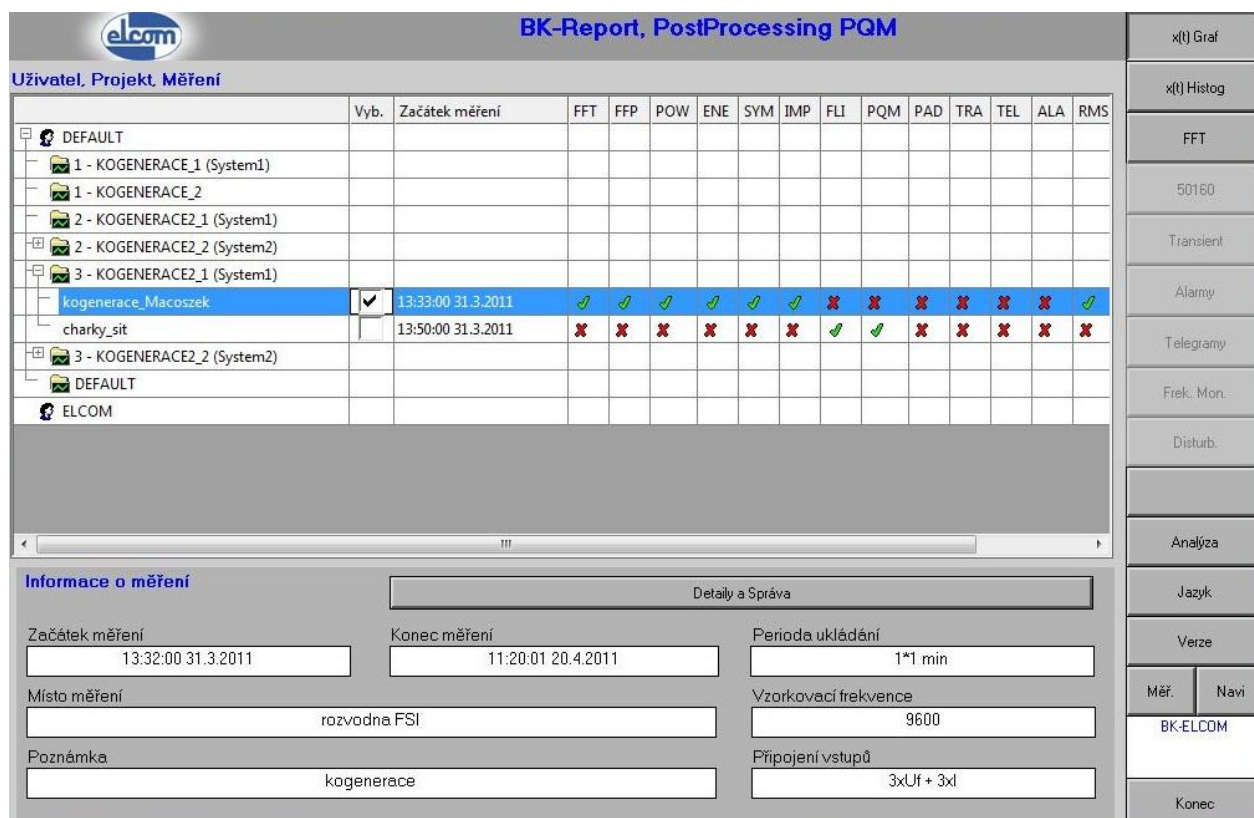


Obrázek 22 Volba způsobu připojení analyzátoru k měřené síti dle [26]

Pro analýzu a zpracování naměřených dat slouží software BK-REPORT, který je standardně dodáván spolu s analyzátelem BK-ELCOM. Tento software lze ovšem nainstalovat a spustit i na jiném počítači. Naměřená data se mohou exportovat do souboru obrázku bmp a případně do textového souboru.

Grafické rozhraní hlavního panelu obsahuje následující prvky [27]:

- v levé horní části je stromová struktura výběrového prvku pro výběr uživatele, projektu a měření;
- v levé spodní části informace o vybraném měření:
 - čas počátku měření;
 - čas konce měření;
 - perioda agregace dat;
 - místo měření;
 - vzorkovací frekvence;
 - poznámka;
 - způsob připojení analyzátoru při měření;
- v pravé části jsou na liště soustředěné ovládací tlačítka.



Obrázek 23 Hlavní panel pro volbu uživatele, projektu a měření

V místě uložení naměřených dat (informace jsou načítány ze souboru MAIN.cfg) jsou data uspořádána tak, že každý uživatel má svůj podadresář a každý projekt je podadresářem v tomto podadresáři. Uživatel však realizuje správu naměřených dat prostředky analyzátoru v jeho měřicí části. V názvu každého souboru je zakomponováno pořadové číslo dat, čas počátku ukládání a v příponě typ dat. [27]

4.2 Ostatní analyzátory

Měřicích přístrojů, pomocí kterých se mohou měřit síťové parametry, je na trhu velké množství a není možné se všemi podrobně zabývat. Pro názornost jsou tedy uvedeny další tři měřicí přístroje se stručným popisem.

4.2.1 Univerzální monitor MEg40

Univerzální monitor MEg40 nahrazuje klasické ručkové a registrační přístroje. Provádí vybrané funkce měření kvality napětí v souladu s normou ČSN EN 50160. Je to univerzální trojfázový panelový měřicí přístroj pro napěťové hladiny nn, vn a vvn. Měřené veličiny zobrazuje na velkoplošném podsvíceném LCD displeji. Ukládá je na paměťovou kartu, případně přenáší prostřednictvím USB rozhraní. [28]



Obrázek 24 Univerzální monitor MEg40 dle [28]

4.2.2 PQ monitor MEg35

PQ monitor MEg35 je určen pro trvalou instalaci a měření kvality napětí dle normy [6] a charakteristik proudů u sítí nn, vn či vvn. Stejně jako většina jiných PQ monitorů umožňuje měření časových průběhů napětí, proudů, činných a jalových výkonů. MEg35 je konstruován pro příchycení na DIN lištu. Naměřené data se mohou přesunout pomocí rozhraní ethernet, USB portu nebo pomocí zabudované čtečky SD karet. [29]



Obrázek 25 PQ monitor MEG35 dle [29]

4.2.3 PQ monitor MEG30

Tento multifunkční přístroj je přenosný a umožňuje měření a dlouhodobý záznam čtyř napětí a čtyř proudů, činných i jalových výkonů v trojfázových čtyřvodičových i pětivodičových nn sítích. Vlastní měření probíhá pomocí klešťových nebo flexibilních snímačů. [30]



Obrázek 26 Přenosný PQ monitor MEG30 dle [30]

4.2.4 Monitor EGÚ MDT 9i

Monitor EGÚ MDT 9i je využíván v distribučních transformátorech pro měření kvality dodávky elektrické energie v souladu s normou [6]. Umožňuje statistický třífázový záznam měřených a vypočtených hodnot napětí, proudů, výkonů a frekvence na sekundární straně distribučních transformátorů. [31]



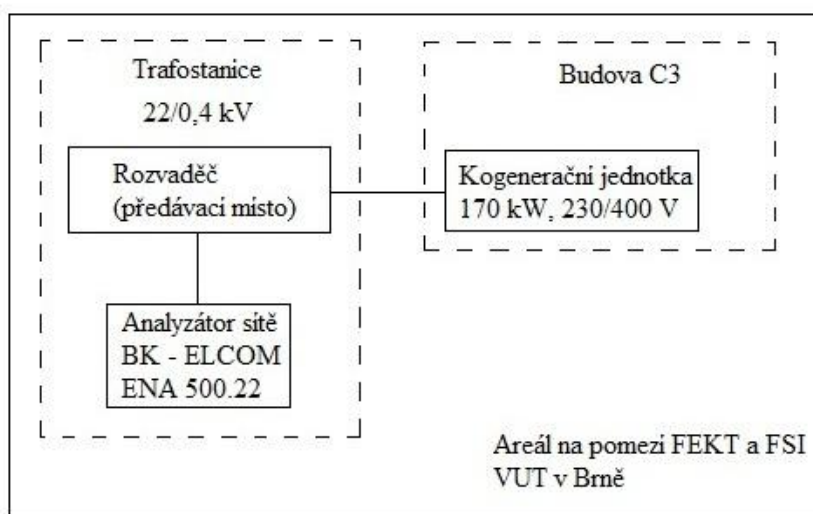
Obrázek 27 Monitor EGÚ MDT 9i dle [31]

5 MĚŘENÍ A VYHODNOCENÍ PARAMETRŮ KVALITY NAPĚTÍ

Měření kvalitativních parametrů probíhalo v trafostanici, která se nachází na pomezí Fakulty elektrotechniky a komunikačních technologií a Fakulty strojního inženýrství Vysokého učení technického v Brně. Měření probíhalo celkem tři týdny, zahájeno bylo dne 31. března 2011 a ukončeno dne 20. dubna 2011.

Původním záměrem bylo změření kvality elektrické energie vyráběné kogenerační jednotkou, která se nachází v budově C3, což je v těsné blízkosti trafostanice a má do ní vyvedený výkon. Výkon kogenerační jednotky činí 170 kW a je vyveden na napětí 230/400 V. Z měření kvality elektrické energie dodávané kogenerační jednotkou nakonec z důvodu nedostatku času a licenčních zádrhelů sešlo. Zapojeny byly tedy kromě napěťových i proudové vstupy, ovšem v následné analýze se z výše uvedených důvodů zabývá pouze parametry napětí.

Následná analýza naměřených hodnot byla zpracována pomocí softwaru BK-Report, který je dodáván přímo s měřicími přístroji firmy BK-ELCOM.

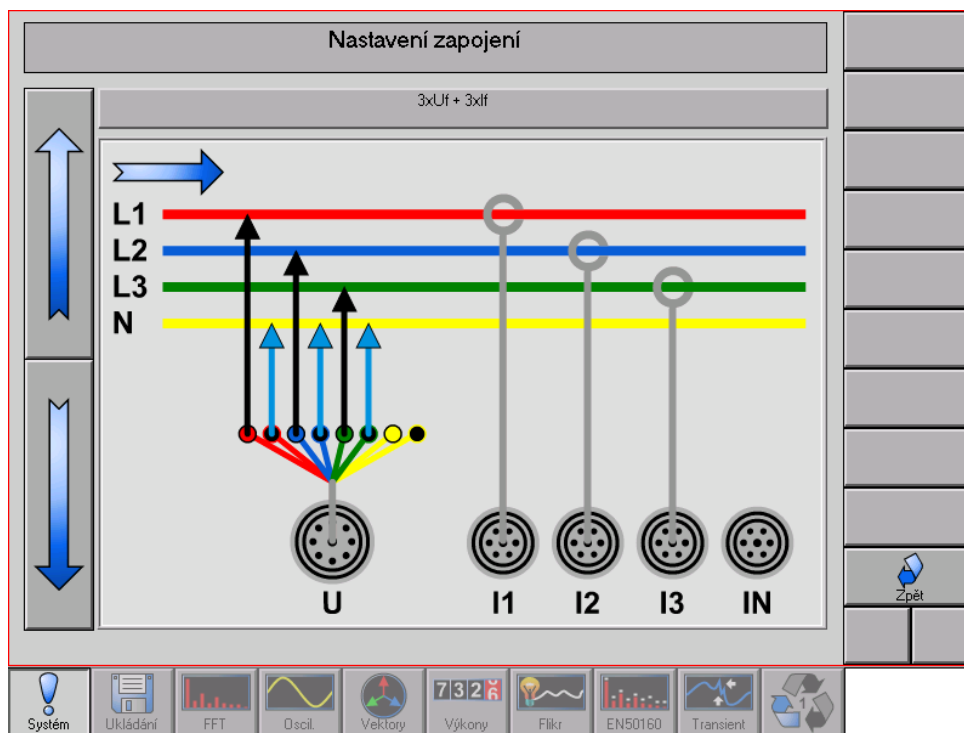


Obrázek 28 Lokalizace měřicího pracoviště

5.1 Nastavení přístroje

Analyzátor BK-ELCOM ENA 500.22 tvoří PC v přenosné skříni. K měření bylo zapotřebí dalších periférií (monitor, myš, klávesnice).

Před samotným startem měření bylo potřeba nastavit schéma připojení k síti, napěťové a proudové rozsahy, limity pro měření v souladu s normou ČSN EN 50160 (již přednastaveno), včetně harmonických složek a také cesty ukládání dat. Na obrázku 29 je vidět schéma nastavení připojení k síti.



Obrázek 29 Schéma nastavení připojení k síti

Na obrázku 30 je zobrazeno nastavení napěťových i proudových rozsahů při měření. Velikost napěťových rozsahů činila 250 V (efektivní fázová hodnota), velikost proudových rozsahů činila 1 kA. Jako proudový převodník byly použité kleště Ampflex, pro které jsou v analyzátoru zabudovány zesilovače jejich výstupního signálu.

The 'Nastavení rozsahů' window shows the following settings:

Channel	Napětí (V)	K:U	Proud (A)	K:I
1	250 V	1,00	AMPFLEX A100HI 1kA	1,00
2	250 V	1,00	AMPFLEX A100HI 1kA	1,00
3	250 V	1,00	AMPFLEX A100HI 1kA	1,00
N	250 V	1,00	MINI E3N 7A	1,00

The interface also includes a toolbar with icons for System, Ukládání, FFT, Oscil., Vektory, Výkony, Fikr, EN50160, and Transient, along with a 'Zpět' button.

Obrázek 30 Nastavení rozsahů

Na obrázku 31 je zobrazeno nastavení limitů pro měření v souladu s normou ČSN EN 50160.

Obrázek 31 Nastavení limitů dle normy ČSN EN 50160

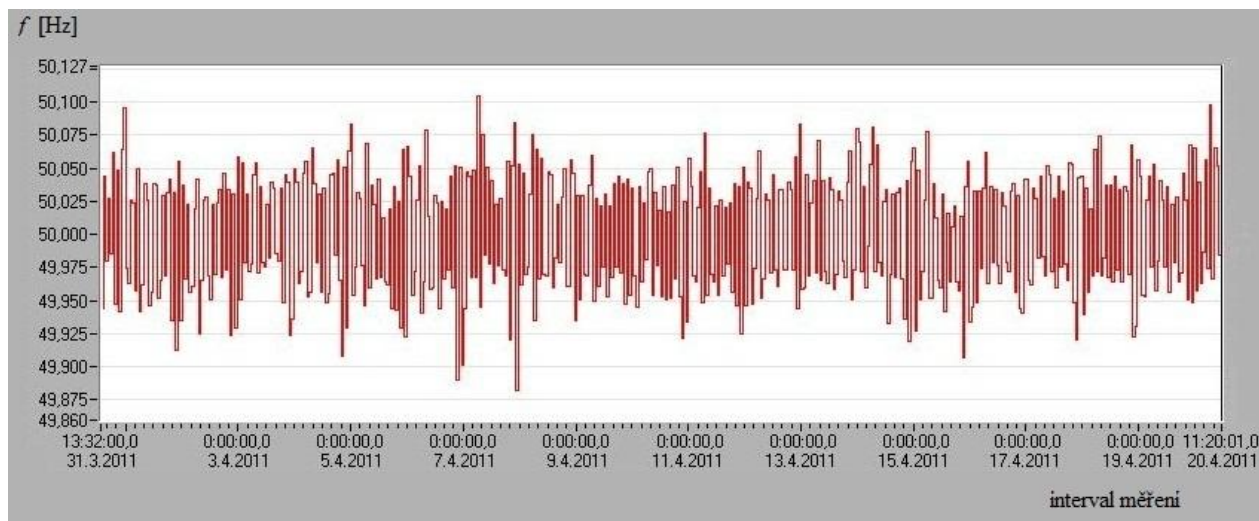
Tabulka 7 Nastavení harmonických limitů do 25tého řádu

Harm. limity - 3 sec.				Harm. limity - 10 min.			
0,5 ih.	1 %	13 h.	6 %	0,5 ih.	0,5 %	13 h.	3 %
1 h.	Inf %	13,5 ih.	0,4 %	1 h.	Inf %	13,5 ih.	0,2 %
1,5 ih.	1,2 %	14 h.	1 %	1,5 ih.	0,6 %	14 h.	0,5 %
2 h.	4 %	14,5 ih.	0,4 %	2 h.	2 %	14,5 ih.	0,2 %
2,5 ih.	0,4 %	15 h.	1 %	2,5 ih.	0,2 %	15 h.	0,5 %
3 h.	10 %	15,5 ih.	0,4 %	3 h.	5 %	15,5 ih.	0,2 %
3,5 ih.	0,4 %	16 h.	1 %	3,5 ih.	0,2 %	16 h.	0,5 %
4 h.	2 %	16,5 ih.	0,4 %	4 h.	1 %	16,5 ih.	0,2 %
4,5 ih.	0,4 %	17 h.	4 %	4,5 ih.	0,2 %	17 h.	2 %
5 h.	12 %	17,5 ih.	0,4 %	5 h.	6 %	17,5 ih.	0,2 %
5,5 ih.	0,4 %	18 h.	1 %	5,5 ih.	0,2 %	18 h.	0,5 %
6 h.	1 %	18,5 ih.	0,4 %	6 h.	0,5 %	18,5 ih.	0,2 %
6,5 ih.	0,4 %	19 h.	3 %	6,5 ih.	0,2 %	19 h.	1,5 %
7 h.	10 %	19,5 ih.	0,4 %	7 h.	5 %	19,5 ih.	0,2 %
7,5 ih.	0,4 %	20 h.	1 %	7,5 ih.	0,2 %	20 h.	0,5 %
8 h.	1 %	20,5 ih.	0,4 %	8 h.	0,5 %	20,5 ih.	0,2 %
8,5 ih.	0,4 %	21 h.	1 %	8,5 ih.	0,2 %	21 h.	0,5 %
9 h.	3 %	21,5 ih.	0,4 %	9 h.	1,5 %	21,5 ih.	0,2 %
9,5 ih.	0,4 %	22 h.	1 %	9,5 ih.	0,2 %	22 h.	0,5 %
10 h.	1 %	22,5 ih.	0,4 %	10 h.	0,5 %	22,5 ih.	0,2 %
10,5 ih.	0,4 %	23 h.	3 %	10,5 ih.	0,2 %	23 h.	1,5 %
11 h.	7 %	23,5 ih.	0,4 %	11 h.	3,5 %	23,5 ih.	0,2 %
11,5 ih.	0,4 %	24 h.	1 %	11,5 ih.	0,2 %	24 h.	0,5 %
12 h.	1 %	24,5 ih.	0,4 %	12 h.	0,5 %	24,5 ih.	0,2 %
12,5 ih.	0,4 %	25 h.	3 %	12,5 ih.	0,2 %	25 h.	1,5 %

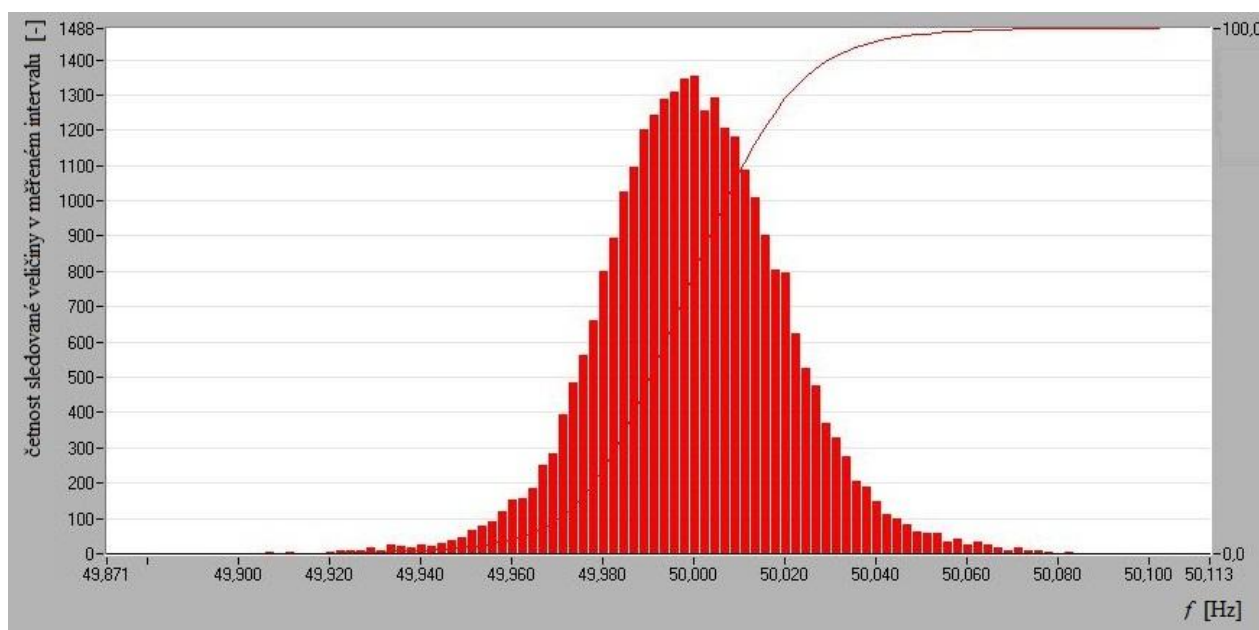
Tabulka 7 obsahuje nastavení dovolené velikosti harmonických a mezipharmonických složek napětí do 25tého řádu. Během samotného třítydenního měření se hodnoty analyzovaných veličin a charakteristik ukládaly na pevný disk přístroje BK-ELCOM ENA 500.22. Během měření bylo možné sledovat průběhy měřených veličin (pomocí funkce osciloskop).

5.2 Analýza naměřených dat

Analýza naměřených dat byla provedena pomocí softwaru BK-Report. Využito bylo především histogramů. Jsou v nich vidět přehledně meze, ve kterých se měřená charakteristika během měřeného období vyskytovala, a také jaké minimální a maximální hodnoty dosáhla. Vodorovná osa vždy zobrazuje měřenou veličinu včetně odpovídající jednotky, na ose svislé je stupnice pro histogram.



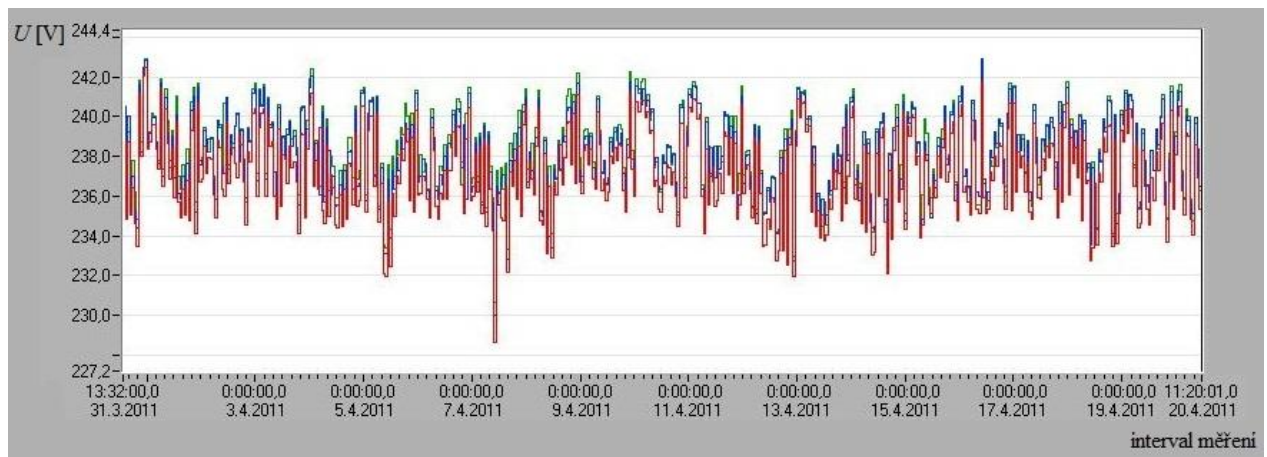
Obrázek 32 Průběh kmitočtu první fáze



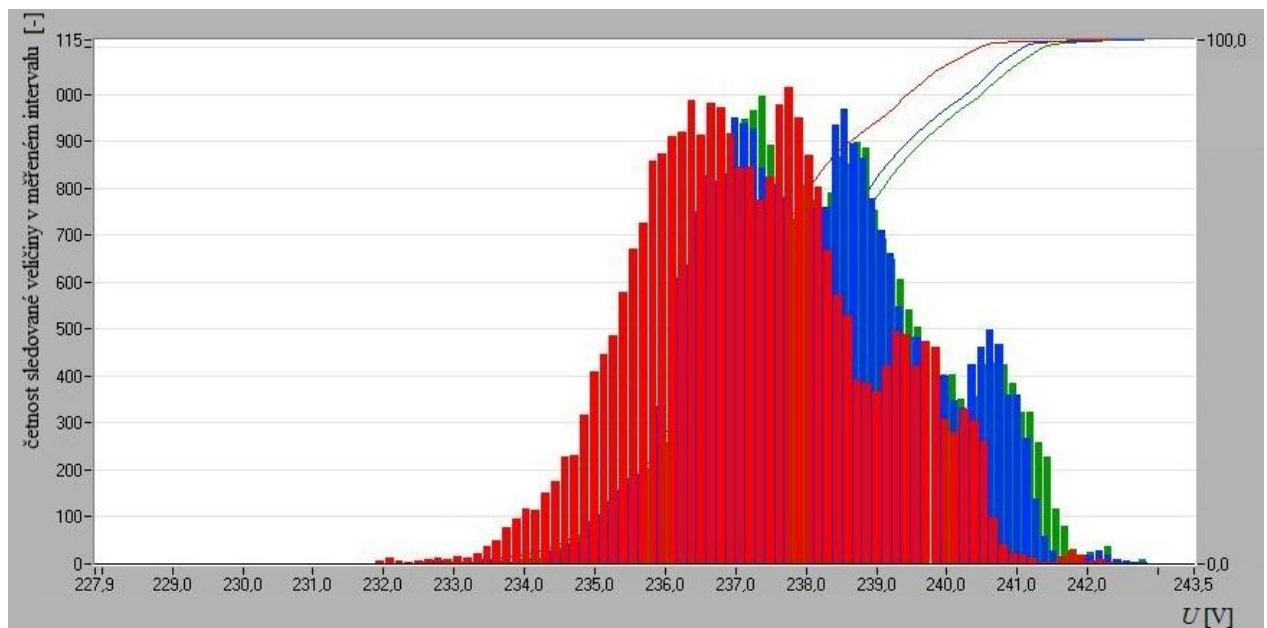
Obrázek 33 Histogram kmitočtu první fáze

Na obrázku 32 je zobrazen průběh kmitočtu napětí první fáze. Jeden krok byl 1 minuta (střední minutová hodnota). Pro přehlednější vyčtení hodnot, které dosahovala frekvence, je uveden histogram kmitočtu první fáze na obrázku 33.

Na obrázcích 34 a 35 je zobrazen nejprve průběh a následně histogram efektivních hodnot napětí všech tří fází (minutové střední hodnoty) za sledované období. Opět lze vidět meze pro změřená napětí tří fází. Nejnižší hodnota napětí byla změřena v první fázi (červená barva) a to 232,40 V, nejvyšší hodnota napětí byla změřena ve třetí fázi (zelená barva) a to 242,79 V. Norma [6] dovoluje odchylky $\pm 10 \%$ jmenovitého napětí. Z toho vyplývá, že velikosti napětí splňují předepsanou toleranci.

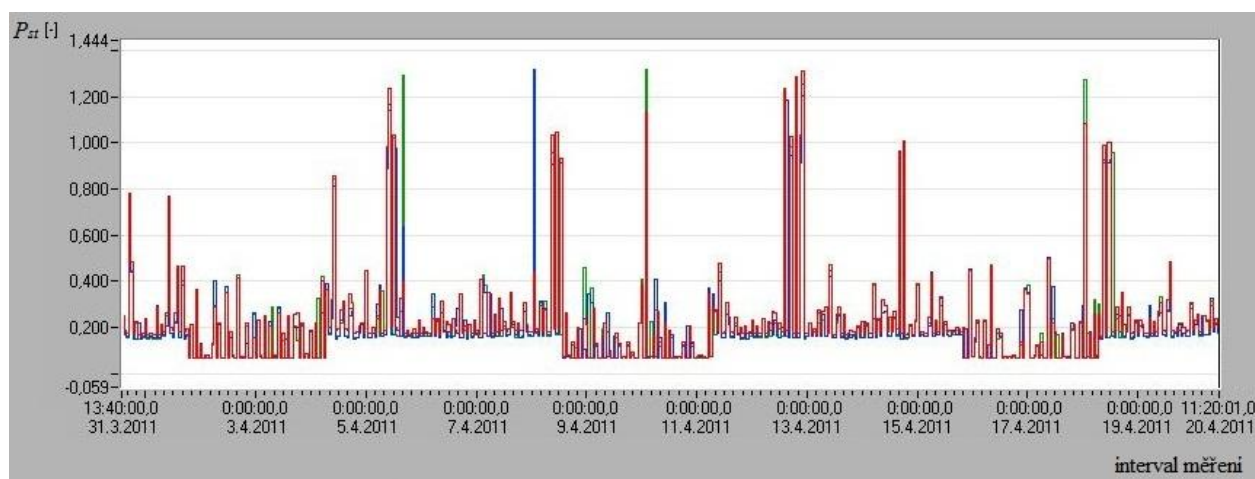


Obrázek 34 Průběh napětí tří fází

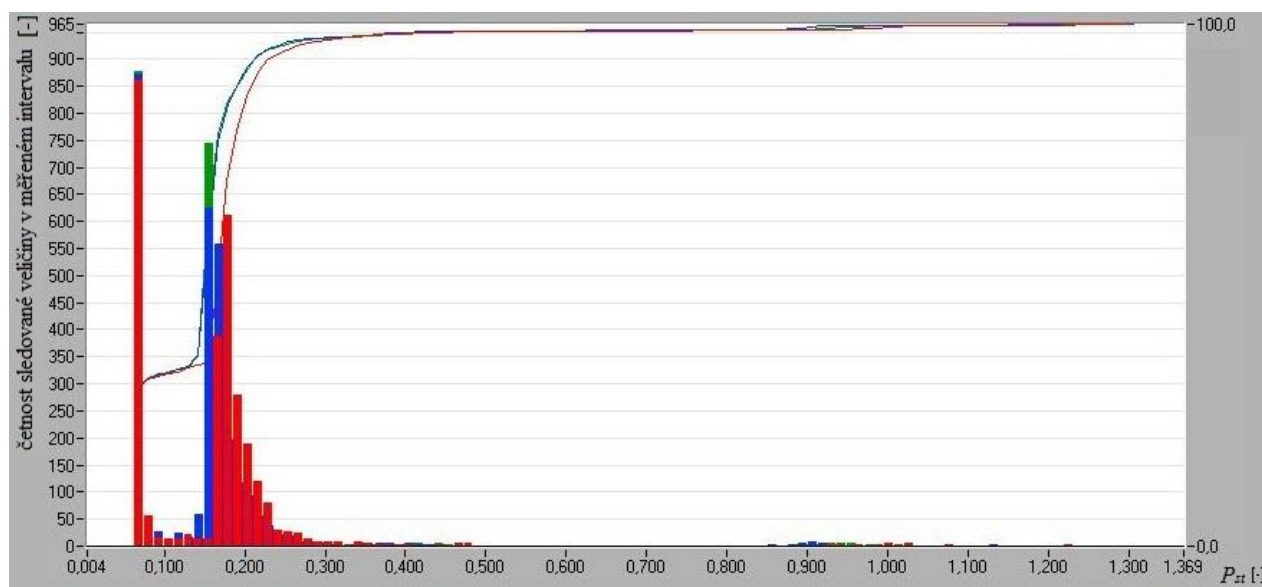


Obrázek 35 Histogram velikosti napětí tří fází

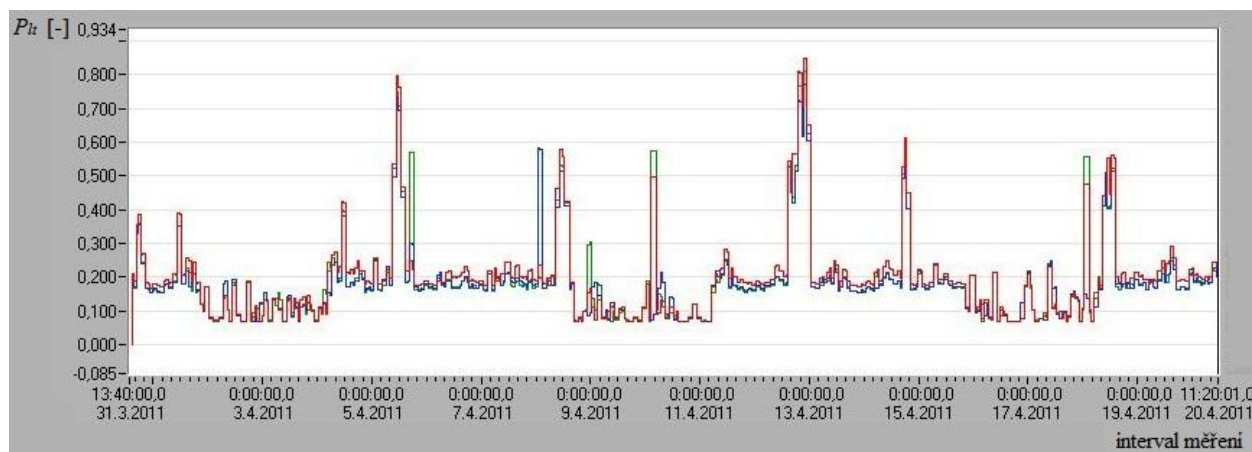
Obrázky 36, 37, 38 a 39 popisují další kvalitativní parametr zvaný flikr. Jeho vliv se posuzuje pomocí dvou charakteristik. Krátkodobá míra vjemu flikru P_{st} a dlouhodobá míra vjemu flikru P_{lt} . Dlouhodobou míru vjemu flikru tvoří dvouhodinový interval sestávající se z dvanácti hodnot krátkodobé míry vjemu flikru, která má interval deset minut. Hodnoty dlouhodobé míry vjemu flikru P_{lt} se mění každých deset minut a to při nové hodnotě krátkodobé míry vjemu flikru P_{st} .



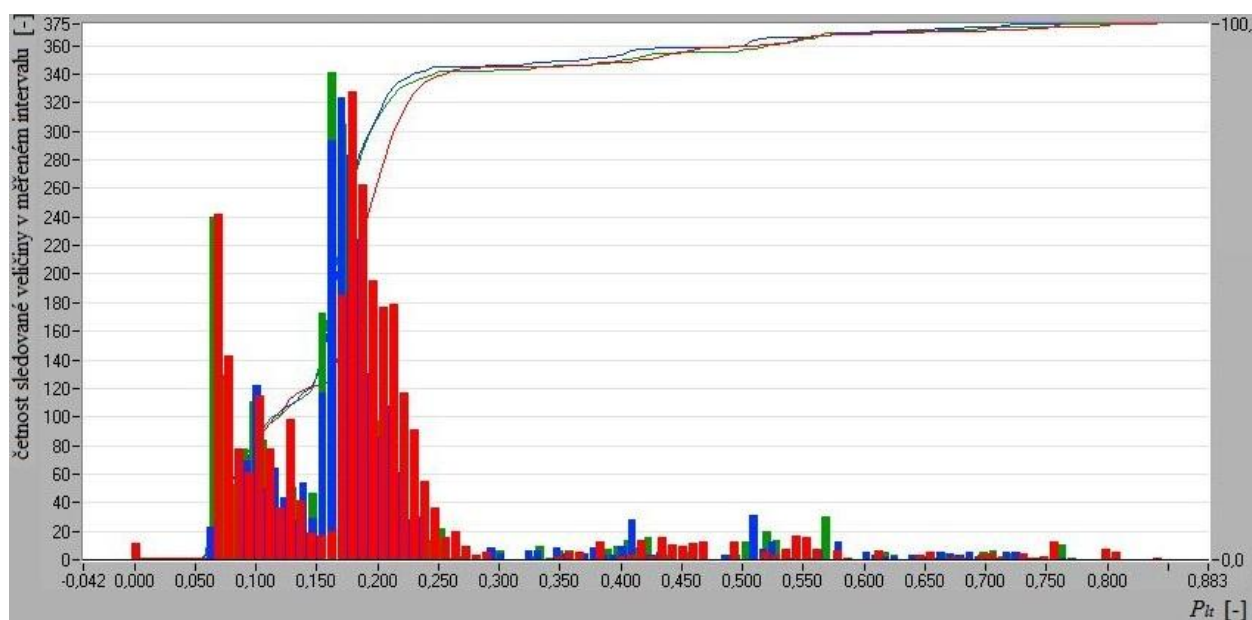
Obrázek 36 Průběh krátkodobé míry vjemu flikru



Obrázek 37 Histogram krátkodobé míry vjemu flikru



Obrázek 38 Průběh dlouhodobé míry vjemu flikru

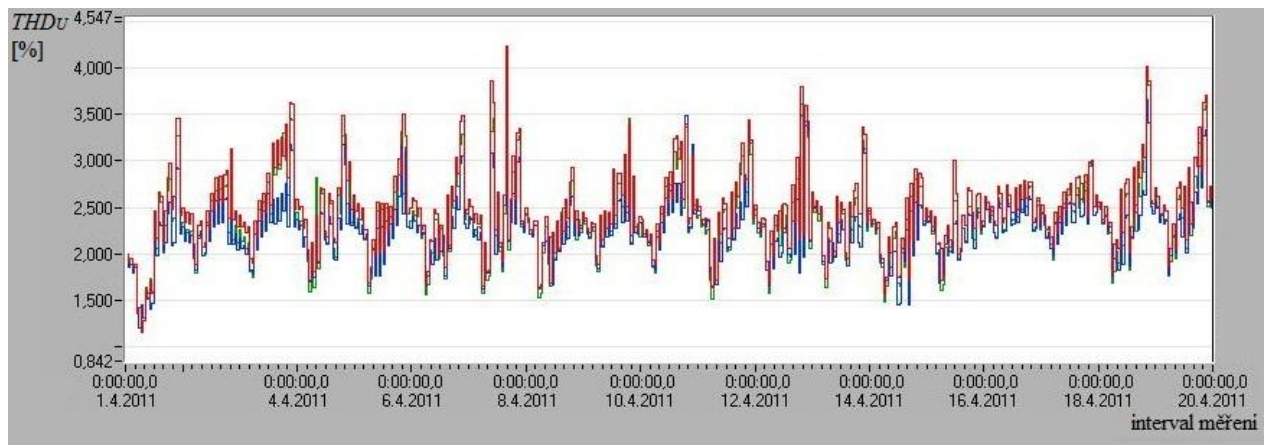
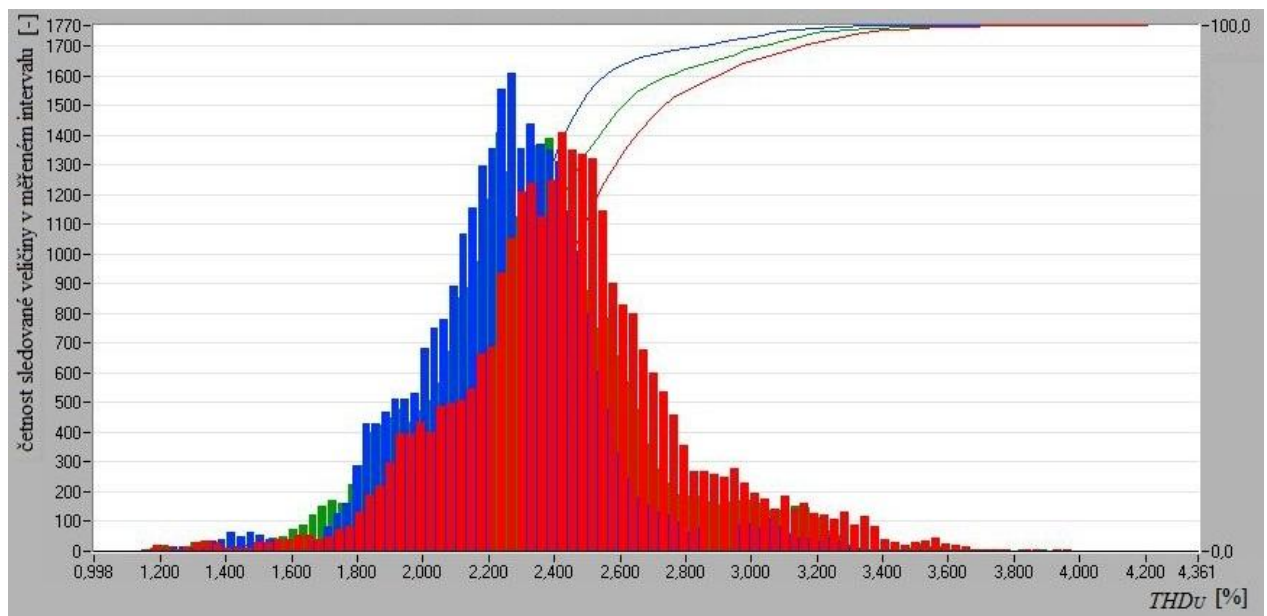


Obrázek 39 Histogram dlouhodobé míry vjemu flikru

Norma [6] limituje pouze dlouhodobou míru vjemu flikru, hodnota nesmí být vyšší než jedna. Z obrázku 38 jde vidět, že maximální hodnota dlouhodobé míry vjemu flikru je 0,84, což je v souladu s normou. Z histogramu dlouhodobé míry vjemu flikru je také patrné, že převážná většina hodnot se nachází v rozmezí 0,05 až 0,3. Z histogramu krátkodobé míry vjemu flikru je zase patrné, že většina hodnot se nachází v rozmezí 0,06 až 0,25.

Na kvalitu elektrické energie má vliv také dodržení velikosti celkového činitele zkreslení THD . Tímto parametrem je charakterizována nelinearita sinusového průběhu a dle normy [6] musí být tento parametr menší nebo roven 8 %.

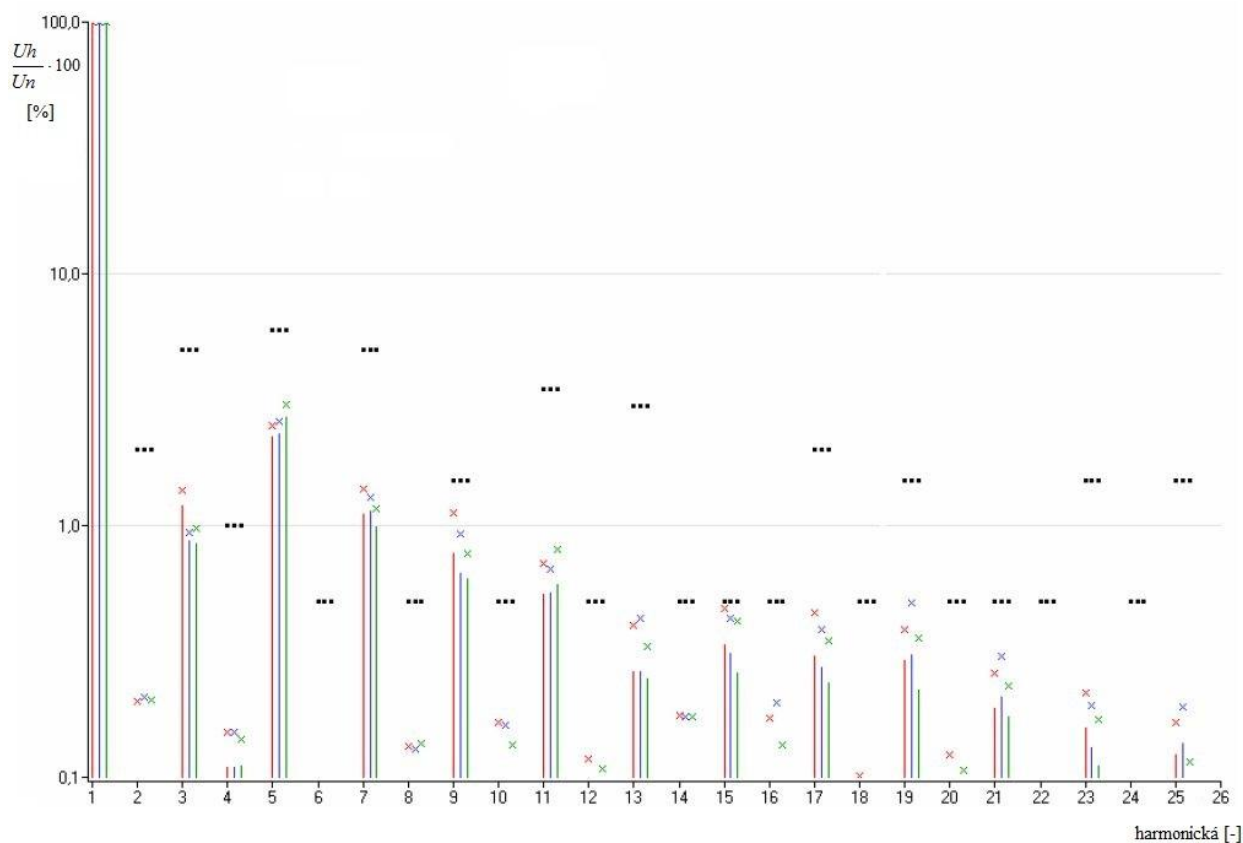
Na obrázku 40 je znázorněn průběh činitele zkreslení THD_U a na obrázku 41 je histogram činitele zkreslení THD_U . Maximální hodnoty se během celého měření pohybují na hranici 4 %, a tudíž vyhovují normě [6].

Obrázek 40 Průběh činitele zkreslení THD_U Obrázek 41 Histogram činitele zkreslení THD_U

Velikosti harmonických složek fázových napětí jsou na obrázku 42. Vodorovná osa představuje řady harmonických a svislá osa procentuální velikost napětí příslušné harmonické. První harmonická s kmitočtem 50 Hz dosahuje 100 % velikosti jmenovitého napětí, třetí harmonická dosahuje 1 % velikosti jmenovitého napětí.

Každý řád má tři sloupce, jednotlivě představují velikost harmonické pro danou fázi (červená první fáze, modrá druhá fáze, zelená třetí fáze). Jedná se o desetiminutové měření, křížky s příslušnou barvou znázorňují maximální dosažené hodnoty harmonické v dané fázi za měřené období. Černé obdélníky znázorňují v grafu limity velikostí harmonických složek dle normy [6]. Z obrázku 42 je tedy patrné, že harmonické složky všech řádů jsou v mezích normy.

Za celou dobu měření nedošlo k žádným poklesům napětí, tím jsou myšleny hodnoty nižší než 90 % jmenovitého napětí. K přerušení dodávky elektrické energie také nedošlo.



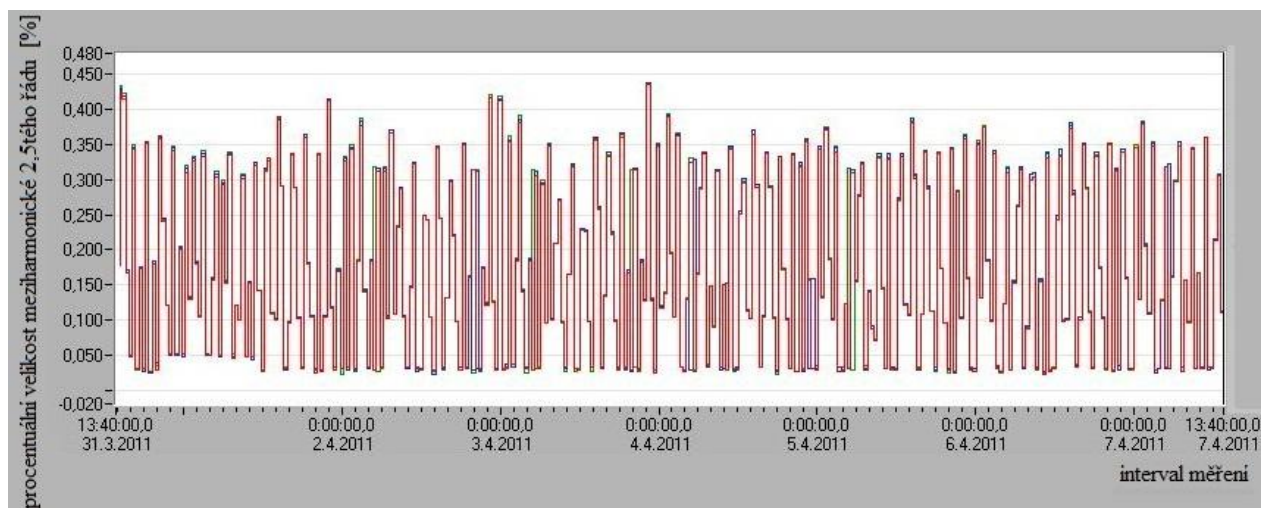
Obrázek 42 Spektrum harmonických složek napětí

Tabulka 8 Hodnoty mezipharmonických 2,5tého a 4,5tého řádu

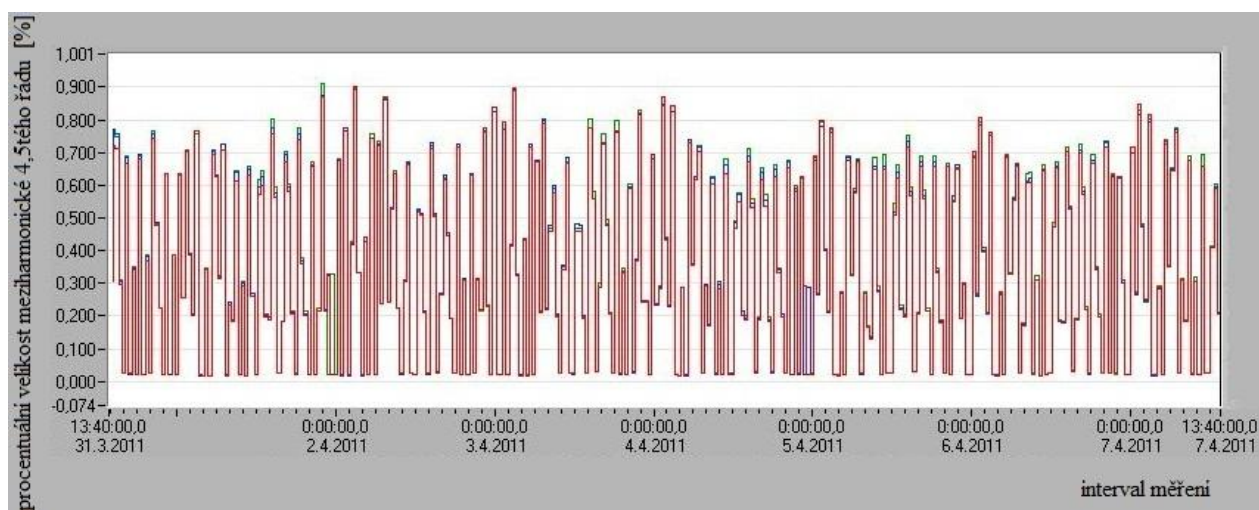
Mezipharmonické U (řád mezipharmonické)	Limit	Interval	Max L1 [%]	Max L2 [%]	Max L3 [%]
2,5	0,2 %	10 min	0,34	0,34	0,34
4,5	0,2 %	10 min	0,69	0,69	0,70

Obrázky 43 a 44 zobrazují procentuální velikost dvou mezipharmonických (2,5tého řádu a 4,5tého řádu), které překračují limit dle normy [32] v průběhu období jednoho týdne. Nejvyšších hodnot je dosahováno většinou kolem půlnoci. Způsobovat to může opakované spouštění zařízení, které se chová jako zdroj mezipharmonického rušení.

Hodnoty měření během následujících dvou týdnů nevykazovaly vůči vyhodnocenému prvnímu týdnu významné změny. Vyhodnocený týden podává dostatečné informace o celém měření a není proto nutné vyhodnocovat měření pro následující týdny. Charakteristiky se chovaly obdobně, důkazem toho jsou výše uvedené průběhy (u nichž časovou osu tvoří celková doba měření).



Obrázek 43 Hodnoty 2,5té meziharmonické během analyzovaného týdne



Obrázek 44 Hodnoty 4,5té meziharmonické během analyzovaného týdne

Tabulka 9 obsahuje naměřené harmonické složky napětí a tabulka 10 obsahuje naměřené meziharmonické složky napětí.

V tabulce 11 jsou uvedeny charakteristické hodnoty kvality napětí za jeden analyzovaný týden (31. března 2011 až 7. dubna 2011). Všechny měřené kvalitativní parametry vyhovují limitům normy ČSN EN 50160. Výjimku tvoří meziharmonické složky napětí. Jejich velikost by neměla překročit 0,2 % efektivní hodnoty první harmonické (měřené střední desetiminutové hodnoty). V normě ČSN EN 50160 se ovšem tento kvalitativní parametr neřeší.

Tabulka 9 Tabulka naměřených harmonických složek

Harmonické U -10min			L1	L2	L3	✓ Ano
U h1 (50Hz) 95%	-	10min	104.28%/0%	104.67%/0%	104.75%/0%	✓ Ano
U h2 (100Hz) 95%	<=2%	10min	0.08%/0%	0.08%/0%	0.09%/0%	✓ Ano
U h3 (150Hz) 95%	<=5%	10min	0.72%/0%	0.88%/0%	0.92%/0%	✓ Ano
U h4 (200Hz) 95%	<=1%	10min	0.11%/0%	0.11%/0%	0.11%/0%	✓ Ano
U h5 (250Hz) 95%	<=6%	10min	2.85%/0%	2.47%/0%	2.58%/0%	✓ Ano
U h6 (300Hz) 95%	<=0.5%	10min	0.03%/0%	0.03%/0%	0.03%/0%	✓ Ano
U h7 (350Hz) 95%	<=5%	10min	1.49%/0%	1.36%/0%	1.66%/0%	✓ Ano
U h8 (400Hz) 95%	<=0.5%	10min	0.03%/0%	0.02%/0%	0.03%/0%	✓ Ano
U h9 (450Hz) 95%	<=1.5%	10min	0.17%/0%	0.24%/0%	0.15%/0%	✓ Ano
U h10 (500Hz) 95%	<=0.5%	10min	0.02%/0%	0.02%/0%	0.02%/0%	✓ Ano
U h11 (550Hz) 95%	<=3.5%	10min	0.26%/0%	0.21%/0%	0.24%/0%	✓ Ano
U h12 (600Hz) 95%	<=0.5%	10min	0.01%/0%	0.01%/0%	0.01%/0%	✓ Ano
U h13 (650Hz) 95%	<=3%	10min	0.12%/0%	0.1%/0%	0.11%/0%	✓ Ano
U h14 (700Hz) 95%	<=0.5%	10min	0.01%/0%	0.01%/0%	0.01%/0%	✓ Ano
U h15 (750Hz) 95%	<=0.5%	10min	0.12%/0%	0.13%/0%	0.12%/0%	✓ Ano
U h16 (800Hz) 95%	<=0.5%	10min	0.01%/0%	0.01%/0%	0.01%/0%	✓ Ano
U h17 (850Hz) 95%	<=2%	10min	0.07%/0%	0.08%/0%	0.07%/0%	✓ Ano
U h18 (900Hz) 95%	<=0.5%	10min	0.01%/0%	0.01%/0%	0.01%/0%	✓ Ano
U h19 (950Hz) 95%	<=1.5%	10min	0.07%/0%	0.07%/0%	0.09%/0%	✓ Ano
U h20 (1000Hz) 95%	<=0.5%	10min	0.02%/0%	0.02%/0%	0.02%/0%	✓ Ano
U h21 (1050Hz) 95%	<=0.5%	10min	0.06%/0%	0.07%/0%	0.06%/0%	✓ Ano
U h22 (1100Hz) 95%	<=0.5%	10min	0.02%/0%	0.02%/0%	0.02%/0%	✓ Ano
U h23 (1150Hz) 95%	<=1.5%	10min	0.05%/0%	0.04%/0%	0.05%/0%	✓ Ano
U h24 (1200Hz) 95%	<=0.5%	10min	0.02%/0%	0.02%/0%	0.02%/0%	✓ Ano
U h25 (1250Hz) 95%	<=1.5%	10min	0.05%/0%	0.05%/0%	0.06%/0%	✓ Ano

Tabulka 10 Tabulka naměřených meziharmonických složek

InterHarm. U -10min			L1	L2	L3	✗ Ne
U ih0.5 (25Hz) 95%	<=0.5%	10min	0.12%/0%	0.12%/0%	0.12%/0%	✓ Ano
U ih1.5 (75Hz) 95%	<=0.6%	10min	0.13%/0%	0.13%/0%	0.13%/0%	✓ Ano
U ih2.5 (125Hz) 95%	<=0.2%	10min	0.34%/24.31%	0.34%/25%	0.34%/24.7%	✗ Ne
U ih3.5 (175Hz) 95%	<=0.2%	10min	0.11%/0%	0.11%/0%	0.11%/0%	✓ Ano
U ih4.5 (225Hz) 95%	<=0.2%	10min	0.69%/73.51%	0.69%/74.8%	0.7%/75%	✗ Ne
U ih5.5 (275Hz) 95%	<=0.2%	10min	0.06%/0%	0.06%/0%	0.06%/0%	✓ Ano
U ih6.5 (325Hz) 95%	<=0.2%	10min	0.04%/0%	0.04%/0%	0.04%/0%	✓ Ano
U ih7.5 (375Hz) 95%	<=0.2%	10min	0.05%/0%	0.04%/0%	0.04%/0%	✓ Ano
U ih8.5 (425Hz) 95%	<=0.2%	10min	0.13%/0%	0.12%/0%	0.13%/0%	✓ Ano
U ih9.5 (475Hz) 95%	<=0.2%	10min	0.03%/0%	0.03%/0%	0.03%/0%	✓ Ano
U ih10.5 (525Hz) 95%	<=0.2%	10min	0.06%/0%	0.06%/0%	0.06%/0%	✓ Ano
U ih11.5 (575Hz) 95%	<=0.2%	10min	0.02%/0%	0.02%/0%	0.02%/0%	✓ Ano
U ih12.5 (625Hz) 95%	<=0.2%	10min	0.03%/0%	0.04%/0%	0.03%/0%	✓ Ano
U ih13.5 (675Hz) 95%	<=0.2%	10min	0.02%/0%	0.02%/0%	0.02%/0%	✓ Ano
U ih14.5 (725Hz) 95%	<=0.2%	10min	0.02%/0%	0.02%/0%	0.02%/0%	✓ Ano
U ih15.5 (775Hz) 95%	<=0.2%	10min	0.02%/0%	0.02%/0%	0.02%/0%	✓ Ano
U ih16.5 (825Hz) 95%	<=0.2%	10min	0.02%/0%	0.02%/0%	0.02%/0%	✓ Ano
U ih17.5 (875Hz) 95%	<=0.2%	10min	0.02%/0%	0.02%/0%	0.02%/0%	✓ Ano
U ih18.5 (925Hz) 95%	<=0.2%	10min	0.02%/0%	0.02%/0%	0.02%/0%	✓ Ano
U ih19.5 (975Hz) 95%	<=0.2%	10min	0.02%/0%	0.02%/0%	0.02%/0%	✓ Ano
U ih20.5 (1025Hz) 95%	<=0.2%	10min	0.02%/0%	0.02%/0%	0.02%/0%	✓ Ano
U ih21.5 (1075Hz) 95%	<=0.2%	10min	0.02%/0%	0.02%/0%	0.02%/0%	✓ Ano
U ih22.5 (1125Hz) 95%	<=0.2%	10min	0.02%/0%	0.02%/0%	0.02%/0%	✓ Ano
U ih23.5 (1175Hz) 95%	<=0.2%	10min	0.02%/0%	0.02%/0%	0.02%/0%	✓ Ano
U ih24.5 (1225Hz) 95%	<=0.2%	10min	0.03%/0%	0.03%/0%	0.03%/0%	✓ Ano

Tabulka 11 Naměřená data za období jednoho týdne (31. března 2011 až 7. dubna 2011)

Veličina	Limit	Interval	Min/Max	Min/Max	Min/Max	Splnění
Celkově						ANO
Frekvence 50 Hz			3 ~ [Hz]			ANO
Frekvence 99,5 %	99% - 101%	10 s	49,97 / 50,08			
Frekvence 100 %	94% - 104%	10 s	49,97 / 50,11			
Napětí 230 V			L1 [V]	L2 [V]	L3 [V]	ANO
Napětí 95 %	90% - 110%	10 min	232,40/239,90	233,67/240,80	234,11/240,97	
Napětí 100 %	85% - 110%	10 min	232,40/242,24	233,67/242,68	234,11/242,79	
Flikr			L1 [%]	L2 [%]	L3 [%]	ANO
P _{LT} 95 %	<= 1	1 hod	0,39	0,35	0,39	
P _{ST} 95 %	<= 10	10 min	0,28	0,24	0,26	
Nesymetrie			3 ~ [%]			ANO
Zpětná 95 %	<= 2%	10 min	0,38			
Nulová 95 %	<= 2%	10 min	0,14			
Zpětná 95 %	<= 4%	3 s	0,47			
Nulová 95 %	<= 4%	3 s	0,21			
HDO signály			L1 [%]	L2 [%]	L3 [%]	ANO
f = 216,16 Hz 99 %	<= 9 %	3 s	2,12	2,1	2,12	
THD _U			L1 [%]	L2 [%]	L3 [%]	ANO
THD _U 95 %	<= 8 %	10 min	3,28	2,81	3,17	
THD _U 95 %	<= 16 %	3 s	3,62	3,15	3,48	
Harmonické U	Tabulka 7	10 min	L1	L2	L3	ANO
Meziharmonické U	Tabulka 7	10 min	L1	L2	L3	(NE)

6 CÍLE

1. Hlavní charakteristiky nízkého napětí.
2. Rušivé jevy ovlivňující kvalitu napájecího napětí - příčiny vzniku, šíření v síti, případně opatření vedoucí k potlačení negativních účinků na ostatní spotřebiče v síti.
3. Přístroje pro měření kvality napájecího napětí.
4. Měření a vyhodnocení parametrů kvality napětí v souladu s normou ČSN EN 50160.

7 ZÁVĚR

Cílem teoretické části práce bylo vytvoření přehledu hlavních charakteristik nízkého napájecího napětí a určení rušivých jevů. V úvodní kapitole práce jsou uvedeny důležité vstupní informace související s kvalitou elektrické energie v distribučních sítích nízkého napětí. Postupně jsou popsány problematiky týkající se elektrické energie, její výroby, dodávky a spotřeby. Následně je popsána elektrizační soustava, distribuční síť nízkého napětí a na konci kapitoly jsou vyjmenovány jednotlivé charakteristiky kvality elektrické energie.

Druhá kapitola podrobně popisuje jednotlivé hlavní charakteristiky nízkého napájecího napětí, jimiž jsou: velikost napájecího napětí, odchylky napájecího napětí, kmitočet sítě, rychlé změny napětí, poklesy napájecího napětí, přerušení napájecího napětí (krátkodobé i dlouhodobé), přepětí, nesymetrie napájecího napětí, harmonická napětí, mezipharmonická napětí a úrovně napětí signálů v napájecím napětí.

Ve třetí kapitole jsou uvedeny jednotlivé odchylky od ideálního stavu, které mají za následek případné zhoršení kvality elektrické energie. Dělí se do pěti kategorií, jimiž jsou harmonická zkreslení, přerušení dodávky, podpětí nebo přepětí, poklesy napětí nebo rázová napětí a přechodné děje. Problémy související s kvalitou elektrické energie se objevují i u výroby s nízkou technologickou náročností (nejenom u obrovských podniků), i zde tudíž může dojít ke značným finančním ztrátám. Vyřešit tyto problémy lze dobrou projektovou přípravou, využitím patřičných ochranných, filtračních a kompenzačních zařízení a náhradními zdroji.

V praktické části práce je část věnována problematice přístrojů pro měření kvality elektrické energie. Podrobně se rozebírá především analyzátor sítě BK-ELCOM ENA 500.22. Popsána je jeho technická specifikace a funkce. Na závěr kapitoly jsou uvedeny další běžně používané analyzátoři měření kvality elektrické energie.

Stěžejní část se zabývá již samotným změřením a analýzou hlavních charakteristik nízkého napájecího napětí. Měření probíhalo pomocí přístroje BK-ELCOM ENA 500.22 po dobu téměř tří týdnů (31. března 2011 až 20. dubna 2011). Interval vyhodnocení dle normy ČSN EN 50160 je jeden týden (31. března až 7. dubna 2011). Naměřená data kvalitativních parametrů (kmitočet, napětí, flickr, atd.) mají pro lepší přehlednost časovou osu pokrývající celkovou dobu měření. V tabulce 11 (*Naměřená data za období jednoho týdne 31. března 2011 až 7. dubna 2011*) jsou uvedeny výsledky měření kvalitativních parametrů a jsou srovnány s normou danými limity. Z uvedených průběhů je patrné, že charakteristiky analyzovaných parametrů jsou během celého měření stabilní, nebylo tudíž nutné uvádět charakteristiky analyzovaných parametrů během celé doby měření. Dle ČSN EN 50160 všechny kvalitativní parametry vyhovují. Při měření se nevyskytlo žádné přepětí, pokles nebo přerušení napětí. Dá se tedy říct, že to je známka tvrdé, kvalitní sítě. Z důvodu toho, že se distributoři elektrické energie řídí i *Pravidly provozování distribučních soustav (PPDS)* vycházející také z normy ČSN EN 50160, je na místě upozornit na případné rozdíly. U mezipharmonických složek napětí byla překročena dovolená hodnota PPDS vycházející z normy elektromagnetické kompatibility ČSN EN 61000-2-2. Nevyhovující hodnoty mezipharmonických složek ukazuje tabulka 10 (*Tabulka naměřených mezipharmonických složek*). Určit příčinu těchto překročení vyžaduje dobrou znalost sítě a připojených zařízení. Celkově se jedná o poměrně nízké velikosti nedosahující ani jednoho procenta efektivní hodnoty první základní harmonické.

POUŽITÁ LITERATURA

- [1] MATOUŠEK, A. *Výroba elektrické energie* [elektronický text].
- [2] BLAŽEK, V., SKALA, P. *Distribuce elektrické energie* [elektronický text].
- [3] *Energetický regulační úřad* [on line]. 2010-11-30 [cit. 2010-12-06]. Cenové rozhodnutí Energetického regulačního úřadu č. 5/2010 ze dne 30. listopadu 2010, kterým se stanovují ceny regulovaných služeb souvisejících s dodávkou elektřiny odběratelům ze sítí nízkého napětí. Dostupné z WWW:
http://eru.cz/user_data/files/cenova%20rozhodnuti/CR%20elektro/ER%20CR%205_2010.pdf.
- [4] *PREdistribuce, a.s.* [on line]. 2010 [cit. 2010-12-06]. Distribuční síť. Dostupné z WWW:
<http://www.predistribuce.cz/distribuce/distribucni-sit.html>.
- [5] *E - ON* [on line]. 2010 [cit. 2010-12-06]. Slovník pojmů. Dostupné z WWW:
http://www.eon.cz/cs/info/terms_dictionary.shtml.
- [6] ČSN EN 50160. *Charakteristiky napětí elektrické energie dodávané z veřejné distribuční sítě*.
- [7] ČSN EN 33 0122. Pokyn na používání evropské normy EN 50160.
- [8] ČSN EN 61000-4-30. *Elektromagnetická kompatibilita (EMC) – Část 4-30: Zkušební a měřicí technika – Metody měření kvality energie*.
- [9] HALLIDAY, D., RESNICK, R., WALKER, J. *Fyzika 2. Mechanika - Termodynamika: vysokoškolská učebnice obecné fyziky; 2. díl, Mechanika – Termodynamika*. D. Halliday, R. Resnick, J. Walker; [Odp. red. P. Dub, J. Obdržálek; přeložila M. Bartlová; z angl. orig. přeložil P. Chvosta, A. Havránek, V. Holý, K. Houfek; z angl. přeložil J. Obdržálek]. Vyd.1. Brno: Vutium, 2001. s. 330-576. (Překlady vysokoškolských učebnic). ISBN 80-14-1868-0.
- [10] PRAVIDLA PROVOZOVÁNÍ DISTRIBUČNÍCH SOUSTAV [elektronický text].
- [11] KVALITA ELEKTRICKÉ ENERGIE – PRŮVODCE, ÚVOD: D. CHAPMAN, COPPER DEVELOPMENT ASSOCIATION, VELKÁ BRITÁNIE. PŘEKLAD: J.GAVLAS, M.KUŽELA, P.SANTARIUS, FEI TECHNICKÁ UNIVERZITA OSTRAVA BŘEZEN 2001 [elektronický text].
- [12] ČEPS, a. s. [on line]. 2010-11-11 [cit. 2010-12-06]. Provoz a řízení. Dostupné z WWW:
<http://ceps.cz/detail.asp?cepsmenu=3&IDP=284&PDM2=34&PDM3=0&PDM4=0>.
- [13] KVALITA ELEKTRICKÉ ENERGIE – PRŮVODCE, PORUCHY NAPĚTÍ, FLIKR: D. CHAPMAN, COPPER DEVELOPMENT ASSOCIATION, VELKÁ BRITÁNIE. PŘEKLAD: J.GAVLAS, M.KUŽELA, P.SANTARIUS, FEI TECHNICKÁ UNIVERZITA OSTRAVA BŘEZEN 2001 [elektronický text].
- [14] KVALITA ELEKTRICKÉ ENERGIE – PRŮVODCE, PORUCHY NAPĚTÍ, MĚŘENÍ FLIKRU: D. CHAPMAN, COPPER DEVELOPMENT ASSOCIATION, VELKÁ BRITÁNIE. PŘEKLAD: J.GAVLAS, M.KUŽELA, P.SANTARIUS, FEI TECHNICKÁ UNIVERZITA OSTRAVA BŘEZEN 2001 [elektronický text].
- [15] PRAVIDLA PROVOZOVÁNÍ DISTRIBUČNÍCH SOUSTAV, PŘÍLOHA 3 [elektronický text].
- [16] LUKEŠ, Pavel. *ODBORNÉ ČASOPISY* [on line]. 2008-1 [cit. 2010-12-06]. Poklesy napětí v síti nn a spolehlivost výpočetní a řídicí techniky . Dostupné z WWW:
http://www.odbornecasopisy.cz/index.php?id_document=36539.

- [17] ORSÁGOVÁ, Jaroslava. *Analýza atmosférických přepětí v distribuční síti s vloženými úseky kabelů*. Brno : Vutium, 2009. 32 s. ISBN 978-80-214-3977-1, ISSN 1213-418X.
- [18] KVALITA ELEKTRICKÉ ENERGIE – PRŮVODCE, RUŠENÍ NAPĚTÍ, ÚVOD DO NESYMETRIE: D. CHAPMAN, COPPER DEVELOPMENT ASSOCIATION, VELKÁ BRITÁNIE. PŘEKLAD: J.GAVLAS, M.KUŽELA, P.SANTARIUS, FEI TECHNICKÁ UNIVERZITA OSTRAVA BŘEZEN 2001 [elektronický text].
- [19] KVALITA ELEKTRICKÉ ENERGIE – PRŮVODCE, HARMONICKÉ, PŘÍČINY A ÚČINKY: D. CHAPMAN, COPPER DEVELOPMENT ASSOCIATION, VELKÁ BRITÁNIE. PŘEKLAD: J.GAVLAS, M.KUŽELA, P.SANTARIUS, FEI TECHNICKÁ UNIVERZITA OSTRAVA BŘEZEN 2001 [elektronický text].
- [20] KVALITA ELEKTRICKÉ ENERGIE – PRŮVODCE, NÁKLADY, NÁKLADY VYVOLANÉ ŠPATNOU KVALITOU ELEKTRICKÉ ENERGIE: D. CHAPMAN, COPPER DEVELOPMENT ASSOCIATION, VELKÁ BRITÁNIE. PŘEKLAD: J.GAVLAS, M.KUŽELA, P.SANTARIUS, FEI TECHNICKÁ UNIVERZITA OSTRAVA BŘEZEN 2001 [elektronický text].
- [21] ORSÁGOVÁ, J. *Rozvodná zařízení* [elektronický text].
- [22] VESELKA, František. *ODBORNÉ ČASOPISY* [on line]. 2007-10 [cit. 2010-12-06]. UPS - nepřetržitá dodávka elektrické energie s asynchronním kroužkovým generátorem. Dostupné z WWW: http://www.odbornecasopisy.cz/index.php?id_document=34764.
- [23] KVALITA ELEKTRICKÉ ENERGIE – PRŮVODCE, POKLESY NAPĚTÍ, ZMÍRNĚNÍ POKLESŮ NAPĚTÍ: D.MAULE, CLAUDE LYONS LTD., ANGLIE. PŘEKLAD: J.GAVLAS, M.KUŽELA, P.SANTARIUS, FEI TECHNICKÁ UNIVERZITA OSTRAVA ČERVEN 2003 [elektronický text].
- [24] UŽIVATELSKÝ MANUÁL BK - ELCOM - KOMPLEXNÍ SYSTÉM MONITORINGU A ANALÝZY KVALITY ELEKTRINY - BK NODE FIRMWARE ANALYZÁTORU. ČERVENEC 2009 [elektronický text].
- [25] VOJÁČEK, Antonín. *AUTOMATIZACE* [on line]. 2007-29-10 [cit. 2011-03-25]. Co je, k čemu je a jak funguje Rogoského cívka. Dostupné z WWW: <http://automatizace.hw.cz/co-je-k-cemu-je-jak-funguje-rogowskeho-civka>.
- [26] UŽIVATELSKÝ MANUÁL BK - ELCOM - KOMPLEXNÍ SYSTÉM MONITORINGU A ANALÝZY KVALITY ELEKTRINY - BK MEASURE MĚŘENÍ. SRPEN 2008 [elektronický text].
- [27] UŽIVATELSKÝ MANUÁL BK - ELCOM - KOMPLEXNÍ SYSTÉM MONITORINGU A ANALÝZY KVALITY ELEKTRINY - BK REPORT ANALÝZA NAMĚŘENÝCH DAT. ČERVENEC 2009 [elektronický text].
- [28] *MEgA měřicí energetické aparáty* [on line]. 2010 [cit. 2011-03-25]. Univerzální monitor MEg40. Dostupné z WWW: <http://www.e-mega.cz/meg-40>.
- [29] *MEgA měřicí energetické aparáty* [on line]. 2008 [cit. 2011-03-25]. PQ monitor MEg35/G. Dostupné z WWW: <http://www.e-mega.cz/meg-35g>.
- [30] *MEgA měřicí energetické aparáty* [on line]. 2010 [cit. 2011-03-25]. Přenosný PQ monitor MEg30. Dostupné z WWW: <http://www.e-mega.cz/meg-30>.
- [31] *EGÚ* [on line]. 2011 [cit. 2011-03-25]. Výrobní program - měření. Dostupné z WWW: http://www.egu.cz/Egu_cb/vyroba_m.html.
- [32] ČSN EN 61000-2-2. *Elektromagnetická kompatibilita (EMC) – Část 2-2: Kompatibilní úroveň pro nízkofrekvenční rušení šířené vedením a signály ve veřejných sítích nn*.