



VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V BRNĚ

BRNO UNIVERSITY OF TECHNOLOGY

**FAKULTA ELEKTROTECHNIKY
A KOMUNIKAČNÍCH TECHNOLOGIÍ**

FACULTY OF ELECTRICAL ENGINEERING AND COMMUNICATION

ÚSTAV ELEKTROENERGETIKY

DEPARTMENT OF ELECTRICAL POWER ENGINEERING

**VYHODNOCENÍ A POROVNÁNÍ ZMĚN
KVALITY ELEKTRICKÉ ENERGIE
Z VÍCE MĚŘENÝCH BODŮ**

EVALUATION AND COMPARISON OF POWER QUALITY CHANGES FROM
MULTIPLE MEASURED POINTS

DIPLOMOVÁ PRÁCE

MASTER'S THESIS

AUTOR PRÁCE

AUTHOR

Bc. Marek Košťálik

VEDOUCÍ PRÁCE

SUPERVISOR

Ing. Martin Paar, Ph.D.

BRNO 2017

Diplomová práce

magisterský navazující studijní obor **Elektroenergetika**

Ústav elektroenergetiky

Student: Bc. Marek Košťálik **ID:** 154774
Ročník: 2 **Akademický rok:** 2016/2017

NÁZEV TÉMATU:

Vyhodnocení a porovnání změn kvality elektrické energie z více měřených bodů

POKYNY PRO VYPRACOVÁNÍ:

1. Kvalita elektrické energie a jej vyhodnocování
2. Způsob analýzy vyšších harmonických
3. Automatické vyhodnocení jednoho měřeného bodu z pohledu vyšších harmonických
4. Automatické vyhodnocení změn kvality v čase, vyhodnocení periodicity jevů
5. Automatické porovnání více měřících míst a vyhodnocení synchronnosti jevů

DOPORUČENÁ LITERATURA:

podle pokynů vedoucího práce

Termín zadání: 6.2.2017 **Termín odevzdání:** 22.5.2017

Vedoucí práce: Ing. Martin Paar, Ph.D.
Konzultant:

doc. Ing. Petr Toman, Ph.D.
předseda oborové rady

UPOZORNĚNÍ:

Autor diplomové práce nesmí při vytváření diplomové 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:

KOŠTIALIK, M. *Vyhodnocení a porovnání změn kvality elektrické energie z více měřených bodů*. Brno: Vysoké učení technické v Brně, Fakulta elektrotechniky a komunikačních technologií, 2017. 63 s. Vedoucí diplomové práce Ing. Martin Paar, Ph.D..

„Prohlašuji, že svou diplomovou práci na téma *Vyhodnocení a porovnání změn kvality elektrické energie z více měřených bodů* jsem vypracoval samostatně pod vedením vedoucího diplomové práce a s použitím odborné literatury a dalších informačních zdrojů, které jsou všechny citovány v práci a uvedeny v seznamu literatury na konci práce.

Jako autor uvedené diplomové práce dále prohlašuji, že v souvislosti s vytvořením této diplomové práce jsem neporušil autorská práva třetích osob, zejména jsem nezasáhl nedovoleným způsobem do cizích autorských práv osobnostních a jsem si 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.“

V Brně dne: 22.05.2017

.....

Podakovanie:

Chcel by som poďakovať vedúcemu diplomovej práce pánovi Ing. Martin Paar, Ph.D. za odborné rady, Ing. Michalovi Makasovi za výpomoc pri programovaní a v neposlednom rade celej rodine za podporu počas celého štúdia.

ABSTRAKT

Táto diplomová práca sa zaoberá popisom kvality elektrickej energie na nízkom napätí. V práci je vytvorený testovací model dát, ktorý dokáže automaticky vyhodnotiť stav kvality elektrickej energie z pohľadu vyšších harmonických napätí v programátorskom prostredí MATLAB. Pre overenie správneho návrhu daného modelu sú vytvorené dva možné prehľady simulovaných dát a to formou tabuliek a grafických závislostí. Pre komplexnejšie ovládanie jednotlivých modelových stavov uvažovaných dát je vytvorené užívateľské rozhranie.

KLÍČOVÁ SLOVA: ČSN EN 50 160 ed.3, harmonické napätia, kvalita napätia, nelineárne spotrebiče, vzorky, testovací model

ABSTRACT

This diploma thesis deal with the description of electrical energy quality in low voltage. A test data model is created in the thesis which can automatically evaluate the state of the quality of electric energy in terms of higher harmonic voltages in the MATLAB programming environment. To verify the correct design of the model, two possible views of simulated data are created in the form of tables and graphical dependencies. An user interface is created for more complex control of each model states of the data being considered.

KEY WORDS: ČSN EN 50 160 ed.3, harmonic voltages, power quality, nonlinear appliances, samples, test model

OBSAH

ZOZNAM OBRÁZKOV.....	9
ZOZNAM TABULIEK.....	10
ZOZNAM VELIČÍN.....	12
ZOZNAM SKRATIEK.....	13
1 ÚVOD.....	14
2 ÚVOD DO KVALITY ELEKTRICKEJ ENERGIE = KVALITA NAPÄTIA	15
2.1 CHARAKTERISTIKY NAPÄTIA V DS.....	15
3 CHARAKTERISTIKY DODÁVKY ELEKTRICKEJ ENERGIE NÍZKYM NAPÄTÍM	17
3.1 FREKVENCIA NAPÁJACEJ SIETE.....	18
3.2 ODCHÝLKA NAPÁJACIEHO NAPÄTIA.....	18
3.3 RÝCHLE ZMENY NAPÄTIA.....	19
3.4 NESYMETRIA NAPÁJACIEHO NAPÄTIA	19
3.5 HARMONICKÉ NAPÄTIA	20
3.6 MEDZIHARMONICKÉ NAPÄTIA	20
3.7 ÚROVNE NAPÄTIA SIGNÁLOV V NAPÁJACOM NAPÄTÍ.....	20
3.8 PRERUŠENIE NAPÁJACIEHO NAPÄTIA	21
3.9 POKLESY/DOČASNÉ ZVÝŠENIE NAPÄTIA NAPÁJACIEHO NAPÄTIA	21
4 KVALITA NAPÄTIA V DS	22
4.1 MONITORING KVALITY NAPÄTIA	23
4.1.1 MONITORING NN SIETÍ	23
4.1.2 VŠEOBECNE O MERANÍ V DTS	26
4.2 ORGANIZÁCIA MERANIA ELEKTRICKÝCH VELIČÍN	26
4.2.1 ČASOVÉ INTERVALY MERANIA, HODNOTENIA A AGREGÁCIE	27
5 HARMONICKÉ FREKVENČNÉ ZLOŽKY	28
5.1 PÔVOD HARMONICKÝCH ZLOŽIEK	28
5.1.1 SPOTREBIČE ODOBERAJÚCE NEHARMONICKÝ PRÚD.....	29
5.1.2 ZDROJE ELEKTRICKEJ ENERGIE GENERUJÚCE NEHARMONICKÉ NAPÄTIA	29
5.2 DÔSLEDKY HARMONICKÝCH ZLOŽIEK.....	29
5.3 ŠÍRENIE HARMONICKÝCH ZLOŽIEK.....	30
5.4 OBMEDZOVANIE HARMONICKÝCH ZLOŽIEK	31
5.4.1 ÚROVEŇ NN	31
5.4.2 ÚROVEŇ VN	31
5.4.3 ÚROVEŇ VVN.....	32
5.5 MEDZIHARMONICKÉ ZLOŽKY	33
6 HARMONICKÉ NAPÄTIA.....	33
6.1 HARMONICKÉ SKRESLENIE NAPÄTIA	34
6.2 DEFORMÁCIA NAPÁJACIEHO NAPÄTIA	35
7 ANALÝZY VYŠŠÍCH HARMONICKÝCH A MEDZIHARMONICKÝCH.....	36

7.1 FOURIEROVA TRANSFORMÁCIA	36
7.1.1 ANALYTICKÉ VYJADRENIE FOURIEROVEJ TRANSFORMÁCIE	36
7.2 ODBER NELINEÁRNYCH SPOTREBIČOV.....	38
7.3 VPLYV ODBERU NA CHARAKTERISTIKY NAPÁJACIEHO NAPÄTIA	40
8 ZHRNUTIE DOPADU NELINEÁRNYCH SPOTREBIČOV NA SIEŤ NN	42
9 TVORBA TESTOVACIEHO MODELU DÁT	44
9.1 REALIZÁCIA MODELU PRE AUTOMATICKÉ VYHODNOTENIE A POROVNANIE DÁT V MATLABE	44
9.1.1 VSTUPNÉ PREDPOKLADY PRE ANALÝZU DÁT	44
9.1.2 GRAFICKÉ ZÁVISLOSTI MODELOVANÝCH VZORIEK V ČASE	45
9.1.3 TYPY DÁT VYTVORENÝCH PRI TESTOVANÍ NÁVRHU DANÉHO MODELU	46
9.1.4 TYPY GRAFOV VYTVORENÝCH PRI TESTOVANÍ NÁVRHU DANÉHO MODELU	48
9.2 TYPY TABULIEK VYTVORENÝCH PRI TESTOVANÍ NÁVRHU DANÉHO MODELU.....	54
10 ZÁVER.....	59
10.1 NÁVRH ĎALŠIEHO RIEŠENIA	60
POUŽITÁ LITERATÚRA	61

ZOZNAM OBRÁZKOV

<i>Obr. 3-1</i>	<i>Prehľad vyskytujúcich sa zložiek vo frekvenčnej oblasti [11]</i>	18
<i>Obr. 3-2</i>	<i>Ilustračný priebeh rýchlej zmeny napätia pri spúšťaní motora (upravená z [15])</i>	19
<i>Obr. 3-3</i>	<i>Úrovně napätia v závislosti na kmitočtoch signálov v % U_n vo verejných distribučných sieťach NN [15]</i>	21
<i>Obr. 4-1</i>	<i>Uvažované komunikačné technológie (VN/NN) rozdelené pre prístupovú a transportnú časť Smart Grid [23]</i>	25
<i>Obr. 4-2</i>	<i>Merací reťazec pre siete VN [7]</i>	27
<i>Obr. 5-1</i>	<i>V-A charakteristika nelineárnej záťaže (upravené z [3])</i>	29
<i>Obr. 5-2</i>	<i>Náhradný obvod pre nelineárnu záťaž [3]</i>	30
<i>Obr. 5-3</i>	<i>Vybrané normy EMC (znázornené zeleno) Nf rušenia vo verejnej sieti</i>	31
<i>Obr. 5-4</i>	<i>Norma EMC (znázornená zeleno) pre Nf rušenie v priemyselnej sieti</i>	32
<i>Obr. 6-1</i>	<i>Deformácia krivky napájacieho napätia v PCC [19]</i>	34
<i>Obr. 7-1</i>	<i>Špeciálne typy periodických funkcií a) párna, b) nepárna, c) antiperiodická [3]</i>	37
<i>Obr. 9-1</i>	<i>Oscilovanie vzoriek v čase vytvorených na základe dát v textovom súbore</i>	47
<i>Obr. 9-2</i>	<i>Dominantný zdroj harmonického napätia po dobu 8 hodín medzi 8:00 – 16:00 vytvorený náhodne generovanými dátami</i>	47
<i>Obr. 9-3</i>	<i>Bodový graf - oscilovanie modelovaných vzoriek v čase z dát v textovom súbore</i>	48
<i>Obr. 9-4</i>	<i>Krabicový graf - vytvorený z hodinových intervalov v čase</i>	48
<i>Obr. 9-5</i>	<i>Konkrétna vizualizácia v priebehu daného dňa vytvoreného náhodne generovanými dátami – krabicový graf</i>	49
<i>Obr. 9-6</i>	<i>Konkrétna vizualizácia v priebehu daného dňa vytvoreného náhodne generovanými dátami – bodový graf</i>	50
<i>Obr. 9-7</i>	<i>Dodržanie kvality napätia – náhodne vygenerované dáta znázornené prostredníctvom krabicového grafu</i>	50
<i>Obr. 9-8</i>	<i>Dodržanie kvality napätia – náhodne vygenerované dáta znázornené prostredníctvom bodového grafu</i>	51
<i>Obr. 9-9</i>	<i>Priemerné znázornenie v rámci celého týždňa - náhodne vygenerované dáta</i>	51
<i>Obr. 9-10</i>	<i>Užívateľské rozhranie vytvorené v GUI</i>	53

ZOZNAM TABULIEK

<i>Tab. 2-1 Základný prehľad priradenia charakteristík k hladinám napätia [17][6]</i>	<i>17</i>
<i>Tab. 3-1 Úrovne jednotlivých harmonických napätí v odovzdávacom mieste v % [6]</i>	<i>20</i>
<i>Tab. 3-2 Klasifikácia poklesov napätia podľa zbytkového napätia a doby trvania [6]</i>	<i>21</i>
<i>Tab. 3-3 Klasifikácia prechodných zvýšení napätia podľa maximálneho napätia a doby trvania [6]</i>	<i>22</i>
<i>Tab. 4-1 Monitorovanie charakteristík napätia [17]</i>	<i>22</i>
<i>Tab. 4-2 Prehľadová tabuľka typov merania v DTS [24]</i>	<i>26</i>
<i>Tab. 5-1 Problémy spôsobené harmonickými zložkami napätia a prúdu [3]</i>	<i>30</i>
<i>Tab. 5-2 Typy medziharmonických zložiek (upravené z [3]).....</i>	<i>33</i>
<i>Tab. 7-1 Zhrnutie vzťahov pre výpočet veľkosti a fáze jednotlivých harmonických zložiek pre napätie a prúd [3]</i>	<i>39</i>
<i>Tab. 9-1 Zhrnutie parametrov pre model v MATLABE.....</i>	<i>44</i>
<i>Tab. 9-2 Úrovne jednotlivých nepárnych harmonických v odovzdávajúcom mieste v %</i>	<i>45</i>
<i>Tab. 9-3 Úrovne jednotlivých párnych harmonických v odovzdávajúcom mieste v %.....</i>	<i>45</i>
<i>Tab. 9-4 Názvy premenných jednotlivých dní uvažovaných pri overovaní návrhu daného modelu</i>	<i>47</i>
<i>Tab. 9-5 Typy možných kombinácií pre jednu hodinu.....</i>	<i>49</i>
<i>Tab. 9-6 Výpis vzoriek percentuálnych prekročení</i>	<i>52</i>
<i>Tab. 9-7 Predmetné názvy súborov vytvorených v MATLABE</i>	<i>52</i>
<i>Tab. 9-8 Jednotlivé kombinácie dní v počte 49 pre uvažovaný bod M1.....</i>	<i>55</i>
<i>Tab. 9-9 Jednotlivé kombinácie dní v počte 49 pre uvažovaný bod M2.....</i>	<i>55</i>
<i>Tab. 9-10 Jednotlivé kombinácie dní v počte 49 pre uvažované body M1,M2</i>	<i>55</i>
<i>Tab. 9-11 Jednotlivé kombinácie dní v počte 49 pre uvažované body M1,M2</i>	<i>56</i>
<i>Tab. 9-12 Jednotlivé kombinácie dní v počte 42 pre uvažované body M1,M2</i>	<i>56</i>
<i>Tab. 9-13 Jednotlivé kombinácie dní v počte 7 pre uvažované body M1,M2</i>	<i>56</i>
<i>Tab. 9-14 Zobrazenie jedného typu kombinácie celkového výpisu dát pre uvažovaný bod M1 – ilustračný pohľad (A.)</i>	<i>56</i>
<i>Tab. 9-15 Zobrazenie jedného typu kombinácie celkového výpisu dát pre uvažovaný bod M1 – reálny pohľad (A.)</i>	<i>57</i>
<i>Tab. 9-16 Zobrazenie jedného typu kombinácie rovnakých dát pre uvažovaný bod M1 – ilustračný pohľad (B.)</i>	<i>57</i>
<i>Tab. 9-17 Zobrazenie jedného typu kombinácie rovnakých dát pre uvažovaný bod M1 – reálny pohľad (B.)</i>	<i>57</i>
<i>Tab. 9-18 Zobrazenie jedného typu kombinácie prekročených dát (v percentách oproti norme) pre uvažovaný bod M1 – ilustračný pohľad (C.).....</i>	<i>57</i>

<i>Tab. 9-19 Zobrazenie jedného typu kombinácie prekročených dát (v percentách oproti norme) pre uvažovaný bod M1 – reálny pohľad (C.).....</i>	<i>58</i>
<i>Tab. 9-20 Prehľad názvov výsledných tabuliek v MATLABE</i>	<i>58</i>
<i>Tab. 9-21 Zmena dát pre testovanie inej veľkosti harmonickej zložky napätia</i>	<i>58</i>

ZOZNAM VELIČÍN

Fyzikálne veličiny	Popis	Jednotka
f	frekvencia	[Hz]
I_1	prúd na základnej harmonickej	[A]
i_{1-7}	okamžité prúdy vyšších harmonických	[A]
I_n	násobky prúdu základnej harmonickej ($n=2,3,4\dots$)	[A]
t	čas	[s]
THD_U	celkové harmonické skreslenie napätia	[%]
t_i	doba trvania prerušenia distribúcie	[s]
U_1	napätie na základnej harmonickej	[V]
U_c	dohodnuté napätie v zmluve o pripojení	[V]
U_m	amplitúda napätia	[V]
U_n	násobky napätia základnej harmonickej ($n=2,3,4\dots$)	[V]
U_n	nominálna hodnota napätia	[V]
U_{rms}	efektívna hodnota napätia	[V]
Z_L	impedancia záťaže	[Ω]
Z_s	impedancia siete	[Ω]
Z_z	impedancia zdroja	[Ω]
Δt	časová zmena	[s]
ω	uhlová frekvencia	[rad·s ⁻¹]

ZOZNAM SKRATIEK

Skratky	Popis
atď.	a tak ďalej
DFT	Diskrétna Fourierova Transformácia
DS	Distribučná Sústava/Sieť
DTS	Distribučné Transformačné Stanice
FFT	Rýchla Fourierova Transformácia
GSM	Global Systems for Mobile Communications
Nf	Nízkofrekvenčné
NN	Nízke Napätie
PDS	Prevádzkovateľ Distribučnej Siete
PLC	Power-line Communication
PPDS	Pravidlá Prevádzkovania Distribučnej Sústavy
PQ	Power Quality (kvalita napätia)
PS	Prenosová Sústava
SCADA	Supervisory Control And Data Acquisition
tzv.	takzvaná/é
VN	Vysoké Napätie
VVN	Veľmi Vysoké Napätie

1 ÚVOD

Elektroenergetický systém obsahuje rozsiahly súbor zariadení výroby, prenosu, distribúcie a užitie elektrickej energie, ktoré musia vyhovovať veľmi vysokým nárokom na kvalitu riadenia, bezpečnosť a spoľahlivosť prevádzky a vhodne eliminovať prípadné nepriaznivé sprievodné javy. Keďže v dnešnej dynamicky rozvíjajúcej sa dobe, kde dochádza k trvalým trendom zvyšovania spotreby elektrickej energie, ochrane životného prostredia, voľného trhu s elektrinou a pripojovania zariadení s citlivou elektronikou do elektrických sietí naberá na dôležitosť zaistenie dostatočnej kvality elektrickej energie. S kvalitou elektrickej energie úzko súvisí elektromagnetická kompatibilita, ktorá je ukazateľom súčinnosti zdroja, siete a spotrebičov v danej elektrizačnej sústave. Spolu tvoria elektromagnetické prostredie, v ktorom sa navzájom ovplyvňujú.

Kvalita elektrickej energie začala byť posudzovaná až z jej distribúciou. Pretože sa elektrická energia stala obchodovaným produktom, bolo nutné zadať určité medze a limity, ktoré budú hodnotiť jej kvalitu. Kvalita je charakteristika elektrickej energie v danom bode elektrickej siete vyhodnotená vzhľadom k súboru referenčných technických parametrov a nie je závislá iba na kvalite výroby, ale takisto aj akosti prenosu a na kvalite odberu.

V zmluve, ktorá definuje vzťah medzi dodávateľom a odberateľom elektrickej energie sa jednoznačne stanovuje z pohľadu dodávateľa zabezpečenie dostatočnej kvality elektrickej energie = kvality napätia pre odberateľa.

Hlavné charakteristiky napätia elektrickej energie v mieste pripojenia užívateľov z verejných distribučných sietí nízkeho, vysokého a veľmi vysokého napätia pre normálne prevádzkové stavy sú popisované európskou normou ČSN EN 50 160 ed.3. Pre určitých koncových odberateľov ale nemusí byť zabezpečená dostatočná úroveň kvality napätia podľa tejto normy a preto dochádza k definovaniu samostatných dohôd medzi dodávateľom a odberateľom.

Samotné meranie a vyhodnotenie charakteristík napätia definuje európska norma ČSN EN 61000-4-30 ed.3, ktorá stanovuje požiadavky na meraciu techniku a definuje presné algoritmy, postupy a metodiku vyhodnocovania. Taktiež definuje triedy meracích prístrojov v ohľade na presnosť a dôležitosť merania. Úroveň monitorovania a dodržiavania limitov na jednotlivých napäťových hladinách je odlišná [1][2][3].

Elektrické zariadenia rôzneho typu prenikli do všetkých oblastí ľudského života. Vplyvom spoločenskej objednávky a ekonomického tlaku prichádzajú na trh zariadenia s menšími rozmermi, hmotnosťami, nižšou cenou, jednoduchou dostupnosťou a hlavne s vyšším podielom elektroniky. Práve tento faktor so sebou prináša negatívny vplyv, ktorý zvyšuje nárast nelineárnych odberov prúdu, väčšie zaťažovanie siete a následné skreslenie (deformácie) napájacieho napätia v elektrizačnej sústave. Z hľadiska priemyslu, kde sú pripojované zariadenia veľkých výkonov, sú dopady nelineárnych odberov zmapované v dostatočnej miere, pretože to bolo nutnou podmienkou pred ich nasadzovaním zopár desiatok rokov dozadu. Avšak druhým pohľadom sú bežné spotrebiče využívané v domácnosti (výpočtová technika, úsporné svietidlá...), kde je daná problematika riešená vo veľmi málo štúdiách a až v poslednej dobe sa dostáva do popredia záujmu [28].

Táto diplomová práca sa zaoberá popisom kvality elektrickej energie na nízkom napätí. Jej hlavným cieľom bolo vytvoriť testovací model dát, v ktorom dôjde k analýze dát v týždennom meraní na NN z pohľadu vyšších harmonických napätí v prostredí MATLAB.

2 ÚVOD DO KVALITY ELEKTRICKEJ ENERGIE = KVALITA NAPÄTIA

Elektrická energia nemá rovnaký charakter, ako iné výrobky. Nemôže byť po výrobe skladovaná a pred použitím podrobená kontrole kvality. Tento predpoklad vychádza z kontinuálneho charakteru jej toku a nutnosti rovnováhy medzi výrobou a spotrebou v každom okamihu [25].

Elektrina je väčšinou generovaná ďaleko do miesta spotreby množstvom generátorov a inými zdrojmi. S tým súvisí, že je prenášaná do miesta spotreby cez niekoľko transformácií a množstvom kilometrov vedení. Pod pojmom kvalitnej dodávky elektriny si je zjednodušene možné predstaviť napájanie, ktoré je nepretržité – bez porúch (výpadkov) s napätím, ktorého amplitúda a frekvencia sú v predpísanej tolerancii s čisto sínusovým tvarom vlny [25].

Kvalita elektrickej energie je teda definovaná charakteristikami napätia v danom uzle elektrizačnej sústavy, ktoré sú následne porovnávané s limitnými, prípadne informatívnymi hodnotami [25].

Medzi problémy, ktoré môže spôsobiť nedostatočná kvalita napätia patria napríklad [25]:

- neočakávané výpadky napájania – vypínanie ističov a poistiek
- chybná funkcia alebo poruchy elektrických prístrojov
- degradácia motorov, transformátorov a vedení vplyvom prehrievania (skrátene životnosti)
- rušenie komunikačných zariadení
- chybné funkcie ochrán
- atď.

Kvalita napätia je úzko spätá s ekonomickým dopadom na dodávateľov, prípadne odberateľov elektrickej energie, ako aj na výrobcov rôznych spotrebičov a zariadení. Často diskutovanou témou sa stáva ocenenie množstva nedodanej elektrickej energie a celkového ohodnotenia napríklad pri výpadku určitého podniku v dôsledku zníženej kvality. Pre sledovaný podnik môže tento negatívny stav v prípade dlhšieho beznapäťového stavu vplývať na jeho hospodárny chod [4][5].

2.1 Charakteristiky napätia v DS

Európska norma ČSN EN 50 160 ed.3 popisuje a udáva hlavné charakteristiky napätia v mieste pripojenia užívateľov z verejných distribučných sietí nízkeho, vysokého a veľmi vysokého napätia za normálnych prevádzkových podmienok. Charakteristiky napätia nie sú určené pre priame použitia pri definovaní požiadaviek vo výrobných normách a normách pre inštalácie. Taktiež nie sú určené ako hladiny elektromagnetickej kompatibility, ani pre užívateľa ako medze rušenia šírených po verejných elektrických distribučných sieťach [6].

Norma platí pre PCC (Point of Common Coupling), ktorý predstavuje spoločný napájací bod teda miesto verejnej distribučnej siete, kde môžu byť pripojení ďalší odberatelia [12].

Nevzťahuje sa na mimoriadne prevádzkové podmienky, ako sú [6]:

- dočasné zapojenie siete umožňujúce napájanie užívateľov za podmienok vyvolaných poruchou, alebo behom údržbových a výstavbových prác alebo s cieľom minimalizácie rozsahu a trvania straty napájania
- v prípade, že inštalácia alebo zariadenie užívateľa nevyhovuje príslušným normám alebo technických pripojovacím podmienkam pre užívateľa, vydaným buď verejnou správou

alebo prevádzkovateľom distribučnej siete, ktorá obsahuje medze pre rušenia šírené vedeniami

- vo výnimočných situáciách na ktoré nemá dodávateľ elektriny vplyv, zahrňujúce:
 - 1) mimoriadne poveternostné podmienky a ďalšie prírodné katastrofy
 - 2) cudzie zavinenie
 - 3) nariadenie úradu
 - 4) priemyselnú činnosť (štrajky v rámci zákona)
 - 5) vyššia moc
 - 6) nedostatok výkonu zavinený vonkajšími okolnosťami

Predmetom tejto normy je definovanie, popis a špecifikácia charakteristík napájacieho napätia rozdeleného podľa [6][18]:

- kvality napätia
- nepretržitosti distribúcie

Do kvality napätia, ktorá je daná charakteristikami napájacieho napätia, spadajú aspekty nazývané ako priebežné javy. Jednotlivé parametre patriace do tejto skupiny sú uvedené v *Tab. 2-1*. Týkajú sa [6]:

- kmitočtu
- veľkosti
- tvaru vlny
- symetrie trojfázových napätí

Tieto charakteristiky za normálnej prevádzky napájacieho systému kolísajú vplyvom zmien zaťaženia, rušením vyvolaným určitým zariadením a výskytom porúch, ktoré sú väčšinou spôsobené vonkajšími vplyvmi. Charakteristiky napätia sa menia v čase náhodne vo vzťahu k ľubovoľnému miestu napájania a náhodne pre každé miesto napájania vo vzťahu k danému časovému okamžiku. Vzhľadom k tejto premenlivosti môžu byť očakávané hladiny charakteristík prekročené v malom počte prípadov [6].

Druhú sekciu, ktorú stanovuje norma ČSN EN 50 160 ed.3 je tzv. nepretržitosť (kontinuita) distribúcie podľa počtu a dôb prerušenia. Kontinuita distribúcie sa radí medzi napät'ové udalosti. Jednotlivé typy udalostí sú uvedené *Tab. 2-1*.

Prerušenie napájacieho napätia je charakterizované ako stav, pri ktorom je napätie v odovzdávajúcom mieste menšie ako 5 % dohodnutého napätia. Daná definícia je viazaná na veľkosť napätia a teda na jeho merania v každom odovzdávajúcom mieste [18][6].

Vyhláška č. 41/2010 Sb. hovoriaca o „kvalite dodávok elektriny a súvisiacich služieb v elektroenergetike“ klasifikuje prerušenie distribúcie na dve časti [18]:

- prerušenie podľa doby trvania:
 - A. dlhodobé – doba trvania ($t_i > 3$ min)
 - B. krátkodobé – doba trvania ($1 \text{ s} \leq t_i \leq 3$ min)

Je nutné poznamenať, že intervaly a hranice pre triedenie krátkodobých a dlhodobých prerušení distribúcie sa môžu líšiť pre rôzne krajiny:

- prerušenie podľa príčiny:
 - A. neplánované
 - 1) poruchové

- 2) vynútené
- 3) mimoriadne
- 4) v dôsledku udalostí mimo prenosovú a distribučnú sústavu prevádzkovateľa sústavy a u výrobcu

B. plánované – jedná sa o prerušenie pri prevádzaní plánovaných prác na zariadení sústavy alebo v ich ochrannom pásme (najmä opráv, údržby, rekonštrukcie a revízie), pričom ich začiatok a ukončenie bolo oznámené spôsobom v mieste obvyklým, najmenej však 15 dní predom

Problémy s prerušením distribúcie môžu vzniknúť v sieťach všetkých napät'ových hladín. Významnú úlohu zohráva citlivosť jednotlivých zákazníkov na prerušenie. Škody, ktoré vzniknú prerušením závisia najmä na dĺžke trvania prerušenia, ale aj na okamžiku jeho vzniku, ktoré sa delí podľa [18]:

- doby dňa (deň, noc)
- a pohľadu aktuálnej činnosti zákazníka (stav technologického procesu)

Tab. 2-1 Základný prehľad priradenia charakteristik k hladinám napätia [17][6]

Napät'ová hladina		NN	VN	VVN
Charakteristiky napätia	Priebežné javy	kmitočet siete, veľkosť napájacieho napätia, odchýlka napájacieho napätia, rýchle zmeny napätia, krátkodobé poklesy napájacieho napätia, nesymetria napájacieho napätia, harmonické/medziharmonické napätia, úrovne napätia signálov v napájacom napätí		
	Napät'ové udalosti	prerušenie napájacieho napätia, poklesy/dočasné zvýšenie napätia napájacieho napätia		
Zaručované hodnoty, meracie intervaly, doby pozorovania, medzné pravdepodobnostné splnenie stanovených limitov		Priebežné javy		
Informatívne hodnoty		Napät'ové udalosti		

3 CHARAKTERISTIKY DODÁVKY ELEKTRICKEJ ENERGIE NÍZKYM NAPÄTÍM

Na úrovni nízkeho napätia rozlišujeme spomínané priebežné javy a napät'ové udalosti. Priebežný jav je definovaný ako spojitý jav, kde dochádza k odchýlkam od menovitých hodnôt, ktoré sa vyskytujú v priebehu času. Je spôsobený najmä charakterom zaťaženia, zmenami zaťaženia alebo nelineárnymi zaťažienami. Medzi priebežné javy patria: frekvencia napájacej siete, odchýlka napájacieho napätia, rýchle zmeny napätia, nesymetria napájacieho napätia, harmonické napätia, medziharmonické napätia, úrovne napätia signálov v napájacom napätí [6].

Druhý pojednáva o napät'ových udalostiach, kde dochádza naopak k náhlejšej a závažnej odchýlke od normálneho alebo požadovaného tvaru vlny. Sú spôsobené neočakávanými udalosťami (poruchou) alebo vonkajšími vplyvmi (počasím, cudzím zavinením). Medzi napät'ové udalosti patria: prerušenie napájacieho napätia, poklesy/dočasné zvýšenie napätia napájacieho napätia [6].

3.1 Frekvencia napájacej siete

Podľa danej normy ČSN EN 50 160 ed.3, je menovitá hodnota kmitočtu 50 Hz. Keďže frekvencia v napájacej sieti je závislá na vzájomnom pôsobení medzi generátormi a zaťažením a rozsah odchýlok klesá so vzrastajúcim pomerom medzi výkonom generátorov a kolísaním zaťaženia, norma rozlišuje ostrovné systémy (slabo izolované systémy) a systémy synchronne prepojené s okolitými systémami [15].

-u systémov so synchronným pripojením k prepojenému systému

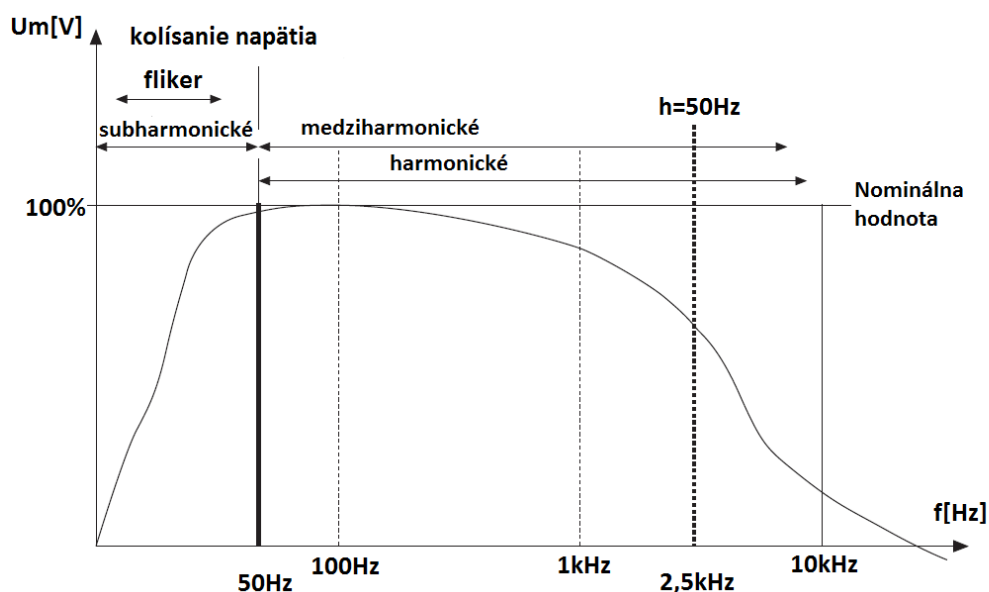
50 Hz \pm 1 % (tj. 49,5 Hz...50,5 Hz) behom 99,5 % roku;

50 Hz + 4 % / -6% (tj. 47 Hz...52 Hz) po 100 % času;

-u systémov bez synchronného pripojenia k prepojenému systému (tj. ostrovné napájacie systémy)

50 Hz \pm 2 % (tj. 49 Hz...51 Hz) behom 95 % týždňa;

50 Hz \pm 15 % (tj. 42,5 Hz...57,5 Hz) po 100 % času.



Obr. 3-1 Prehľad vyskytujúcich sa zložiek vo frekvenčnej oblasti [11]

3.2 Odchýlka napájacieho napätia

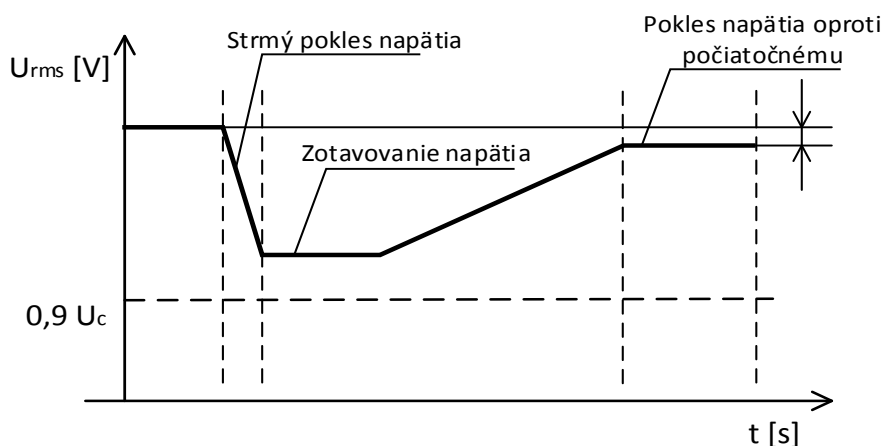
Za normálnych prevádzkových podmienok, okrem období s prerušením, odchýlka napájacieho napätia nesmie presiahnuť \pm 10 % menovitého napätia 230 V. Číselne sa tak jedná o rozsah 207V-253V.

Skúšobná metóda vykonávaná za normálnych prevádzkových podmienok musí byť v priebehu každého týždňa v 95 % priemerných efektívnych hodnôt napájacieho napätia v meracích intervaloch 10 minút v rozsahu $U_n \pm 10 \%$ a všetky priemerné efektívne hodnoty napájacieho napätia v meracích intervaloch 10 minút musia byť v rozsahu $(+10 \%/ -15 \%)U_n$ [15][6].

3.3 Rýchle zmeny napätia

Jedná sa o rýchlu zmenu efektívnej hodnoty napätia medzi dvoma po sebe nasledujúcimi ustálenými stavmi [15]. Väčšinou sú spôsobené zmenami zaťaženia v inštaláciách užívateľov, spínacími operáciami v sieti alebo poruchami.

Na Obr. 3-2 je názorná ukážka rýchlej zmeny (poklesu) napätia spôsobeného rozbehovým prúdom motora. V prvej časti je strmý pokles napätia (10 milisekúnd), následne postupné zotavovanie (trvá rádovo niekoľko períód napájacieho napätia) napätia a na záver ustálenie napätia, ktoré je menšie ako hodnota napätia, pred spustením motora [15].



Obr. 3-2 Ilustračný priebeh rýchlej zmeny napätia pri spúšťaní motora (upravená z [15])

Do rýchlych zmien napätia je klasifikovaná aj tzv. miera vnemu blikania („flicker“). Je to jav, ktorý pôsobí na vizuálne vnímanie človeka zmenami svetelného toku (buď periodicky, cyklicky alebo skokovo) svetelných zdrojov, vyvolanými sledom rýchlych zmien napätia, ktorým sú napájané. Pozorovateľ tieto zmeny vníma v zmene jasnosti osvetľovanej scény, ktoré narúšajú jeho zrakový úkon [3]. Je popisovaná dvoma parametrami:

- krátkodobou mierou vnemu blikania (P_{st})
- dlhodobou mierou vnemu blikania (P_{lt})

Dlhodobá miera vnemu blikania je definovaná za normálnych prevádzkových podmienok tak, že musí byť po 95 % času, v ľubovoľnom týždennom období, rovná alebo menšia ako 1 ($P_{lt} \leq 1$) [6].

3.4 Nesymetria napájacieho napätia

V praxi je z mnohých dôvodov akákoľvek viac-fázová sústava nesymetrická. Je to spôsobené stratou symetrie vektorov fázového napätia (veľkosť a/alebo uhol). Typickou príčinou, ktorá vyvoláva túto nevyváženosť je nesymetrická záťaž [7][3].

3.5 Harmonické napätia

Tab. 3-1 Úrovně jednotlivých harmonických napätí v odovzdávacom mieste v % [6]

Nepárne harmonické				Párne harmonické	
Nie násobky 3		Násobky 3			
Rád harmonickej h	Harmonické napätie U_h	Rád harmonickej h	Harmonické napätie U_h	Rád harmonickej h	Harmonické napätie 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 pre harmonické vyšších rádov ako 25 sa neuvádzajú, pretože sú obvykle malé a vplyvom rezonančných javov ťažko predvídateľné

Podľa normy musí byť za normálnych prevádzkových podmienok v ľubovoľnom týždennom období 95 % desaťminútových stredných efektívnych hodnôt napätia každej harmonickej menší alebo rovný hodnote, ktoré sú definované v Tab. 3-1. Činiteľ celkového harmonického skreslenia napájacieho napätia *THD* (Total Harmonic Distortion) musí byť menší alebo rovný 8 %. Tento činiteľ zahrňuje všetky harmonické až do 40 rádu [6].

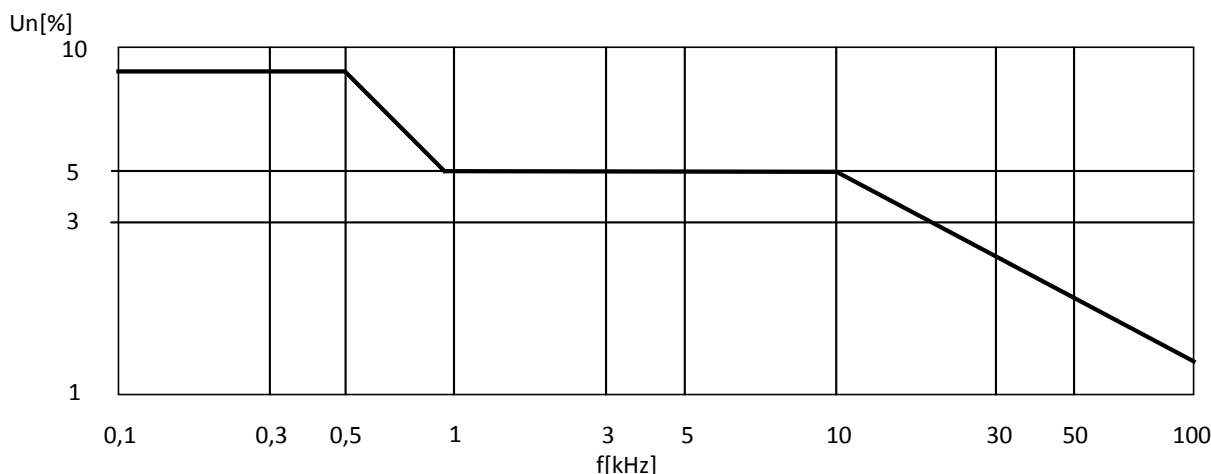
3.6 Medziharmonické napätia

Z hľadiska normalizácie sú medziharmonické zložky aktuálne skúmané a získavajú sa hlbšie poznatky. Väčší záujem o medziharmonické zložky nastal najmä s rozvojom používania frekvenčných meničov, oblúkových zväračiek, plazmových ohrevov atď. [6][3].

V určitých prípadoch môžu vyvolať i pri nízkych hladinách blikanie („flicker“) alebo spôsobovať rušenie v systémoch HDO (Hromadného Diaľkového Ovládania) [6].

3.7 Úrovně napätia signálov v napájacom napätí

V niektorých krajinách môže PDS využívať verejnú distribučnú sieť k prenosu informácie. Stredná hodnota napätia signálu meraného po dobu troch sekúnd musí byť v 99 % rovná alebo pod hranicou vyznačenou na Obr. 3-3 [6].



Obr. 3-3 Úrovně napätia v závislosti na kmitočtoch signálov v % U_n vo verejných distribučných sieťach NN [15]

3.8 Prerušenie napájacieho napätia

Prerušenia napájacieho napätia sú podľa svojej povahy veľmi nepredvídateľné a rôzne od miesta k miestu a vzhľadom k času. Preto pre celú dobu nie je možné stanoviť reprezentatívne štatistické výsledky merania početnosti prerušení reprezentujúce všetky európske siete [6].

3.9 Poklesy/dočasné zvýšenie napätia napájacieho napätia

Všeobecne poklesy napätia môžu byť spôsobené poruchami v inštaláciách užívateľov alebo vo verejnej distribučnej sieti [6].

Pomerom napätia, ktoré „zostane“ pri poklese napätia a referenčného (nominálneho) napätia 230 V, vznikne hodnota zbytkového napätia (pokiaľ sa uvažuje percentuálna hodnota, treba tento výsledok vynásobiť 100 %). K nemu sú stanovené pevne časové intervaly, v ktorých sa zaznamenáva. Následne dochádza ku grafickému a štatistickému spracovaniu týchto napätiových udalostí. Celkový prehľad je uvedený v Tab. 3-2.

Tab. 3-2 Klasifikácia poklesov napätia podľa zbytkového napätia a doby trvania [6]

Zbytkové napätie u [% U_n]	Doba trvania t [ms]				
	$10 \leq t \leq 200$	$200 < t \leq 500$	$500 < t \leq 1 \cdot 10^3$	$1 \cdot 10^3 < t \leq 5 \cdot 10^3$	$5 \cdot 10^3 < t \leq 6 \cdot 10^4$
$90 > u \geq 80$	CELL A1	CELL A2	CELL A3	CELL A4	CELL A5
$80 > u \geq 70$	CELL B1	CELL B2	CELL B3	CELL B4	CELL B5
$70 > u \geq 40$	CELL C1	CELL C2	CELL C3	CELL C4	CELL C5
$40 > u \geq 5$	CELL D1	CELL D2	CELL D3	CELL D4	CELL D5
$5 > u$	CELL X1	CELL X2	CELL X3	CELL X4	CELL X5

Naopak dočasné zvýšenia napätia sú všeobecne spôsobené prevádzkovým spínaním, odpojovaním záťaže atď.. U súčasných meracích prístrojov a/alebo systémov pre monitorovanie sa pre vyhodnotenie odporúča použiť *Tab. 3-3*[17].

Tab. 3-3 Klasifikácia prechodných zvýšení napätia podľa maximálneho napätia a doby trvania [6]

Prechodné zvýšenie napätia u [% U_n]	Doba trvania t [ms]		
	$10 \leq t \leq 500$	$500 \leq t \leq 5\,000$	$5\,000 \leq t \leq 60\,000$
$u \geq 120$	CELL S1	CELL S2	CELL S3
$120 > u > 110$	CELL T1	CELL T2	CELL T3

4 KVALITA NAPÄTIA V DS

Štandard, ktorý sa zaoberá kvalitou napätia v DS je uvedený v prílohe 3. PPDS: Kvalita napätia v DS, spôsoby ich vyhodnocovania a hodnotenia [17] z roku 2011.

Pri meraní a vyhodnocovaní charakteristík napätia sa vychádza z postupov definovaných v normách [7][6]. Počas meraní charakteristík napätia je potrebné merať a vyhodnocovať tie napätia, na ktoré sú pripojované odbery. Na úrovni VN,VVN sú to združené napätia. Vo štvorvodičových sieťach NN sa meria napätie medzi fázami a stredným vodičom, prípadne i napätia medzi fázami.

Zaistenie sledovania a archivácie charakteristík napätia spadajúce do kategórie priebežných javov zaručuje PDS v jednotlivých napäťových hladinách tak, ako je uvedené v *Tab. 4-1*. Tento proces je rovnaký aj pre napäťové udalosti, ktoré majú informatívny charakter [17].

Tab. 4-1 Monitorovanie charakteristík napätia [17]

Charakteristiky napätia so zaručovanými hodnotami	
Odvzdávajúce miesta PS/DS	Trvalé meranie (od 1.1.2006)
Odberné miesta 110kV	Trvalé meranie (archivácia a sledovanie od 1.1.2007)
Výstupné napätie staníc 110 kV/VN	Trvalé meranie (archivácia a sledovanie od 1.1.2010)
Odberné miesta v sieťach VN	Výber (sťažnosť, žiadosť o nové pripojenie)
Výstupné napätie staníc VN/NN	Výber (sťažnosť, žiadosť o nové pripojenie)
Odberné miesta v sieťach NN	Výber (sťažnosť, žiadosť o nové pripojenie)

Z hľadiska archivácie harmonických napätí sa archivuje celkové harmonické skreslenie THD_U a pokiaľ prekročí 50 % hodnoty pre dané meracie miesto, potom aj veľkosť harmonických prekračujúcich 30 % ich dovolenej hodnoty. Medziharmonické napätia a úrovne napätia signálov v napájacom napätí sa vyhodnocujú a sledujú iba v prípade podnetu zo strany zákazníka (sťažnosť) alebo ako reakcia na výsledky overovacích meraní PDS [17].

4.1 Monitoring kvality napätia

V danom štandarde z roku 2015 ČSN EN 61000-4-30 ed.3: *Skúšobná a meracia technika - Metódy merania kvality energie*, sú stanovené nasledovné triedy presnosti [7]:

- Trieda A
- Trieda S
- Trieda B

➤ Trieda A („Advanced“)

Najpresnejšie trieda (metóda) uvádzaná v danej norme. Táto trieda je z hľadiska presnosti, rozlíšenia, meracieho rozsahu, tak aj výpočtového výkonu a odolnosti voči rušeniu EMC (Elektromagnetická kompatibilita) najnáročnejšia. Využíva sa, pokiaľ sú nutné presné merania, napríklad pre merania v odovzdávajúcich miestach medzi prenosovou a distribučnou sústavou, overovanie zhody s normami, zmluvné aplikácie, súdne spory alebo v prípade hodnotenia kvality napätia dodávanej významným a zvlášť citlivým zákazníkom [7][24].

➤ Trieda S („Surveys“)

Táto trieda presnosti je miernejšia ako trieda A. Využíva sa pre štatistické aplikácie ako sú prehľady alebo hodnotenie kvality energie, kde dokáže poskytnúť relevantné údaje postačujúce pre hodnotenie kvality napätia na NN strane DTS. Hoci používa porovnateľný merací interval ako trieda A, požiadavky na spracovanie dát sú oveľa nižšie [7][24].

➤ Trieda B

Metódy uvedené v triede B nesmú byť použité pre nové prístroje. Táto trieda bola presunutá do informatívnej sekcie E, podľa [7]. Je určená k podpore existujúcich prístrojov, ktoré sú stále v prevádzke a môžu poskytnúť relevantné údaje. V ďalšej edícii daného štandardu sa očakáva, že bude odstránená [7][24].

V súčasnosti prebieha kontinuálne meranie v odovzdávacích miestach medzi prenosovou a distribučnou sústavou. Je vykonávané statickým analyzátorom kvality napätia triedy A s presnosťou merania do 0,1% [16].

Tento analyzátor musí okrem zaznamenávania parametrov kvality umožňovať aj meranie veľkosti prúdov a z nich odvodené (podľa priradených napätí) aj ďalšie veličiny ako sú [16]:

- činný výkon
- zdanlivý výkon
- jalový výkon
- harmonické

Pre analyzátory kvality napätia v odovzdávajúcich miestach z DS a spoločných napájacích bodoch s regionálnymi výrobcami sa prednostne používajú analyzátory triedy S s presnosťou 0,5 % [31]. Pokiaľ dôjde ku sťažnosti ohľadne kvality napätia, použije sa pre kontrolné meranie analyzátor triedy A. Prístroje triedy S sa používajú pre meranie úrovne napätia NN, VN a VVN [16].

4.1.1 Monitoring NN sietí

Úroveň nízkeho napätia nie je v súčasnej dobe kontinuálne monitorovaná. Prevádzka sa iba v prípade sťažnosti, abnormálnych stavov alebo rozvíjajúcej sa siete. Avšak s výhľadom do

budúcna sa počíta aj s komunikáciou a vyhodnocovaním kvality elektrickej energie na úrovni nízkeho napätia.

Jedná sa v podstate o Smart Grids („chyté siete“), ktoré je možné definovať ako evolúciu súčasných sietí. Ich benefit spočíva najmä v obojsmernej komunikácii (výmene dát) medzi prevádzkovateľom distribučnej siete a odberateľom, respektíve uzlami siete. Primárnym cieľom je monitorovať, chrániť a optimalizovať operácie v sieti na základe vzájomného prepojenia autonómnych zariadení bez zásahu dispečera [10].

Pôvodne ide o decentralizáciu energetiky, ktorá zvýšila záujem o riešenie problematiky Smart Grids. Smart Grids so svojou koncepciou riadenia vyžadujú zaistenie čítania všetkých energetických dát v reálnom čase. K tomu slúžia inteligentné elektromery [1].

Inteligentné meracie systémy („Smart Metering“) alebo pokročilá meracia štruktúra (AMI - Advanced Metering Infrastructure) má oproti konvenčným elektromechanickým zariadením (elektromerom) mnoho výhod ako je napríklad: zobrazenie údajov o spotrebe v reálnom čase pre zákazníkov na domácom displeji, meranie činného (jalového) výkonu a ich množstvo, možnosť vzdialeného odpojenia a opätovného pripojenia spotrebiteľov, diaľkový odpočet a v neposlednom rade aj monitoring kvality elektrickej energie [14]. Prínosom monitorovania kvality elektrickej energie z pohľadu dispečera je komplexnejší prehľad diania v sieti, na základe ktorého je možné predchádzať nežiadúcim výpadkom, prípadne zníženiu kvality napätia alebo sťažnosti pre koncového zákazníka.

Monitoring NN sieti by mal byť realizovaný meraním napätia a prúdu v odberných miestach prostredníctvom elektromerov s následným preposlaním hodnôt pomocou komunikačných systémov do dátových centier, a potom ich prijatie, ukladanie a spracovanie v centrálnom dispečingu [13][10].

Všeobecný prehľad komunikačných prostriedkov vhodných pre budovanie Smart Grids je zhrnutý nasledovne [23]:

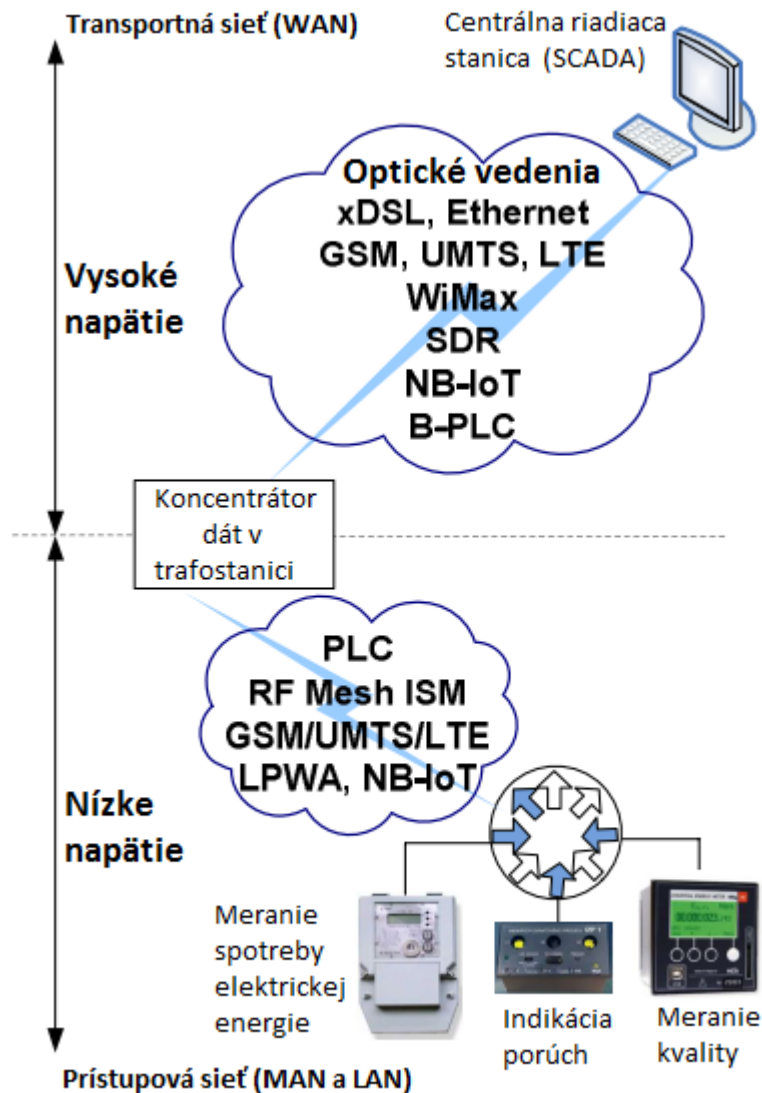
1. Prenosy po vedeniach

- Optické vedenia
- Metalické vedenia
 - Účastnícka – xDSL, ISDN
 - Silnoprúdová – PLC
 - Úzkopásmová PLC
 - Úzkopásmová PLC s jednou nosnou
 - Úzkopásmová PLC s viacerými nosnými (OFDM)
 - Širokopásmová PLC (B-PLC)
 - Slaboprúdová – káblková TV

2. Bezdrôtové prenosy

- Rádiové
 - Pozemné siete
 - GSM/GPRS, 3G, UMTS, LTE
 - WiMax – licencované
 - Softwarovo definované rádio (SDR) v licenčnom pásme
 - RF Mesh – nelicenované ISM rádio
 - Low Power Wide Area (LPWA)

- LoRa, SigFox
 - NB-IoT – 3GPP
 - Smerové spoje
 - Satelitné spoje
- Optické



Obr. 4-1 Uvažované komunikačné technológie (VN/NN) rozdelené pre prístupovú a transportnú časť Smart Grid [23]

Jednotlivá kategorizácia, popis a zhrnutie komunikačných prostriedkov je detailnejšie rozobraná v literatúre [23].

Vízie do budúcnosti ohľadne „Smart Meteringu“ určujú každoročný nárast týchto zariadení a do roku 2020 predpokladá Európska komisia 200 miliónov (smernica 2009/72/ES) týchto zariadení nainštalovaných v Európe. Avšak stále existuje celý rad technických, právnych a ekonomických prekážok, ktoré treba prekonať, pokiaľ sa táto technológia chce využívať v širšom meradle [13].

4.1.2 Všeobecne o meraní v DTS

DTS všeobecne slúži k transformácii elektrickej energie z hladiny VN (10,22,35 kV) na hladinu NN. Základným prvkom DTS je 3xf transformátor, pričom štandardne je jeho primárne vinutie zapojené do trojuholníka a sekundárne do hviezdy s uzemneným stredom. Pri takejto konfigurácii to znamená, že na primárnej strane transformátora sú pre účely prenosu energie merané medzifázové napätia, zatiaľ čo na sekundárnej strane sa merajú fázové napätia vzťahujúce sa k strednému vodiču [24].

Stredom záujmu pre záznam parametrov sú napätia na NN strane, aj keď v poslednej dobe so zdokonaľovaním funkcií meracích a komunikačných prístrojov je čoraz častejšie snaha aj o merania na VN hladine. Hlavnou príčinou tohto záujmu je rozvoj rozptýlenej výroby zdrojmi so stochastickým (kolísavým) výkonom a s tým spojená náhodná premenlivosť napäťového profilu pozdĺž VN vedenia paprskovej konfigurácie [24].

Keďže DTS predstavujú distribučné zariadenia slúžiace pre distribúciu elektrickej energie až ku koncovému zákazníkovi, pričom jedna DTS môže obsluhovať aj stovky domácností, bez osadenia trvalého merania nemožno zistiť presné hodnoty zaťaženia a stanoviť maxima napätia a prúdu. Merania v DTS rozdeľujeme do dvoch skupín [24]:

- A. Pevné
- B. Prenosné

Tab. 4-2 Prehľadová tabuľka typov merania v DTS [24]

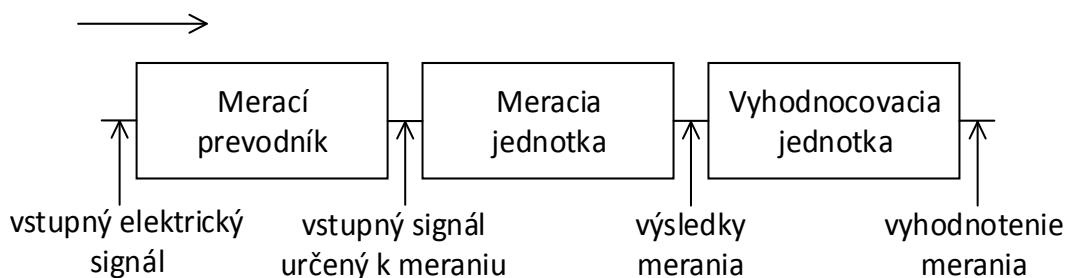
Typ merania (inštalácie)	Spoločné predpoklady	Špecifické požiadavky pre daný typ merania
Pevné	Meranie kvality napätia, záznam napäťových udalostí, registrácia poruchových javov, online merania (SCADA), meranie elektrickej energie v súlade s požiadavkami „Smart meteringu“, registrovať spínacie a atmosférické prepätia, diaľková komunikácia s vyššou úrovňou, zabezpečenie šifrovania prenášaných dát.	Predpoklad vyšších pracovných nárokov (vlhkosť, teplota, mechanická odolnosť...), jednoduchá montáž, kontrola funkcie bez zásahu do silovej časti.
Prenosné		Častá inštalácia, rýchla demontáž, zvýšený stupeň bezpečnosti, nevodivý povrch, možnosť inštalácie bez zásahu do silovej inštalácie, automatická identifikácia pripojených typov snímačov.

4.2 Organizácia merania elektrických veličín

Pre akékoľvek merania, ktoré sú rôzne od merania na NN, sa musia použiť prevodníky (napätia a prúdu) pre úpravu vstupného signálu. Tento stav je blokovo znázornený na Obr. 4-2. Pokiaľ meriame na hladine NN, kde je meraná veličina priamo dostupná, analyzátory PQ sa pripojujú priamo k meranému napätiu. Pri meraní prúdu na tejto hladine sa aj tak často pre spracovanie vstupného signálu používajú prevodníky [26][7].

Pre správne meranie musia prevodníky spĺňať tieto dva predpoklady [26][7]:

- **Úrovne signálu:** Úrovne signálu by mali využiť celú stupnicu prístroja bez obmedzenia a skreslenia požadovaného signálu
- **Korektnosť merania:** Frekvenčná a fázová odozva sú charakteristikami obzvlášť dôležitými pre meranie harmonických a prechodových javov, čo súvisí s vhodným výberom typu meracieho prístroja



Obr. 4-2 Merací reťazec pre sieť VN [7]

4.2.1 Časové intervaly merania, hodnotenia a agregácie

Základným časovým vyhodnocovacím intervalom pre vyhodnotenie celej rady parametrov ako sú napríklad RMS (Root Mean Square) hodnoty napätia, harmonické a nesymetria napätia v súlade s normou [7] je desať periód signálu pre sieť s menovitou frekvenciou 50 Hz a dvanásť periód pre sieť s menovitou frekvenciou 60 Hz. Z týchto údajov vyplýva, že základné časové okno pre obe siete je 200 milisekúnd [27].

Celkový postup z hľadiska vyhodnotenia jednotlivých meraných veličín pre rôzne napäťové hladiny je možné rozdeliť do týchto častí [27][17]:

- interval merania (3 sekundy, 10 sekúnd, 10 minút, 2 hodiny)
- interval hodnotenia (hodina/deň, týždeň, rok)
- základné agregáčne intervaly (3 sekundy, 10 minút, 2 hodiny)

Agregácia pre väčšinu veličín je definovaná podľa vzťahu ((4-1) a to teda použitím druhej odmocniny aritmetickej strednej hodnoty druhých mocnín vstupných hodnôt [27]:

$$C_{nVS} = \sqrt{\frac{\sum_{K=1}^M C_{n,K}^2}{M}} \quad (4-1)$$

Pričom M je počet jednotlivých vypočítaných hodnôt harmonických C_n pomocou FFT pre celú dobu intervalu T .

Z praktického hľadiska, pokiaľ sa vyhodnocuje kvalita napätia z pohľadu vyšších harmonických (merané napätia a prúdy základnej a vyšších harmonických) v danom mieste, pri intervale záznamu 10 minút, analyzátor kvality pomocou FFT (DFT) rozkladá každú periódu spomínaných veličín na harmonické a teda pre každú periódu vypočítava obsah všetkých harmonických. V konkrétnom meranom časovom intervale to teda predstavuje 3000 periód odpovedajúcich časovému oknu (jednej periódě) 200 milisekúnd. Spektrálny graf, ktorý slúži ako jeden z prostriedkov na vyhodnotenie jednotlivých fáz v meranej oblasti, vzniká zo záznamu minimálnych, maximálnych a stredných hodnôt pre každú harmonickú zvlášť.

Nemenej dôležité veci, ktoré súvisia s danou kapitolou sú: koncepcia označovania, rozsah ovplyvňujúcich veličín, chyby a neistoty merania. Ich podrobný popis je možné dohľadať v literatúrach [7][8][9][15][17].

5 HARMONICKÉ FREKVENČNÉ ZLOŽKY

V zjednodušených pohľadoch na veličiny v napájacej sieti ako sú napätie a prúd predpokladáme, že priebehy okamžitých hodnôt sú harmonické a sú definované určitou efektívnou hodnotou, ktorá je s amplitúdou v pevnom matematickom vzťahu. Ďalej sú popísané základnou sieťovou harmonickou frekvenciou a určitou počiatočnou fázou, pričom pri napätí uvažujeme, že je počiatočná fáza nulová a prúdy sú voči nemu posunuté o nejaký fázový uhol. V reálnych sieťach ale tento ideálny stav neexistuje, pretože nikdy nedosiahneme, aby napätia v napájacej sieti boli ideálne harmonické, teda aby ideálne kopírovali priebeh goniometrických funkcií (sin, cos).

Tento popis je možné vyjadriť matematicky nasledovne podľa vzťahu (5-1). Kvalita napätia vychádza z ideálneho priebehu okamžitej hodnoty napätia, ktorý je definovaný harmonickým priebehom popísaný funkciou sínus, s nominálnou frekvenciou a so zmluvne dohodnutou (nominálnou) a časovo nemennou veľkosťou napätia, ktorá je z hľadiska trojfázového systému symetrická [3].

$$u(t) = U_{m,n} \cdot \sin(2\pi f_n t), \quad t \in (-\infty, \infty) \quad (\text{V}) \quad (5-1)$$

Kde:

$u(t)$	okamžitá hodnota napätia (V)
$U_{m,n}$	efektívna hodnota napätia (V)
$2\pi f_n$	uhlová frekvencia ($\text{rad} \cdot \text{s}^{-1}$)
t	čas, v ktorom určujeme okamžitú hodnotu napätia (s^{-1})

Akakoľvek odchýlka od ideálneho priebehu napätia indikuje zhoršenie kvality napätia. Priebeh okamžitej hodnoty napätia v napájacej sieti je výsledkom interakcie výroby a spotreby elektrickej energie v elektrickej sieti [3].

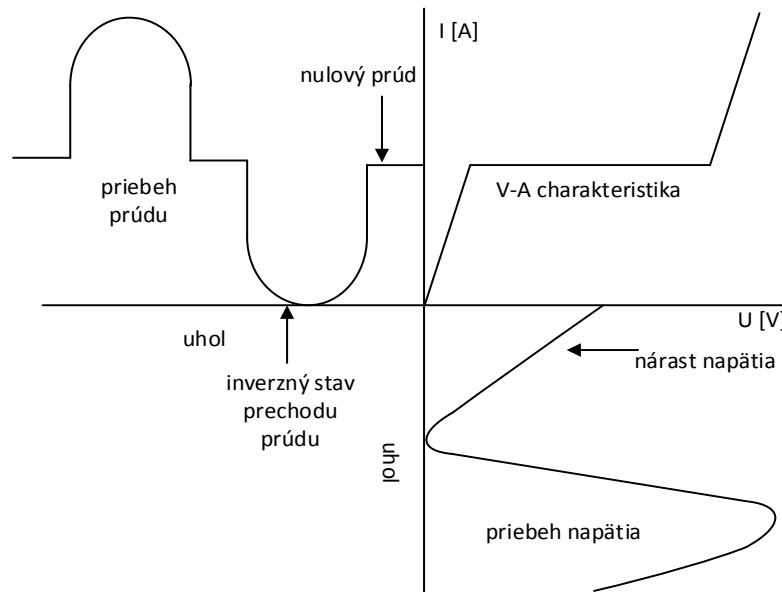
5.1 Pôvod harmonických zložiek

Zdroje harmonických frekvenčných zložiek v napájacej sieti sú predovšetkým [3]:

- spotrebiče (zariadenia) odoberajúce neharmonický prúd
- zdroje elektrickej energie generujúce neharmonické napätia a dodávajúce neharmonické napätia
- prvky elektrickej siete, ktoré svojou nelinearitou a vzájomnou väzbou môžu generovať vlastné kmity, či zosilňovať účinky primárnych zdrojov neharmonických prúdov a napätí (napríklad transformátor)

5.1.1 Spotrebiče odoberajúce neharmonický prúd

Spotrebiče odoberajú neharmonický priebeh prúdu vďaka ich dynamickej nelineárnej V-A charakteristike, pretože vstupný prúd sa nemení plynule (lineárne) s tým, ako rastie napätie v priebehu okamžitej hodnoty. Tento vstupný (odoberaný) prúd môže byť do určitej veľkosti napätia nulový. Ako príklad je možné uviesť usmerňovač s kondenzátorom, pričom kondenzátor je nabitý na určitú hodnotu, nastáva ustálený stav. Okamžitá hodnota napätia v sieti rastie a pokiaľ nebude sieťové napätie väčšie ako je napätie na kondenzátore, nezačne cez usmerňovač do tohto kondenzátora tiecť prúd (pričom je uvažované aj s úbytkami napätia vzniknutými na diódach usmerňovača) [3].



Obr. 5-1 V-A charakteristika nelineárnej záťaže (upravené z [3])

Ideálna lineárna záťaž neexistuje. Vďaka prechodu prúdu cez rezistor, ktorý je teplotne závislý, rastú straty (Joulove teplo), mení sa jeho rezistivita, a tým pádom sa mení veľkosť odoberaného prúdu [3].

5.1.2 Zdroje elektrickej energie generujúce neharmonické napätia

Jedná sa o všetky typy zdrojov elektrickej energie, ktoré sú v elektrizačnej sústave. Napríklad to môžu byť synchronné generátory, ktoré sú považované za zdroje ideálneho sínusového napätia, ale ich výstupné napätie je dané magnetickým tokom vo vzduchovej medzere. Keďže vinutie uložené v drážkach pozdĺž vzduchovej medzery nie je rovnomerne rozložené, predstavuje synchronný generátor zdroj neharmonického napätia [3].

5.2 Dôsledky harmonických zložiek

Všeobecné problémy spôsobené harmonickými môžeme rozdeliť na:

- problémy spôsobené harmonickými prúdmi
- problémy spôsobené harmonickými napätiami

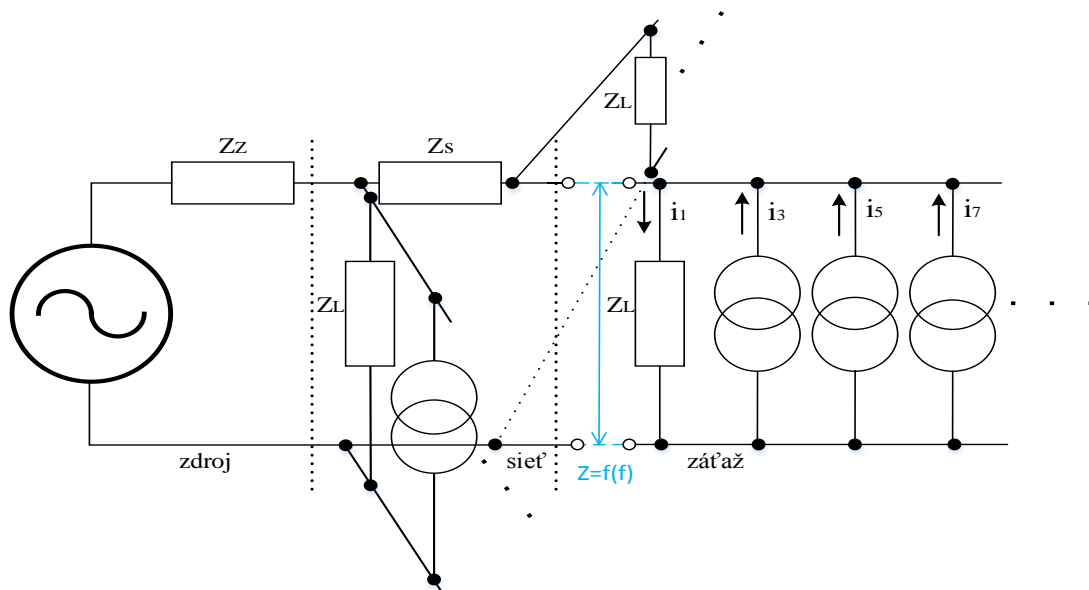
Tab. 5-1 Problémy spôsobené harmonickými zložkami napätia a prúdu [3]

Harmonickými prúdmi	Harmonickými napätiami
vyššie straty v napájacej sieti	zvýšené tepelné namáhanie 3xf indukčných motorov, 3xf meničov
zvýšené zaťaženie fázových vodičov - skin efekt	chybná synchronizácia riadiacej elektroniky
preťažovanie stredného vodiča soufázovými harmonickými – nulovými zložkami	chybná funkcia riadiacich prvkov - ochrán
tepelné namáhanie káblov	preťažovanie kompenzačných kondenzátorov
tepelné namáhanie transformátorov	chybné merania
preťažovanie kompenzačných kondenzátorov	
rušenie pri spínaní vypínačov	
chybné merania	
harmonické skreslenie napätia	

5.3 Šírenie harmonických zložiek

Za určitých zjednodušujúcich predpokladov je možné každú nelineárnu záťaž s impedanciou Z_L reprezentovať náhradným obvodom ako je možné vidieť na Obr. 5-2. Tento nelineárny spotrebič predstavuje záťaž na základnej harmonickej (i_1) a všetky ostatné harmonické v odoberanom prúde (i_3, i_5, i_7), ktoré spotrebič má, predstavujú generátory, ktoré injektujú prúd do napájacej siete s impedanciou Z_s . V danom prípade s frekvenciou 150 Hz, 250 Hz, 350 Hz [3].

Harmonické prúdy tečúce do napájacieho systému „vidia“ jeho impedanciu na jednotlivých frekvenciách a podľa ich veľkostí sa vetvia (uzatvárajú). Je to spôsobené tým, že sa napájací systém rozvetvuje na ďalšie paralelné vetvy cez impedanciu siete Z_s , ako je vidieť na Obr. 5-2. Šírenie harmonických zložiek ovplyvňujú sériové alebo paralelné rezonančné obvody, ktoré vznikajú v sieti a zvyšujú, prípadne znižujú jej impedanciu. Tieto rezonancie spôsobujú zmeny v šírení prúdu a zmeny vo frekvenčnej charakteristike [3].



Obr. 5-2 Náhradný obvod pre nelineárnu záťaž [3]

5.4 Obmedzovanie harmonických zložiek

Primárny spôsob pre obmedzovanie harmonických zložiek nastáva na strane nelineárnych záťaží.

5.4.1 Úroveň NN

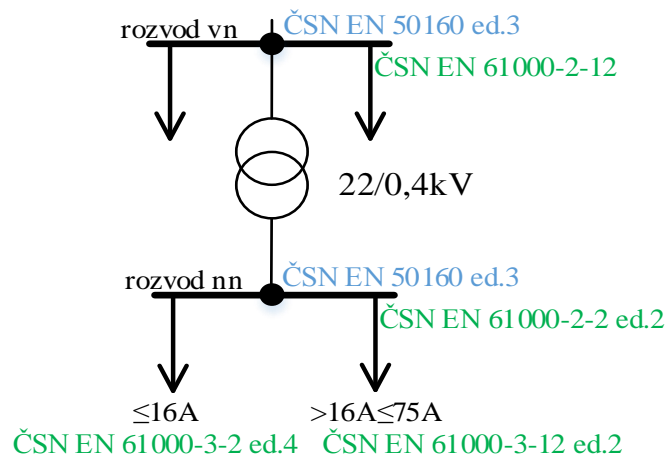
Pre úroveň NN platia dve harmonizované normy, ktoré určujú limity pre emisie harmonického prúdu, ktoré musí splniť výrobca [3]:

- ČSN EN 61000-3-2 ed.4, r.2015 (pre spotrebiče so vstupným fázovým prúdom $\leq 16\text{A}$),
- ČSN EN 61000-3-12 ed.2, r.2012 (pre zariadenia so vstupným fázovým prúdom $>16\text{A}$ $\leq 75\text{A}$ pripojeným k verejným sieťam nízkeho napätia).

Obidve harmonické normy vychádzajú z predpokladaného zaťaženia napájacej sústavy s prihliadnutím k plánovaným úrovniam tak, aby za normálnej situácie nebolo v napájacích bodoch prekročená kompatibilná úroveň pre harmonické napätia uvedené v norme ČSN EN 61000-2-2 ed.2: *Kompatibilné úrovne pre nízkofrekvenčné rušenie šírené vedením a signály vo verejných rozvodných sieťach nízkeho napätia* [20].

Nízkofrekvenčné rušenie sa prejavuje ako rušenie pôsobiace na elektrizačnú sústavu, tzv. „energetické“ rušenie, ktoré pôsobí v pásme frekvencie od 0 Hz do 2 kHz (9 kHz) a prejavuje sa napríklad skreslením (deformáciou) priebehu napájacieho napätia a odoberaného prúdu energetických sietí, z čoho plynie, že zdrojom Nf rušenia je každá nelineárna záťaž odoberajúca z napájacej siete deformovaný nesínusový prúd [3].

Na druhej strane sa jedná o Nf rušenie prenosových informačných systémov, tzv. „akustické“ rušenie, ktoré je definované ako elektromagnetické rušenie v pásme nižšom ako 1 kHz (kilohertz). Spôsobuje rušenie najmä meracích a riadiacich zariadení, zdieľovacích a informačných sústav [3].



Obr. 5-3 Vybrané normy EMC (znázornené zeleno) Nf rušenia vo verejnej sieti

Znázornená schéma je doplnená o normu ČSN EN 61000-2-12 *Kompatibilné úrovne pre nízkofrekvenčné rušenie šírené vedením a signály vo verejných rozvodných sieťach vysokého napätia*.

5.4.2 Úroveň VN

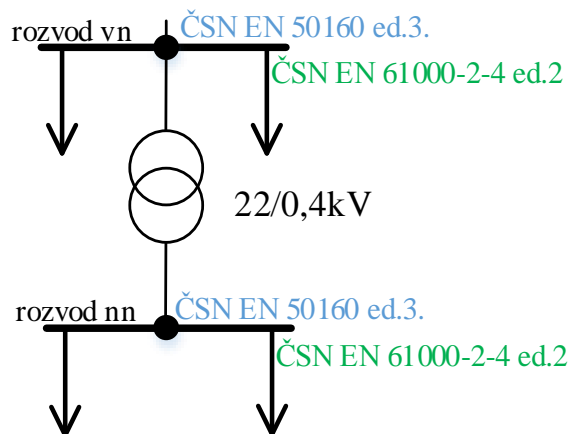
Pre industriálnu sféru je metodika posudzovania vplyvu odberu (pripojenia nového podniku) na verejnú distribučnú sieť odlišná, ako u NN. V súčasnej dobe sa pristupuje ku každému odberateľovi individuálne a praktizujú sa postupy vypracované v podnikových normách [3].

Aby sa predchádzalo narušeniu dovolených emisií pri pripojovaní nového podniku do distribučnej sústavy, je nutné na strane odberateľa (zákazníka), aby posúdil vplyv novo pripojeného zariadenia na svoju podnikovú elektrickú sieť, napríklad podľa normy ČSN EN 61000-2-4 ed.2: *Kompatibilná úroveň pre nízkofrekvenčné rušenie šírené vedením v priemyselných závodoch*. Prevádzkovateľ a distribučnej sústavy negatívne vplyvy zaujímajú až v spoločnom napájacom bode [12].

Podniková norma [16] určuje zjednodušené vyhodnotenie emisie harmonických pri pripojovaní malého počtu malých odberov na základe dohodnutého príkonu inštalácie odberateľa S_i ku skratovému výkonu sústavy S_{sc} v spoločnom napájacom bode:

$$\frac{S_i}{S_{sc}} \leq 0,2 \% \quad (5-2)$$

Po splnení tejto podmienky môže byť zariadenie odberateľa bez ďalšieho vyšetrovania pripojené do sústavy. Prípadne sa pre zjednodušenie vyhodnotenia emisií harmonických postupuje podľa kritéria váženého rušivého príkonu uvedeného v správe IEC/TR 61000-3-6:2008 ed.2, kde sa nachádza tabuľka váziacich činiteľov pre rôzne typy zariadení vytvárajúce harmonické a postup príslušných výpočtov. Samozrejme týchto postupov (etáp) je v predmetnej podnikovej norme popísaných viacero s príslušnými názornými obrázkami a vzťahmi.



Obr. 5-4 Norma EMC (znázornená zeleno) pre Nf rušenie v priemyselnej sieti

5.4.3 Úroveň VVN

Pre určenie limitu emisií harmonických spôsobených inštaláciami pripojovanými do sústavy VVN je možné pre zjednodušenie použiť vzťah uvedený v (5-2), prípadne kritérium váženého rušivého príkonu. Taktiež podniková norma [16] stanovuje aj iné metódy (postupy) a výpočty v sústavách VVN, ktoré sú ale omnoho zložitejšie (sofistikovanejšie) ako vo VN.

Pre meranie a vyhodnocovanie harmonických (medziharmonických) súvisiace s plánovanými úrovňami, ktoré určuje prevádzkovateľ sústavy pre účely vyhodnocovania úrovne emisie rušenia zo zariadení všetkých odberateľov pripojených na danú distribučnú sústavu, sa používa metóda triedy A špecifikovaná v [7], pričom prístroje pre merania musia vyhovovať norme ČSN EN 61000-4-7 ed.2: *Skúšobná a meracia technika – Všeobecná smernica o meraní a meracích prístrojov harmonických a medziharmonických pre rozvodné siete a zariadenia pripojované do nich* [16].

5.5 Medziharmonické zložky

Medziharmonické zložky sú všeobecne signály s frekvenciou odlišnou od systémovej (základnej) frekvencie 50 Hz a ich celistvých násobkov, vrátane jednosmernej zložky a sú uvažované vo frekvenčnom rozsahu do 9 kHz. Priebeh okamžitej hodnoty napätia pre medziharmonické zložky je možné zapísať podľa nasledujúcej rovnice [3]:

$$u(t) = U_{DC} + u_1(t) + \sum_{h=1}^H u_h(t) + \sum_{k=1}^K u_{IHK}(t) \quad (\text{V}) \quad (5-3)$$

Kde:

$$\begin{aligned} U_{DC} & \quad \text{jednosmerná zložka napätia (V)} \\ u_1(t) & \quad \text{okamžitá hodnota napätia na základnej harmonickej (V)} \\ \sum_{h=1}^H u_h(t) & \quad \text{súčet okamžitých hodnôt napätí vyššieho rádu (V)} \\ \sum_{k=1}^K u_{IHK}(t) & \quad \text{súčet medziharmonických zložiek (V)} \end{aligned}$$

$$u_{IHK}(t) = U_{IHK,m} + \sin(\omega_{IHK}t + \varphi_{IHK}) \quad (\text{V}) \quad (5-4)$$

Kde k je index medziharmonickej.

Medziharmonické zložky vznikajú najmä vplyvom veľmi dynamicky meniacim sa podmienkam v prevádzke napájacej siete (zmena odoberaného prúdu, zmena impedancie napájacej siete, zmena výroby). V tomto prípade ide o moduláciu prúdu či napätia, ktoré sa vo frekvenčnej oblasti prejavujú výskytom špecifických medziharmonických zložiek [3].

Tab. 5-2 Typy medziharmonických zložiek (upravené z [3])

Medziharmonické zložky	Subharmonická	$0 \text{ Hz} < f < f_1$
	Vysokofrekvenčná medziharmonická	$f_1 < f < 2f_1$
	Nízko-frekvenčná medziharmonická	$f > 2f_1$ a zároveň $f \neq h \cdot f_1$, kde h je celé číslo > 2

6 HARMONICKÉ NAPÄTIA

Norma ČSN EN 50 160 ed.3 stanovuje harmonické napätia podľa Tab. 3-1 do 25 rádu a definuje ich 95 percentné percentily a maximálne hodnoty, ktoré sa líšia podľa rádu a významu pre straty v sieťach i spotrebičoch. Tieto limitné hodnoty harmonických platia dlhšie než 20 rokov, pričom predovšetkým štruktúra zariadení pripojených k NN sieťam, spotrebičov i zdrojov, sa radikálne mení a takisto sa mení aj význam vplyvu harmonických zložiek napätia na spotrebiče. Je nutné

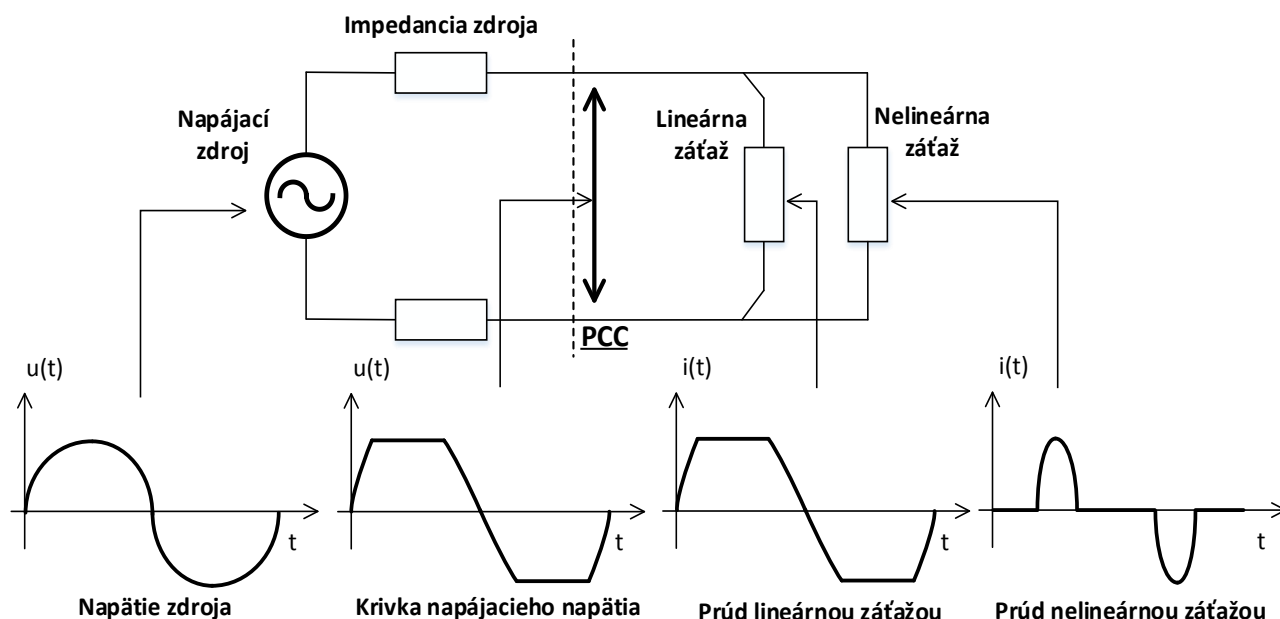
poznamenať, že jednotlivé harmonické napätia vznikajú ako dôsledok harmonických prúdov odoberaných spotrebičmi [24].

Na hladine NN sú pripojované nové typy spotrebičov, avšak siete sú v prevažnej miere vybudované pre pôvodné zloženie spotrebičov. Dynamika rozvoja NN sietí, predovšetkým z ekonomického dôvodu, nemohla dostatočne intenzívne napredovať, ako tomu bolo u spotrebičov s podstatne kratšou dobou [24].

Dôsledok problému kvality napätia z pohľadu harmonických napätí na NN hladine vzniká na základe vplyvu koexistencie spotrebičov starších generácií so spotrebičmi modernými v jednej združenej sieti [24].

6.1 Harmonické skreslenie napätia

Nelineárne spotrebiče je možné považovať za ideálne prúdové zdroje vyšších harmonických, ktoré tečú smerom od rušiacoho zariadenia do siete a na príslušnej impedancii siete vyvolávajú úbytky napätia prislúchajúce danému rádu harmonickej. Jednotlivé harmonické úbytky sa superponujú na priebeh napätia a spôsobujú tak deformáciu krivky sieťového napätia v PCC (v spoločnom napájacom bode) tak, ako je vidieť na *Obr. 6-1*. Tento deformačný efekt krivky napájacieho napätia ovplyvňuje prevádzku ostatných pripojených zariadení v sieti, najmä teda zariadenia citlivé na tvar napät'ovej krivky. Tieto deformácie sínusovej krivky vplyvom nelineárneho odberu sa nazývajú aj spätné pôsobenie na sieť [19].



Obr. 6-1 Deformácia krivky napájacieho napätia v PCC [19]

Úroveň napätia harmonických v napájacej oblasti je daná výslednou hodnotou, ku ktorej prispievajú všetky spotrebiče (zariadenia) koncových odberateľov svojimi emisiami harmonických prúdov. Úroveň harmonických napätí v sieti teda závisí najmä na impedancii siete pre danú harmonickú, amplitúde a fáze harmonických prúdov emitovaných každým odberateľom a počte zariadení, ktoré majú odberatelia pripojené v sieti. Je nutné zdôrazniť, že úroveň vyšších harmonických nie je konštantná, ale v priebehu dňa sa mení [19].

Podiel vyšších harmonických zložiek v napájacom napätí sa hodnotí buď individuálne alebo súhrnne. Individuálne sa určuje pomocou efektívnych hodnôt jednotlivých harmonických napätí, ktoré sú vzťahované k menovitému (prípadne dohodnutému) napájacemu napätiu. Konkrétne hodnoty pre jednotlivé harmonické boli uvedené v *Tab. 3-1*. Naopak súhrnne pomocou celkového činiteľa skreslenia napätia THD_U definovaného ako odmocnina zo súčtu štvorcov amplitúd harmonických zložiek U_h^2 do rádu 40 ku napätiu na základne harmonickej U_1 [19]:

$$THD_U = \frac{\sqrt{\sum_{h=2}^{40} U_h^2}}{U_1} \cdot 100 \quad (\%) \quad (6-1)$$

6.2 Deformácia napájacieho napätia

Mieru deformácie napájacieho napätia spätným pôsobením nelineárnych spotrebičov na sieť určuje vnútorná impedancia sústavy v mieste pripojenie týchto spotrebičov. Keďže reaktancia indukčnosti a kondenzátorov je silne frekvenčne závislá, impedancia siete na tónových frekvenciách sa môže podstatne líšiť od impedancie siete na frekvencii 50 Hz. V prevažnej miere má impedancia siete pri základnej harmonickej induktívny charakter, avšak môže pre niektoré harmonické frekvencie nadobúdať aj kapacitný charakter. Vzhľadom k tomu, že sa v sieti nachádzajú prvky induktívneho aj kapacitného charakteru, môžu v nej vzniknúť rezonančné javy. V prípade, že nastane rezonancia na frekvencii niektorej harmonickej môže dochádzať k značnej deformácii napät'ovej krivky a taktiež k značnému prúdovému preťažovaniu prvkov v sieti [19].

Veľkosť príspevku harmonických zložiek, prostredníctvom ktorých dochádza k deformácii napájacieho napätia a napätí v jednotlivých uzloch siete, závisí teda na celkovej úrovni generovaných harmonických zložiek a zároveň i na pripojovacích podmienkach, ktoré sa dajú charakterizovať výkonovým potenciálom alebo frekvenčnou charakteristikou impedancie v mieste pripojenia [20].

Z hľadiska vplyvu deformácie napájacieho napätia na priebeh okamžitej hodnoty prúdu, môžeme všeobecne spotrebiče rozdeliť podľa vstupnej impedancie na [20]:

- lineárne
- frekvenčne závislé
- nelineárne

Typickou lineárnou záťažou je ideálny teplotne nezávislý rezistor (žiarovka) s určitým obmedzením, pretože jeho V-A charakteristika je nezávislá na frekvencii napätia. Pri deformácii napätia bude prúd odporom sledovať napätie (budú v rovnakej fázy) a obidve spektra (napätia a prúdu) budú zhodné s rovnakým THD . Výsledný celkový účinník odberu bude rovný 1 a činný príkon bude prenášaný na všetkých harmonických [20].

Typickými frekvenčne závislými spotrebičmi sú ideálna tlmivka a ideálny kondenzátor, pretože ich V-A charakteristiky sú frekvenčne závislé. U kondenzátora je zmena prúdu rovná veľkosti kapacity a rýchlosti zmeny napätia, čo znamená, že jeho impedancia (reaktancia) je nepriamo úmerná frekvencii napätia. U tlmivky je zmena napätia na tlmivke rovná veľkosti indukčnosti a rýchlosti zmeny prúdu. Jej impedancia (reaktancia) je priamo úmerná frekvencii napätia [20].

Pokiaľ by sme pripojili tieto záťaže na napätie deformované harmonickými zložkami, spektra prúdu a napätia budú odlišné. V prípade kondenzátora sa bude amplitúdové spektrum prúdu oproti spektru napätia s rastúcim rádom harmonických zosilňovať. Naopak u tlmivky sa bude zoslabovať.

Pokiaľ bude napájacie napätie deformované, obidve zariadenia sa budú chovať ako nelineárne spotrebiče [20].

7 ANALÝZY VYŠŠÍCH HARMONICKÝCH A MEDZIHARMONICKÝCH

Periodický ustálený stav v elektrických obvodoch je reprezentovaný tým, že sa všetky obvodové veličiny menia v čase periodicky s konštantnou amplitúdou a s rovnakou periódou. Tento stav nastáva v lineárnych obvodoch, ktoré sú budené z periodických napätí a prúdov. U nelineárnych obvodov je ale tento stav odlišný. Pri periodickom buzení sa môžu vplyvom nelinearity vyskytnúť samobudené periodické kmity. Podstatou analýzy periodického ustáleného stavu je teda vyjadrenie periodických veličín pomocou harmonických zložiek. Dochádza tak ku skladaniu harmonických priebehov s rovnakou frekvenciou [1].

7.1 Fourierova transformácia

7.1.1 Analytické vyjadrenie Fourierovej transformácie

Každá spojitá funkcia s periódou opakovania T môže byť reprezentovaná sumou jednosmernej zložky, základnou harmonickou zložkou a radom sínusových zložiek vyšších rádov (nazývané harmonické) na frekvenciách, ktoré sú celistvým násobkom základnej frekvencie opakovania funkcie v časovej oblasti. Tento popis je znázornený vo vzťahu (7-1). Výsledná rada, ktorá vznikne procesom sčítania jednotlivých harmonických zložiek s rovnakou frekvenciou, stanovuje vzájomný vzťah medzi funkciou v časovej oblasti a funkciou vo frekvenčnej oblasti [3][11].

$$x(t) = a_0 + \sum_{h=1}^{\infty} \left[a_h \cdot \cos\left(\frac{2\pi ht}{T}\right) + b_h \cdot \sin\left(\frac{2\pi ht}{T}\right) \right] \quad (-) \quad \text{pre } h = 1, 2, 3, \dots \quad (7-1)$$

Kde:

$x(t)$	spojitá funkcia s periódou opakovania T
a_0	Fourierov koeficient reprezentujúci jednosmernú zložku (-)
a_h, b_h	Fourierové koeficienty (-)
T	perióda signálu (s)
h	rád harmonickej (-)
t	čas (s)

Jednosmerná zložka (stredná hodnota signálu $x(t)$) je definovaná nasledovne:

$$a_0 = \int_{-T/2}^{T/2} x(t) dt \quad (-) \quad (7-2)$$

Výpočet Fourierových koeficientov:

$$a_h = \frac{2}{T} \int_{-T/2}^{T/2} x(t) \cdot \cos\left(\frac{2\pi ht}{T}\right) \cdot dt \quad (-) \quad (7-3)$$

$$b_h = \frac{2}{T} \int_{-T/2}^{T/2} x(t) \cdot \sin\left(\frac{2\pi ht}{T}\right) \cdot dt \quad (-) \quad (7-4)$$

Spektrálny tvar Fourierovej rady:

$$x(t) = a_0 + \sum_{h=1}^{\infty} A_h \cdot \sin(h\omega t + \varphi_h) \quad (-) \quad (7-5)$$

Veľkosť harmonickej zložky:

$$A_h = \sqrt{a_h^2 + b_h^2} \quad (-) \quad (7-6)$$

Postupnosť amplitúd A_h jednotlivých harmonických zložiek sa nazýva amplitúdové spektrum.

Fázový uhol:

$$\varphi_h = \operatorname{arctg} \frac{b_h}{a_h} \quad (-) \quad (7-7)$$

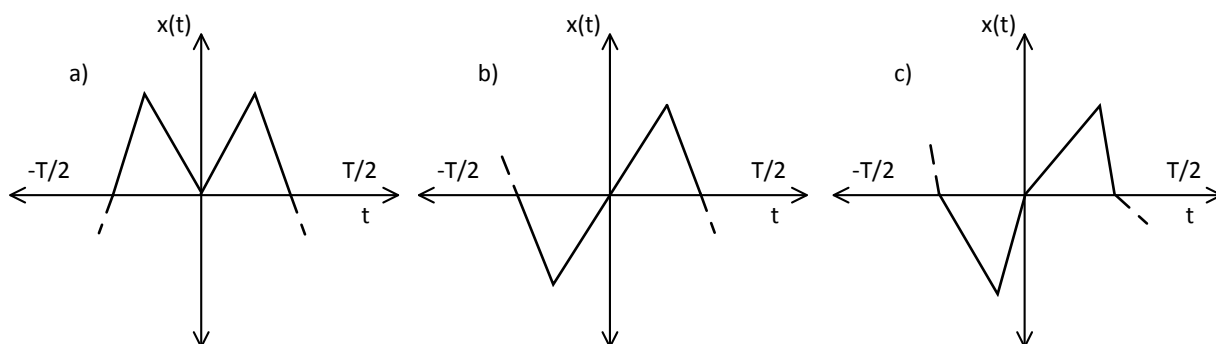
Postupnosť počiatočných fáz φ_h sa nazýva fázové spektrum.

Pokiaľ má daná analyzovaná funkcia symetrické vlastnosti (priebehy okamžitej hodnoty sú rovnaké), dá sa zjednodušiť postup výpočtu nasledovne [3][11]:

Pre párnú funkciu: $x(-t) = x(t)$ –Uvažujeme iba členy s funkciou $\cos (a_h+a_0)$,

Pre nepárnu funkciu: $x(-t) = -x(t)$ –Uvažujeme iba členy s funkciou $\sin (b_h)$,

Pre funkciu antiperiodickú: $x(-t) = -x(t \pm T/2)$ –Uvažujeme výpočet Fourierových koeficientov s funkciou $\cos/\sin (a_h, b_h)$.



Obr. 7-1 Špeciálne typy periodických funkcií a) párna, b) nepárna, c) antiperiodická [3]

V praxi sú často dostupné dáta vo forme vzorkovaného časového priebehu (digitálna meracia technika), ktorého postupnosť vzoriek je daná fixným vzorkovacím intervalom. Pri použití takejto funkcie, je nutné pre výpočet obrazu vo frekvenčnej oblasti použiť modifikovanú Fourierovu transformáciu – DFT (Discrete Fourier Transform). Prípadne upravenú DFT pre rýchlejší výpočet – FFT (Fast Fourier Transform) [3][1].

7.2 Odber nelineárnych spotrebičov

Všetky spotrebiče sa v ustálenom stave prejavujú odberom činného výkonu P a jalového výkonu Q , pričom súčin efektívnych hodnôt napätia a odoberaného prúdu určuje veľkosť zdanlivého príkonu $S = U \cdot I$ [20].

Keďže sa predpokladá, že daný odoberaný prúd je deformovaný (neharmonický) a periodický, je možné ho podľa Fourierového teoremu (využitím jeho spektrálneho tvaru) rozložiť na radu harmonických priebehov s frekvenciami, ktoré sú násobkom základnej harmonickej (50 Hz) a jednosmernú zložku prúdu I_0 a napätia U_0 [20]:

$$i(t) = \sum_{h=0}^H i_h(t) = I_0 + \sum_{h=1}^H I_{hm} \cdot \sin(h\omega_1 t + \varphi_{ih}) \quad (\text{A}) \quad (7-8)$$

Obdobne tento vzťah platí aj pre súčet okamžitých hodnôt deformovaného/skresleného napätia:

$$u(t) = \sum_{h=0}^H u_h(t) = U_0 + \sum_{h=1}^H U_{hm} \cdot \sin(h\omega_1 t + \varphi_{uh}) \quad (\text{V}) \quad (7-9)$$

Celkovú efektívnu hodnotu deformovaného priebehu harmonickými vyšších rádov môžeme vypočítať pri znalosti efektívnych hodnôt (amplitúd) jednotlivých harmonických nasledovne [3]:

$$\begin{aligned} U_{\text{celkové}} &= \sqrt{\frac{1}{T} \int_0^T \left(U_0 + \sum_{h=1}^H U_{hm} \cdot \sin(h\omega_1 t + \varphi_{uh}) \right)^2 dt} = \\ &= \sqrt{\sum_{h=0}^H U_h^2} = \sqrt{U_0^2 + U_1^2 + U_2^2 + U_3^2 + \dots} \quad (\text{V}) \quad (7-10) \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} I_{\text{celkové}} &= \sqrt{\frac{1}{T} \int_0^T \left(I_0 + \sum_{h=1}^H I_{hm} \cdot \sin(h\omega_1 t + \varphi_{ih}) \right)^2 dt} = \\ &= \sqrt{\sum_{h=0}^H I_h^2} = \sqrt{I_0^2 + I_1^2 + I_2^2 + I_3^2 + \dots} \quad (\text{A}) \quad (7-11) \end{aligned}$$

Jednotlivé harmonické prúdy konkrétnou záťažou možno počítať samostatne ako komplexné veličiny. Pokiaľ poznáme spektrum prúdu jednotlivých záťaží/e je možné pre výpočet spektra a následne priebehu celkového spoločného odoberaného prúdu použiť symbolický komplexný

prepočet. Fázorový súčet prúdov všetkých spotrebičov v danej fáze potom určuje jednak celkové zaťaženie, prípadne príspevok k zaťaženiu napájacieho systému [3].

Sčítanie fázorov prúdov jednotlivých záťaží musí byť realizované pre každú harmonickú frekvenciu zvlášť. Dôležitým predpokladom pre správny výpočet je to, že je možné sčítať fázory (komplexné veličiny) iba pokiaľ majú rovnakú frekvenciu. Fázory rôznych frekvencií sčítať nemožno [3].

Tab. 7-1 Zhrnutie vzťahov pre výpočet veľkosti a fáze jednotlivých harmonických zložiek pre napätie a prúd [3]

Fázor v zložkovom tvare	$\bar{U}_h = U_{h,re} + jU_{h,im}$	$\bar{I}_h = I_{h,re} + jI_{h,im}$
Fázor v polárnom tvare	$\bar{U}_h = U_h \cdot e^{j\varphi_{uh}}$	$\bar{I}_h = I_h \cdot e^{j\varphi_{ih}}$
Reálna časť fázoru	$U_{h,re} = \text{Re}[\bar{U}_h] = U_h \cdot \cos\varphi_{uh}$	$I_{h,re} = \text{Re}[\bar{I}_h] = I_h \cdot \cos\varphi_{ih}$
Imaginárna časť fázoru	$U_{h,im} = \text{Im}[\bar{U}_h] = U_h \cdot \sin\varphi_{uh}$	$I_{h,im} = \text{Im}[\bar{I}_h] = I_h \cdot \sin\varphi_{ih}$
Modul fázoru (veľkosť – efektívna hodnota)	$U_h = \bar{U}_h = \sqrt{U_{h,re}^2 + U_{h,im}^2}$	$I_h = \bar{I}_h = \sqrt{I_{h,re}^2 + I_{h,im}^2}$
Argument komplexného čísla (počiatočná fáza)	$\varphi_{uh} = \arctg \frac{\text{Im}[\bar{U}_h]}{\text{Re}[\bar{U}_h]}$	$\varphi_{ih} = \arctg \frac{\text{Im}[\bar{I}_h]}{\text{Re}[\bar{I}_h]}$

Pre výslednú veľkosť (fázor) každej harmonickej zložky prúdu (pri napätí sa vychádza z obdobného vzťahu) od R záťaže platí [3]:

$$\bar{I}_h = \sum_r^R {}^{(r)} \bar{I}_h \quad (\text{A}) \quad (7-12)$$

Priebehy napätia a prúdu vo väčšine prípadov neobsahujú jednosmernú zložku a sú súmerné podľa časovej osi, preto rovnice (7-8) až (7-11) budú obsahovať iba nepárne harmonické zložky. Pokiaľ sa predpokladá sínusové napájacie napätie $U=U_1$ (zjednodušený pohľad na napájanie nelineárneho spotrebiča) je vzťah pre S [20]:

$$S = UI = U_1 \cdot I = U_1 \cdot \sqrt{\sum_{h=0}^H I_h^2} = \sqrt{U_1 \cdot \sum_{h=0}^H I_h^2} = \sqrt{(U_1 \cdot I_1)^2 + U_1^2 \cdot \sum_{\substack{h=0 \\ h \neq 1}}^H I_h^2} \quad (\text{VA}) \quad (7-13)$$

Úpravou pre (prenášaný) zdanlivý výkon dosiahneme:

$$S = \sqrt{(U_1 \cdot I_1 \cdot \cos\varphi_1)^2 + (U_1 \cdot I_1 \cdot \sin\varphi_1)^2 + U_1^2 \cdot \sum_{\substack{h=0 \\ h \neq 1}}^H I_h^2} = \sqrt{P_1^2 + Q_1^2 + D^2} \quad (\text{VA}) \quad (7-14)$$

Podľa rovnice (7-14) je zdanlivý príkon (odoberaný spotrebičom) na prvej harmonickej daný súčinom napätia a prúdu na základnej harmonickej, alebo taktiež činným a jalovým príkonom (pričom $P=P_1$ a $Q=Q_1$) a na súčin napätí a prúdov rôznych frekvencií. Ten sa rovnako ako jalový výkon nepodielňa na činnej práci a nazýva sa deformačný výkon D [20].

Prenos činného výkonu do nelineárnej záťaže je teda okrem prenosu činného výkonu doprevádzaný aj prenosom deformačného výkonu. Využitie prenosovej cesty potom určuje celkový účinník odberu λ daný pomerom P/S . Matematický zápis, ktorý uvažuje aj s $\cos\varphi_1$ (účinník, ktorý nezahŕňa vplyv deformačného výkonu) je pre stav $U=U_1$ uvedený nasledovne [3]:

$$\lambda = \frac{P}{S} = \frac{P}{\sqrt{P^2 + Q^2 + D^2}} = \frac{\sqrt{P^2 + Q^2}}{\sqrt{P^2 + Q^2 + D^2}} \cdot \cos\varphi_1 \quad (-) \quad (7-15)$$

Celkovú mieru deformácie krivky striedavej veličiny popisuje celkové harmonické skreslenie prúdu THD_I , ktoré udáva pomerný obsah efektívnych hodnôt v (%) harmonických zložiek s rádom rôznym od $h=1$ v celkovom prúde (7-16), alebo ku prúdu základnej harmonickej zložky (7-17) [3]:

$$THD_{I,IEC} = \frac{\sqrt{I^2 - I_1^2}}{I} \cdot 100 \quad (\%) \quad (7-16)$$

$$THD_{I,\check{C}SN} = \frac{\sqrt{I^2 - I_1^2}}{I_1} \cdot 100 \quad (\%) \quad (7-17)$$

Spôsoby výpočtu celkového harmonického skreslenia prúdu je samozrejme viacero, záleží z ktorej normy sa vychádza. Môže to byť ČSN, ktorá je prevzatá (harmonizovaná) z Európskej normy alebo sa jedná o IEC (Medzinárodnej elektrotechnickej komisie). Obdobne tento popis platí aj pre napätie.

7.3 Vplyv odberu na charakteristiky napájacieho napätia

Generované harmonické prúdy sa šíria od zdroja (nelineárneho spotrebiča) smerom do napájacej siete a pritom „vidia“ jej výslednú impedanciu na jednotlivých frekvenciách. V dôsledkom odberu tak dochádza na impedanciách siete k úbytkom napätia a zmenám napätia v jednotlivých uzloch siete. Rozloženie harmonických prúdov v elektrizačnej sústave na jednotlivé vetvy sa riadi Ohmovým zákonom. Výpočet jednotlivých obvodov pre každú frekvenciu môže byť prevedený s použitím Théveninovej vety a princípe superpozície [3][20].

Na výpočet ustáleného chodu siete, uzlových napätí a prúdov vo vetvách, so zdrojmi harmonických prúdov, je možné použiť metódu uzlových napätí upravenú pre každý harmonický priestor. Na základe topológie a jednotlivých schém (modelov) prvkov vystupujúcich v sieti, je možné vytvoriť impedančnú vetvovú maticu, ktorej prvky sú komplexné impedancie vetiev siete pre danú harmonickú. Nelineárne spotrebiče sú nahradené ideálnymi prúdovými zdrojmi. Výpočet je realizovaný postupne pre každú frekvenciu zadaného frekvenčného spektra. Spomínaná impedančná vetvová matica je najprv prevedená na uzlovú admitančnú maticu, z ktorej je následne uskutočňovaný vlastný výpočet. Riešenie vychádza zo sústavy lineárnych rovníc s komplexnými koeficientami popísanými maticovým zápisom pre každú harmonickú frekvenciu zvlášť [20]:

$$[\bar{I}]_h = [\bar{Y}]_h \cdot [\bar{U}]_h \quad (7-18)$$

Kde:

$[\bar{I}]_h$	vektor uzlových prúdov pre h-tý rád harmonickej (A),
$[\bar{Y}]_h$	matica uzlových admitancií (Ω),
$[\bar{U}]_h$	vektor uzlových napätí k referenčnému uzlu (V).

Na základe príspevkov jednotlivých harmonických zložiek pre daný uzol je vypočítané výsledné napätie a prúd v sieti [20].

Modelovanie danej siete ale vychádza z predpokladu, že nelineárne spotrebiče sú nahradené ideálnymi prúdovými zdrojmi, ktoré sú nezávislé na zmenách napätia v sieti. Nie je tak rešpektovaná zmena parametrov odberu pri zmene napájacieho napätia [20].

Štandardne sú k dispozícii parametre prúdových zdrojov, ktoré sú určené buď výpočtom alebo meraním pre nelineárnu záťaž v istom prevádzkovom stave, ktorý zahŕňa aj podmienky napájania, vrátane priebehu napätia na svorkách. Relevantnosť výpočtu pri takto nastavených podmienkach bude zaručená iba vtedy, pokiaľ v uzle s pripojenými prúdovými zdrojmi nelineárnej záťaže bude rovnaké napätie, odpovedajúce napätiu, pri ktorom boli jednotlivé harmonické zložky pre prúdové zdroje získané. To znamená, že sa jedná len o určité modelovanie stavu siete. Predikovať výpočtom vplyv nelineárnej záťaže na napájaciu sieť nie je teda možné, hlavne pokiaľ by sa malo napätie v uzloch výrazne meniť [20].

Reálny dopad (chovanie) nelineárnych spotrebičov na sieť je možné určiť iba na základe simulácie siete s použitím reálnych modelov, teda riešiť napájaciu sieť so spotrebičmi v časovej oblasti ako prechodný dej, ktorého výsledky sú priebehy okamžitých hodnôt základných veličín napätia a prúdu [20].

Rozšírený prehľad a popis metód pre harmonickú analýzu elektrizačnej sústavy je rozdelený podľa literatúry [21][22] na:

Možné metódy harmonickej analýzy vo frekvenčnej oblasti:

- A. Direct Method (DH)
- B. Iterative Harmonic Analysis (IHA)
- C. Harmonic Power Flow Method (HPF)
- D. Dynamic Harmonic Domain Method (DHD)
- E. Coupled Y Matrix Method
- F. Multiphase Harmonic Analysis

Možné metódy harmonickej analýzy v časovej oblasti:

- A. Conventional (Brute Force) Solution
- B. Fast Periodic Steady-State Solution

Kombináciou predošlých dvoch metód vznikla tzv. „Hybrid Methods“. Poslednou metódou uvedenou v literatúre je „Hartley Transform“.

8 ZHRNUTIE DOPADU NELINEÁRNYCH SPOTREBIČOV NA SIEŤ NN

Podiel elektronických spotrebičov v domácnosti neustále rastie, čo je umožnené najmä ich cenovou dostupnosťou. Významným prispievateľom k nelineárnym odberom prúdu spôsobujúci skreslenie napätia sú aj úsporné zdroje svetla, ktoré sú z ekonomického hľadiska výhodnejšie ako klasické žiarovky, ale z pohľadu vplyvu na napájaciu sústavu pôsobia ako nežiadúci faktor [29] [30]. V súčasnosti existuje veľmi málo štúdií, ktoré by popisovali danú problematiku. Jednotlivé analýzy a pohľady ohľade úsporných zdrojov svetla a ich vplyvu na sieť sú uvedené napríklad v literatúrach [32][33].

Základným predpokladom analýzy vplyvu spätného pôsobenia nelineárnych spotrebičov na sieť je to, že každý spotrebič, z hľadiska harmonických prúdov (vyšších rádov), je reprezentovaný ako ideálny prúdový zdroj [29][30].

Znalosť impedancie (reaktancie) distribučnej sústavy v spoločnom napájacom bode na frekvenciách, na ktorých nelineárny spotrebič generuje harmonické prúdy, je dôležitá pre určenie emisií harmonických napätí a následne podľa normy ČSN EN 50 160 ed.3, kde sú uvedené ich maximálne limity v sieti, dochádza k ich vyhodnoteniu [12].

Každopádne zhodnotenie (analýza) dopadu nelineárnych spotrebičov v domácnosti na sieť NN je veľmi náročné. Jednak je to z dôvodu toho, že nepoznáme presnú skladbu spotrebičov nachádzajúcu sa v jednotlivých domácnostiach a taktiež ani súdobosť daných spotrebičov, pretože v každom časovom intervale (ročné obdobie, víkendy...) sa môže chod spotrebičov v domácnosti meniť (a tým aj veľkosť odberov). V ďalšom rade, ktorý komplikuje celú analýzu, je samotné chovanie elektrických veličín v sieti, ktoré nie sú konštantné v priebehu času, ale vplyvom neustálych zmien v elektrizačnej sústave dochádza k ich zmene. V celkovej analýze dopadu nelineárnych spotrebičov v domácnosti na NN sieť by malo byť uvažované aj s malými odbermi elektroniky rádovo v jednotkách wattov. Jedná sa o zariadenia v stand-by režime (pohotovostnom režime). Ich odber je takmer kontinuálny a neharmonický, preto predstavujú taktiež určité zastúpenie v skreslení (deformácii) napätia [30][28].

Ako už bolo spomínané, norma ČSN EN 61000-3-2 ed.4 sa zaoberá obmedzovaním harmonických prúdov injektovaných do verejnej distribučnej sústavy. Platí pre elektronické zariadenia so vstupným fázovým prúdom do 16 A. Daná norma rozdeľuje všetky elektrické spotrebiče do tried A-D a stanovuje jednotlivým harmonickým ich najväčší dovolený prúd [28].

Aby bol tvar odoberaného prúdu spotrebičom čo najmenej deformovaný a splnil limit v spomínanej norme, používajú výrobcovia rôzne typy filtrov. V zásade sa môže jednať o pasívne, prípadne aktívne filtre [28].

Z hľadiska parametrov, ktoré v najväčšej miere prekračovali limitnú hodnotu v NN meraniach stanovenú normou ČSN EN 50 160 ed.3, sú za dané sledované obdobie v rokoch 2009-2014 podľa literatúry [31]: odchýlka napájacieho napätia, flicker P_{lt} , nesymetria, THD_U , harmonické napätia. Najčastejšie prekračovaním parametrom v distribučnej sieti NN predstavovala dlhodobá miera vnemu blikania (flicker P_{lt}).

Je nutné povedať, že prekročením limitnej hodnoty z pohľadu harmonických napätí nemusí dôjsť zakaždým k fatálnym následkom v sieti. Najčastejšie sa jedná najmä o prekročenie 15. harmonickej, tak ako sa uvádza v [12][29][30]. Môže to byť spôsobené práve nevhodným

nastavením nízkej maximálnej priemernej efektívnej hodnoty, pretože neistota merania u bežne používaných analyzátorov kvality siete triedy S podľa [7] je 0,5 % U_n [31], čomu odpovedá práve hodnota danej harmonickej v norme ČSN EN 50 160 ed.3[6].

Šírenie harmonických zložiek závisí od prvkov v sieti a skratového výkonu napájacej siete. Čím je hodnota skratového výkonu vyššia v danej oblasti, tým je impedancia siete nižšia. V prípade, že by bol v takto naprojektovanej sieti významný zdroj harmonických, jeho šírenie (prejavenie) v inej časti siete, bude približne rovnaké vďaka minimálnemu útlmu.

Pokiaľ je rozvodná sieť dostatočne nadimenzovaná, tak v prípade pripojenia rušivej záťaže do miesta s vysokým skratovým výkonom dôjde k nízkej deformácii krivky napájacieho napätia [28].

Problematika kvality napätia z pohľadu vplyvu harmonických zložiek na sieť NN je omnoho rozsiahlejšia, ako bolo spomenuté. Aktuálne sa jednalo len o výpis dôležitých informácií, ktoré boli riešené počas diplomovej práce.

9 TVORBA TESTOVACIEHO MODELU DÁT

Testovací model pre analýzu dát harmonických zložiek napätia je navrhnutý v prostredí MATLAB. Princíp modelu vychádza z automatického porovnania (vyhodnotenia) dát, ktoré odpovedajú týždennému meraniu harmonických napätí. Keďže reálne dáta, ktoré boli potrebné pre overenie správnej funkčnosti navrhnutého modelu neboli z dôvodu ich ochrany uvažované, boli vytvorené dva typy testovaných dát. Prvý typ dát bol vytvorený pomocou matematickej funkcie priamo v testovacom modeli. Druhý typ dát bol naopak vytvorený za použitia textových súborov. Následné vytvorené grafické závislosti a typy tabuliek uvedené v práci slúžia na overenie správneho návrhu testovacieho modelu dát.

9.1 Realizácia modelu pre automatické vyhodnotenie a porovnanie dát v MATLABE

9.1.1 Vstupné predpoklady pre analýzu dát

Štandardne analyzátor PQ zaznamenáva z pohľadu vyšších harmonických pri týždennej perióde 1008 desaťminútových intervalov, pričom pri časovom okne 200 milisekúnd v jednom intervale merania (10 minút) vyhodnocuje 3000 periód a zaznamenáva tak obsah všetkých 50 harmonických zložiek. Významné z pohľadu normy ČSN EN 50 160 ed.3 je práve z následného spektrálneho grafu, mapujúceho stav v jednotlivých meraných fázach danej oblasti, záznam stredných efektívnych hodnôt harmonických zložiek napätia, ktoré majú v tejto norme striktné stanovený percentuálny limit a musia byť z pohľadu kvality napätia dodržané.

Nasledujúca *Tab. 9-1* predstavuje východzie parametre pre daný model. Jednotlivé intervaly a počet vzoriek (harmonických napätí) kopírujú štandardný záznam potrebný pre vyhodnotenie danej oblasti (siete) z pohľadu vyšších harmonických. Je nutné povedať, že za desaťminútový interval merania je oproti spomínanému reálnemu meraniu, zaznamenaná iba jedna hodnota (vzorka), ktorá predstavuje strednú efektívnu hodnotu napätia.

Z hľadiska porovnávania a vyhodnotenia dát boli uvažované dva nezávislé body M1 a M2, ktoré predstavujú umiestnenie v NN sieti.

Tab. 9-1 Zhrnutie parametrov pre model v MATLABE

Interval merania	10 minút
Interval hodnotenia	1 týždeň
Počet uvažovaných bodov	2
Počet vzoriek za celý týždeň	1008
Počet vzoriek pre jeden deň	144

9.1.2 Grafické závislosti modelovaných vzoriek v čase

Počiatkové podmienky pre určenie grafických závislostí v čase sú vytvorené na základe normy ČSN EN 50 160 ed.3, v ktorej sú definované limitné hodnoty harmonických napätí v sieti NN tak, ako je vidieť v *Tab. 9-2.* a *Tab. 9-3.*

Tab. 9-2 Úrovně jednotlivých nepárnych harmonických v odovzdávajúcim mieste v %

Nepárne harmonické					
Nie násobky 3		Prepočet U_h pri uvažovaní $U_n = 230V$ (V)	Násobky 3		Prepočet U_h pri uvažovaní $U_n = 230V$ (V)
Rád harmonickej h	Harmonické napätie U_h		Rád harmonickej h	Harmonické napätie U_h	
5	6,0 %	13,8	3	5,0 %	11,5
7	5,0 %	11,5	9	1,5 %	3,45
11	3,5 %	8,05	15	0,5 %	1,15
13	3,0 %	6,9	21	0,5 %	1,15
17	2,0 %	4,6			
19	1,5 %	3,45			
23	1,5 %	3,45			
25	1,5 %	3,45			

Tab. 9-3 Úrovně jednotlivých párnych harmonických v odovzdávajúcim mieste v %

Párne harmonické		
Rád harmonickej h	Harmonické napätie U_h	Prepočet U_h pri uvažovaní $U_n = 230V$ (V)
2	2,0 %	4,6
4	1,0 %	2,3
6...24	0,5 %	1,15

Tieto absolútne veľkosti napätia každej harmonickej predstavujú stredné efektívne hodnoty, vychádzajúce z minimálnych a maximálnych hodnôt v priebehu meraného desaťminútového intervalu, ktoré musia byť za normálnych prevádzkových podmienok v ľubovoľnom týždennom období po dobu 95 % týždňa rovné alebo menšie ako je uvedené v tabuľkách *Tab. 9-2,* *Tab. 9-3.*

Predmetná norma ČSN EN 50 160 ed.3 vzťahuje percentuálne veľkosti jednotlivých harmonických napätí ku nominálnej (referenčnej) veľkosti napätia v sieti, čo predstavuje 230 V. Čím vyššia je harmonická zložka napätia, tým menšiu hodnotu napätia v sieti predstavuje.

Veľkosť napätia (lokálny ukazovateľ kvality napätia) je možné chápať ako stochastickú veličinu, ktorá sa v podstate náhodne mení s časom a miestom [3].

Pri riešení danej problematiky bolo vychádzané z *Tab. 9-2,* pretože nepárne harmonické zložky napätia sú v sieti dominantnejšie, ako tie párne. Na základe prepočítania na reálnu veľkosť každej

harmonickej zložky napätia boli zadefinované ich maximálne absolútne hodnoty, ktoré z hľadiska hodnotenia kvality napätia pri intervale záznamu 10 minút, nemôžu byť prekročené.

Algoritmus porovnávania a vyhodnotenia daných vzoriek v čase pre otestovanie korektného návrhu daného testovaného modelu dát bol vytvorený pre nepárnu 15. harmonickú (0,5 % z 230 V), ktorej veľkosť predstavuje 1,15 V. Táto hodnota bola uvažovaná, pretože má definovaný najnižší limit z pohľadu danej normy. Rovnakú percentuálnu veľkosť má aj 21. harmonická. Z dôvodu ale toho, že v reálnych meraniach majú obidve harmonické zložky rôzne veľkosti (oscilácie) v čase, vytvorený model bude testovať dané dáta len pre spomínanú 15. harmonickú. Pokiaľ teda budú uvažované vzorky pod touto hodnotou, kvalita napätia bude splnená vždy.

9.1.3 Typy dát vytvorených pri testovaní návrhu daného modelu

Vstupné dáta, ktoré slúžili pre overenie správneho návrhu testovacieho modelu v prostredí MATLAB, boli vytvorené buď:

- A. Manuálne – vytvorením dát prostredníctvom textového súboru
- B. Softvérovo – pomocou matematickej funkcie vygenerovaním náhodných dát v prostredí MATLAB

V oboch prípadoch bolo vytvorených 1008 vzoriek (harmonických napätí) tak, aby ich veľkosť odpovedala približne nastavenému limitu.

V možnosti po A. boli vytvorené (náhodne) rovnaké typy dát v textových súboroch tyzdenM1 a tyzdenM2. Veľkosti dát v textových súboroch boli zhodné kvôli overeniu správnej funkčnosti testovaného modelu, ktoré ale nekopírujú reálne možný stav v praxi. Táto možnosť bude názornejšie popísaná v kapitole 9.2.

V možnosti po B. boli vygenerované náhodné dáta pomocou matematickej funkcie `rand`, z intervalu $<0,1>$ vynásobené určitým koeficientom, ktorý zvyšoval ich hodnotu. Veľkosť tohto koeficientu závisí od uvažovaného limitu. Následne boli v možnosti po B. nastavené dva typy stavov pre modelované vzorky dát:

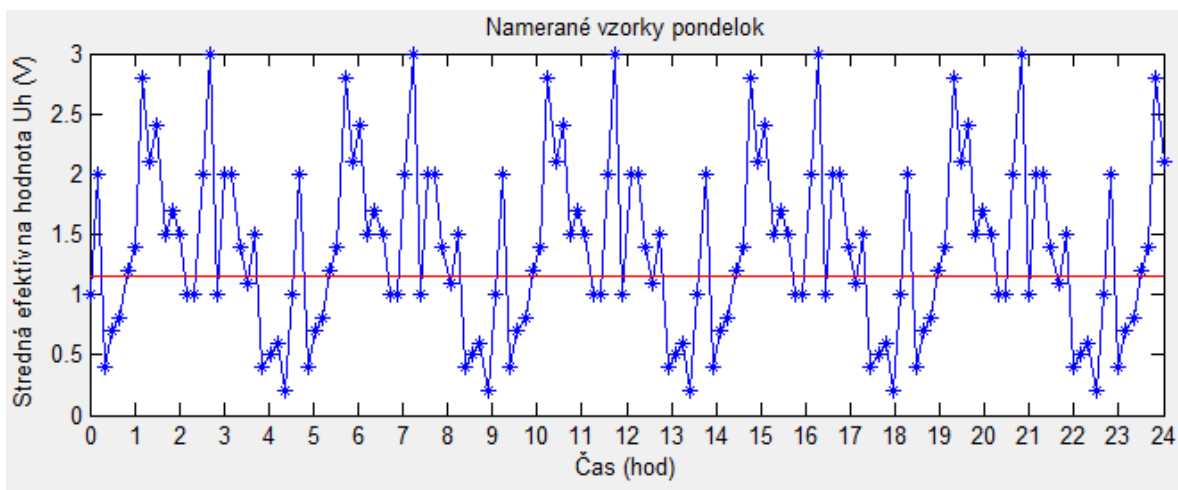
- a) oscilovanie dát harmonických zložiek napätia v čase
- b) rôzne kombinácie stavu vzoriek v danom dni rozdeleného na tri tretiny

Riešenie po a) predstavuje klasický stav v sieti, kedy jednotlivé stredné efektívne zložky harmonického napätia v čase oscilujú.

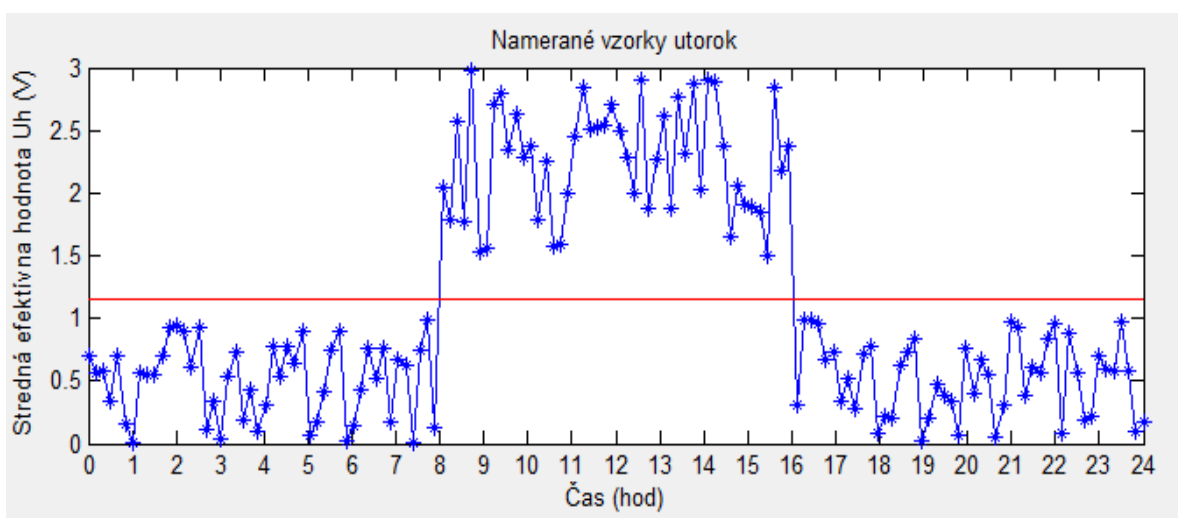
Riešenie po b) naopak poukazuje na možnosť významného zdroja (producenta) harmonických zložiek, ktorý je z hľadiska času konštantný po určitú dobu.

Možnosti po a), b) boli vytvorené v priebehu riešenia daného modelu a slúžia ako nástroj pre namodelovanie rôzneho stavu vzoriek v čase pre jednotlivé dni. Stav po a) s vyznačeným limitom pre 15. harmonickú (červená čiara) je grafický znázornený na *Obr. 9-1*. Stav po b) na *Obr. 9-2*.

Popis jedného z možných nastavení stavu po b) bude uvedený nasledovne. Z hľadiska rozloženia vzoriek v čase je každý deň možné rozčleniť na tri časové intervaly po 8 hodinách. Každý deň obsahuje 144 vzoriek, preto pripadá na jeden časový interval v tomto prípade 48 vzoriek. Modelovaním hodnôt je teda možné nastaviť to, že po dobu 8 hodín budú harmonické zložky napätia prekročené v celom intervale a vo zvyšných dvoch tretinách dňa (16 hodín) budú v stave odpovedajúcejmu dodržaniu kvality napätia z pohľadu normy.



Obr. 9-1 Oscilovanie vzoriek v čase vytvorených na základe dát v textovom súbore



Obr. 9-2 Dominantný zdroj harmonického napätia po dobu 8 hodín medzi 8:00 – 16:00 vytvorený náhodne generovanými dátami

Názvy premenných vo workspace odpovedajú dátam uvažovaných bodov **M1** a **M2** podľa Tab. 9-4.

Tab. 9-4 Názvy premenných jednotlivých dní uvažovaných pri overovaní návrhu daného modelu

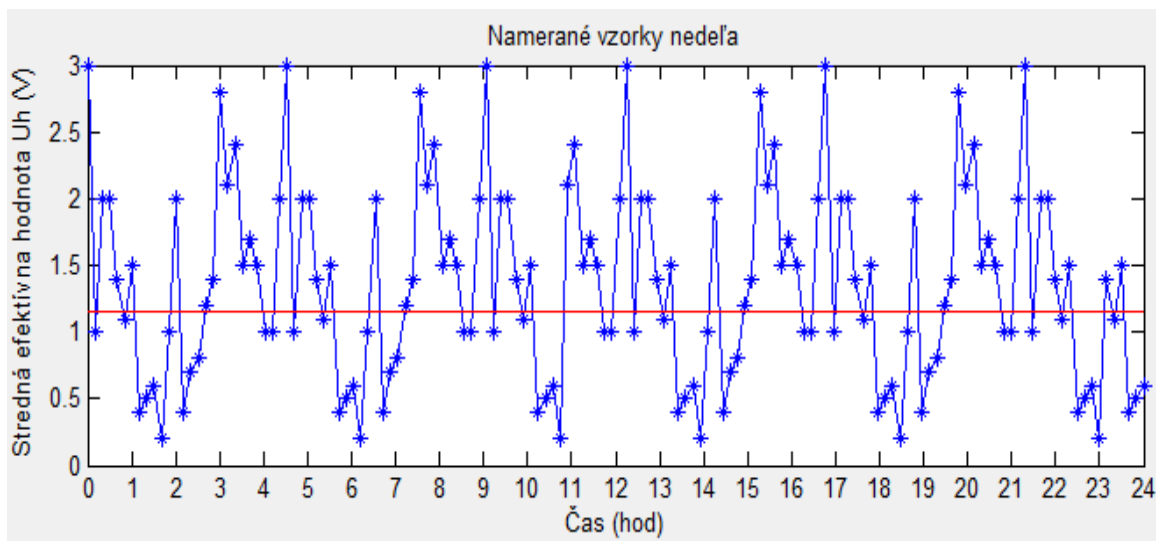
Uvažované body	M1	M2
Názvy premenných, naplnené testovanými dátami	nameraneVzorkyPondelok	nameraneVzorkyPondelok2
	nameraneVzorkyUtorok	nameraneVzorkyUtorok2
	nameraneVzorkyStreda	nameraneVzorkyStreda2
	nameraneVzorkyStvrtok	nameraneVzorkyStvrtok2
	nameraneVzorkyPiatok	nameraneVzorkyPiatok2
	nameraneVzorkySobota	nameraneVzorkySobota2
	nameraneVzorkyNedela	nameraneVzorkyNedela2

9.1.4 Typy grafov vytvorených pri testovaní návrhu daného modelu

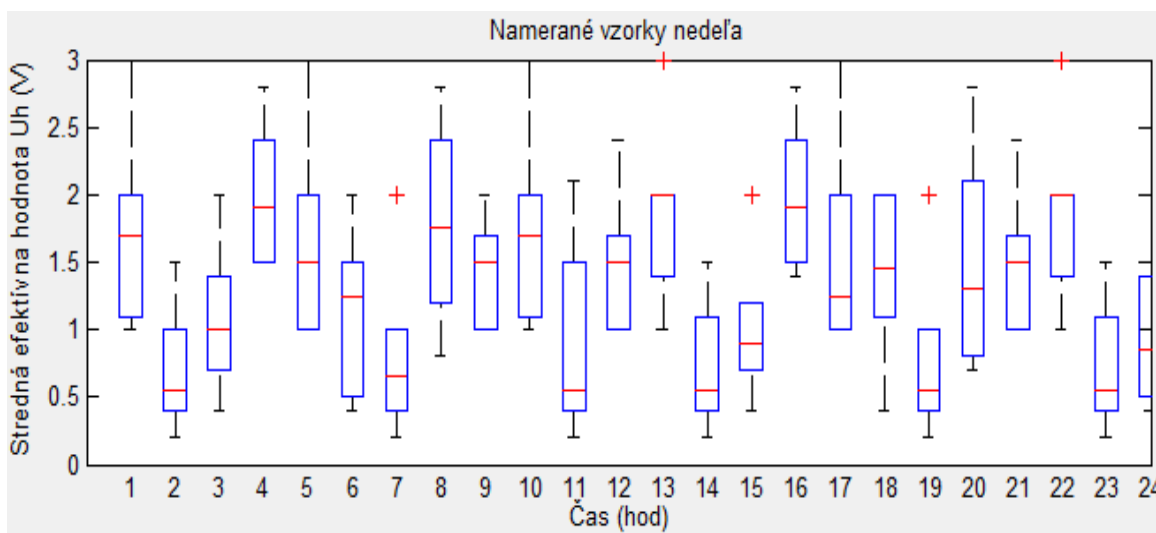
Z hľadiska užívateľského rozhrania boli vytvorené dva typy grafov zobrazovania vzoriek v čase, a to:

- bodový
- krabicový

Na *Obr. 9-3* je znázornený bodový graf a následne ekvivalentne k nemu vytvorený krabicových graf na *Obr. 9-4*.



Obr. 9-3 Bodový graf - oscilovanie modelovaných vzoriek v čase z dát v textovom súbore



Obr. 9-4 Krabicový graf - vytvorený z hodinových intervalov v čase

Z hľadiska možného vyhodnotenia kvality napätia v uvažovaných bodoch M1 a M2 bol vytvorený algoritmus, ktorý súvisí s *Obr. 9-4*. V tomto obrázku je znázornených 24 krabicových grafov, odpovedajúcim 24 hodinám. V každej hodine je zahrnutých 6 hodnôt, ktoré oscilujú v čase. Na základe zadaného limitu (1,15 V) dôjde k ich porovnávaniu z hľadiska počtu prekročení v danej hodine, pričom výsledok bude vyjadrený prostredníctvom percent. Tento algoritmus bol vytvorený na dva možné stavy.

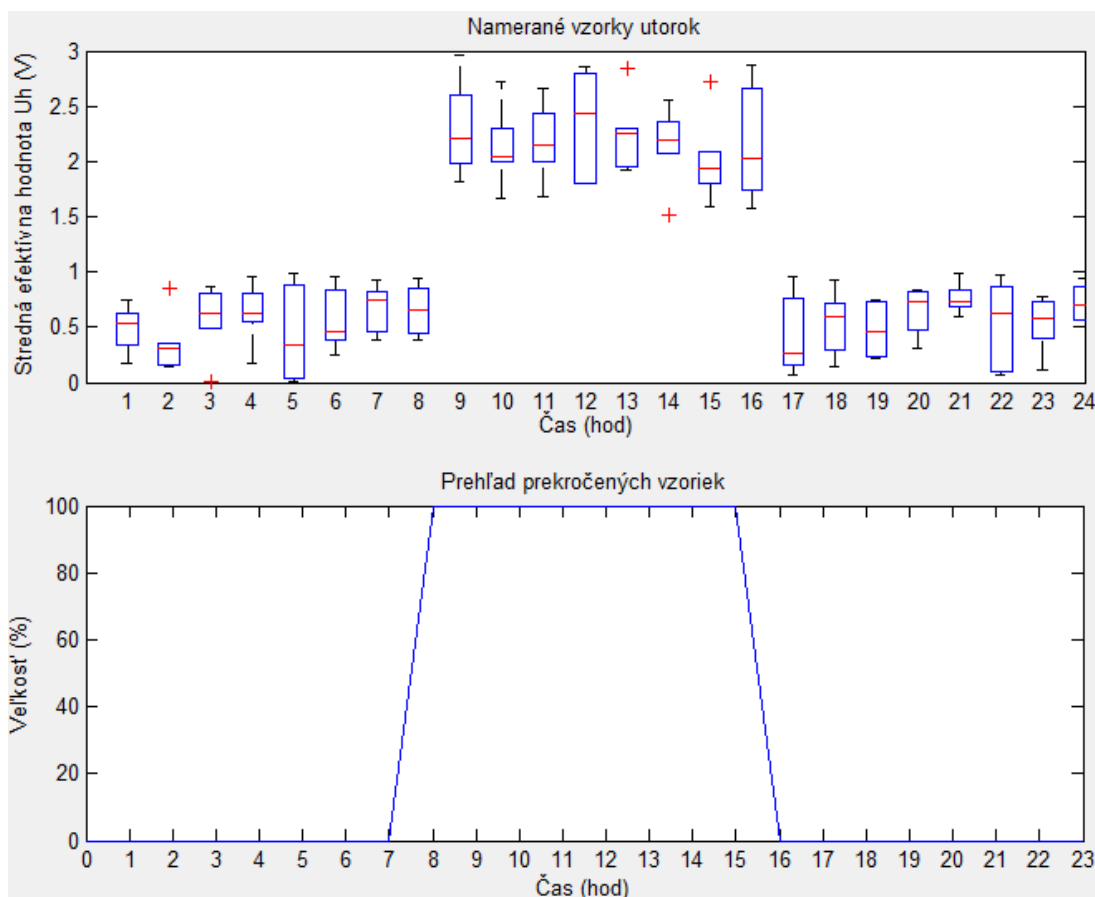
Prvý stav percentuálnych prekročení v rámci každej hodiny bol realizovaný pre jednotlivé dni v týždni. Pre konkrétnu hodinu môže teda nastať 6 typov prípadov podľa *Tab. 9-5*.

Vizualizácia pre jeden konkrétny deň (utorok) pri znázornení dát prostredníctvom krabicového grafu je zobrazená na *Obr. 9-5*. Rovnaký deň pri znázornení dát prostredníctvom bodového grafu je zobrazený na *Obr. 9-6*.

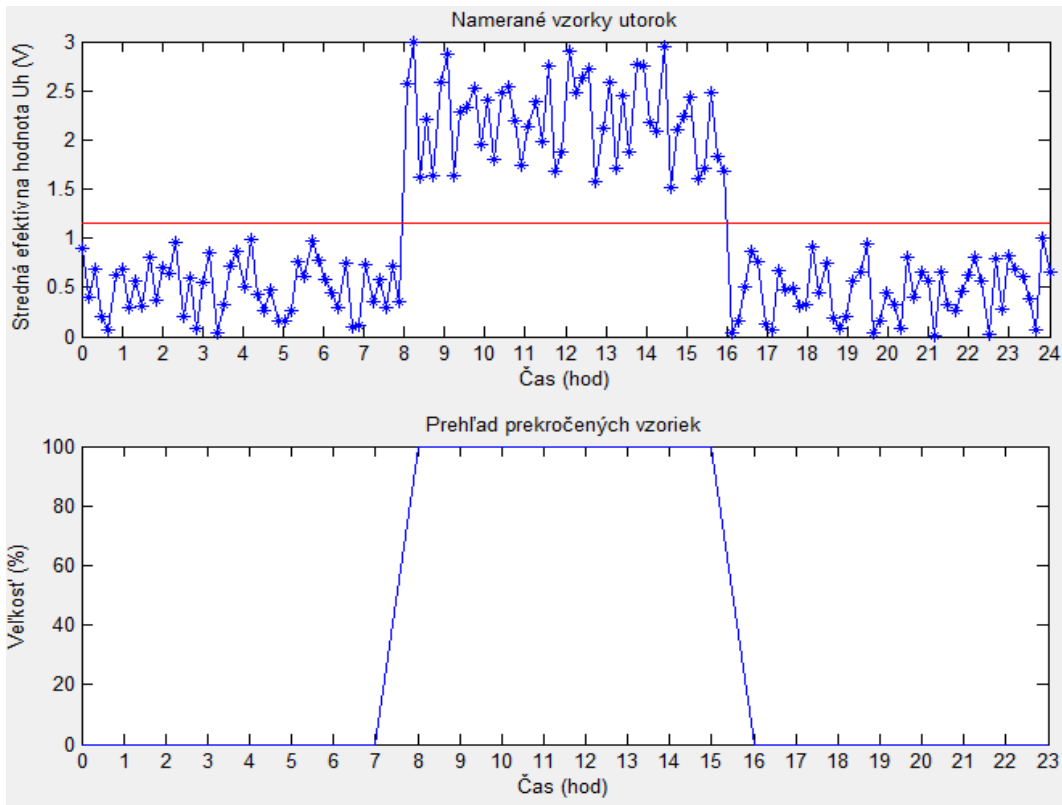
Grafické znázornenie stavu, v ktorom sú testované dáta v konkrétnom dni (pondelok) z pohľadu kvality napätia dodržané v celom rozsahu sú zobrazené opäť v dvoch stavoch. V krabicovom prevedení na *Obr. 9-7*. a v bodovom prevedení na *Obr. 9-8*.

Tab. 9-5 Typy možných kombinácií pre jednu hodinu

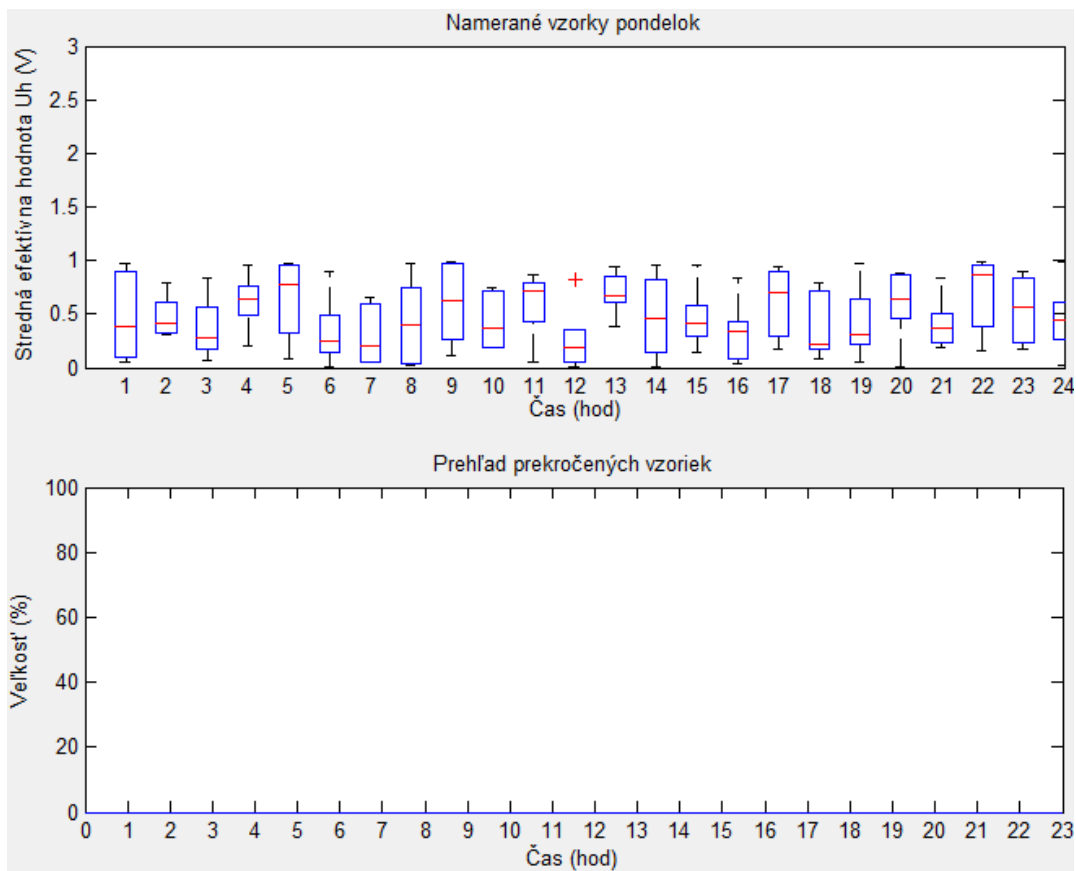
Prekročenie limitu	
Počet prekročených vzoriek	Percentuálna odchýlka voči stanovenému limitu (%)
1	16,667
2	33,333
3	50
4	66,667
5	83,333
6	100



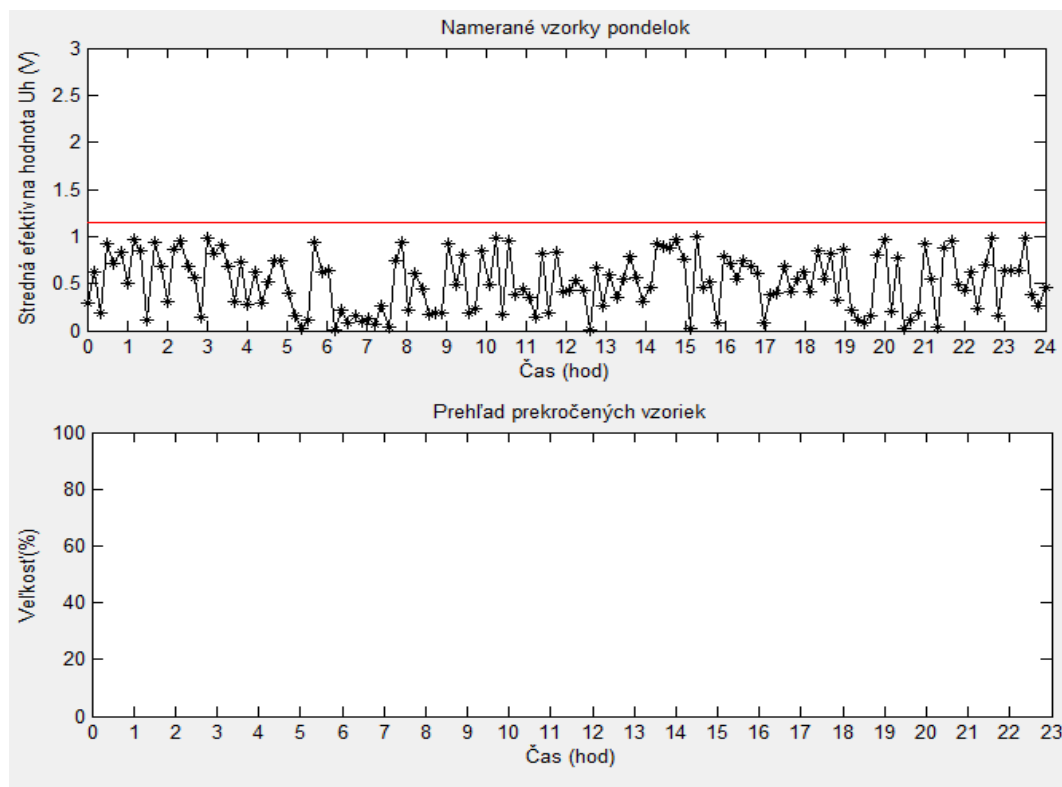
Obr. 9-5 Konkrétna vizualizácia v priebehu daného dňa vytvoreného náhodne generovanými dátami – krabicový graf



Obr. 9-6 Konkrétna vizualizácia v priebehu daného dňa vytvoreného náhodne generovanými dátami – bodový graf

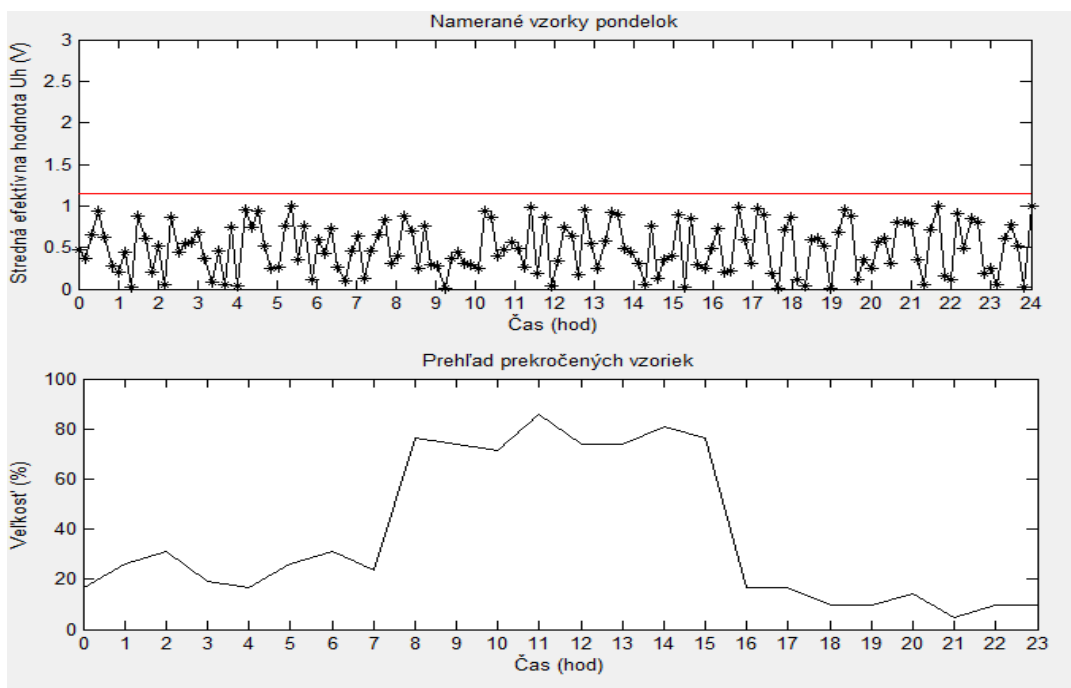


Obr. 9-7 Dodržanie kvality napätia – náhodne vygenerované dáta znázornené prostredníctvom krabicového grafu



Obr. 9-8 Dodržanie kvality napätia – náhodne vygenerované dáta znázornené prostredníctvom bodového grafu

Druhý stav odpovedá priemernej percentuálnej hodnote v rámci celého týždňa v rovnakých hodinách jednotlivých dní. Tento stav je znázornený na Obr. 9-9. Výsledkom toho grafu je to, že síce testované dáta v konkrétnom dni (pondelok) neprekračujú nastavený limit, ale priemerne sú v týchto hodinách (iných dňoch) za celý týždeň prekročené v značnej miere, a to teda najmä medzi 8:00 – 16:00 hodinou. Užívateľ tak musí pri analyzovaní dát postupovať precízne, aby nedošlo k nesprávnemu vyhodnoteniu kvality napätia.



Obr. 9-9 Priemerné znázornenie v rámci celého týždňa - náhodne vygenerované dáta

Výsledkom z týchto grafov (pre prvý a druhý stav) je to, že užívateľ má prehľad o dianí v rámci každej hodiny o tom, koľko vzoriek prekročilo spomínaný limit. Na základe percentuálnej veľkosti je tak možné získať prvotnú informáciu o počte prekročených vzoriek v rámci dňa, respektíve priemerne (v rovnakých hodinách daných dňoch) z celého týždňa a porovnať tieto výsledky vzájomne medzi uvažovanými bodmi (dňami v daných bodoch), či nedošlo k nejakým spoločným prienikom, prípadne k nepatrným rozdielom. Konkrétne veľkosti hodnôt v jednotlivých dňoch a priemerných hodnôt v rámci celého týždňa/týždňov a ich vzájomné porovnania, sú znázornené vo workspace podľa *Tab. 9-6*.

Tab. 9-6 Výpis vzoriek percentuálnych prekročení

Popis	Názov premenných vo workspace	
	M1	M2
Uvažovaný bod	tyzM1	tyzM2
Všetky percentuálne hodnoty v týždni	tyzM1	tyzM2
Priemerná veľkosť hodnôt v celom týždni	tyzM1priemer	tyzM2priemer
Porovnanie priemerných vzoriek v rámci celého týždňa v uvažovaných bodoch M1 a M2	porovnaniepriemernychVzoriekM1M2	
Percentuálne hodnoty v danom dni	denPercentaM1	denPercentaM2
Percentuálne porovnanie vzoriek v daných dňoch	porovnanieVzoriekM1M2	

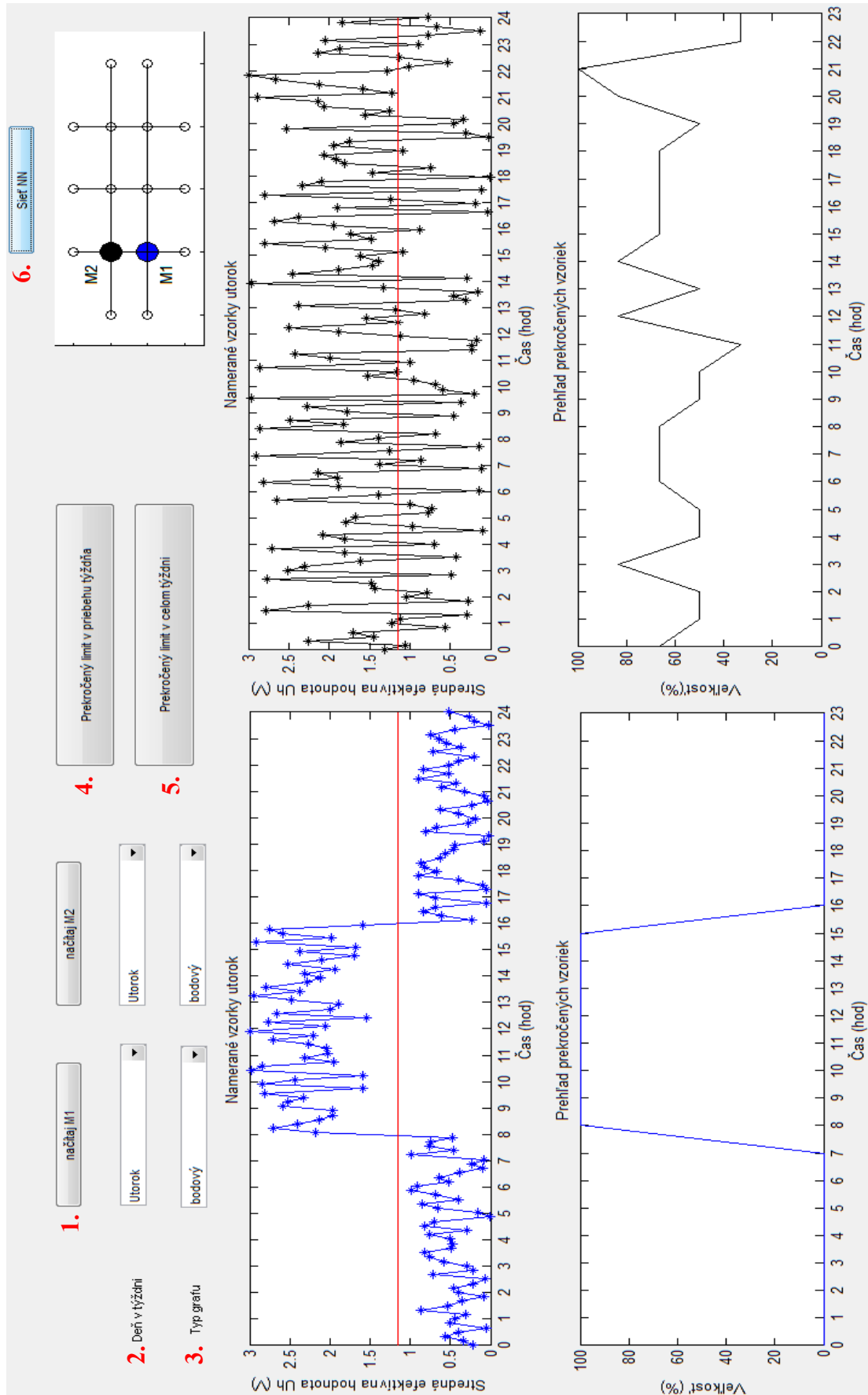
Grafy a popísané funkcie odpovedajú z pohľadu ovládania obidvom uvažovaným bodom (M1 a M2). Celkovo bolo vytvorených 44 rôznych typov grafov, pričom z tohto počtu bolo 14 grafov (bodových), 14 grafov (krabicových), 14 grafov pre percentuálne prekročenie vzoriek v rámci jednotlivých dní a 2 grafy pre znázornenie priemerných percentuálnych prekročení v rámci celého týždňa.

Z hľadiska väčšej prehľadnosti a komplexnejšej manipulácie bolo teda nutné vytvoriť grafické užívateľské rozhranie GUI (Graphical User Interface), ktoré by obsahovalo všetky funkcie a možnosti popísané vyššie. Výsledná grafická vizualizácia daného modelu je znázornená na *Obr. 9-10*.

Názvy súborov v MATLABE, ktoré obsahuje daný model sú zhrnuté podľa *Tab. 9-7* nasledovne:

Tab. 9-7 Predmetné názvy súborov vytvorených v MATLABE

Názov súboru	Funkcia
GUI (MATLAB Code)	Nosný kód (celková štruktúra)
GUI (MATLAB Figure)	Grafické prevedenie (rozloženie grafov a funkcií)
hodinyMinuty	Kód pre vytvorenie formátu času v jednotlivých kombináciách (HH:MM)
Textové súbory (tyzdenM1, tyzdenM2)	Vytvorené hodnoty vzoriek (manuálne)
InicializujDataPreCasGraf	Vytvorenie formátu času v GUI (po hodinách)



Obr. 9-10 Uživatelské rozhranie vytvorené v GUI

Legenda: 1. Načítanie vstupných dát

2. Výber dňa v týždni

3. Voľba typu grafu

4. Percentuálne prekročenie limitu v rámci jednotlivých dní

5. Priemerné percentuálne prekročenie limitu v rámci celého týždňa

6. Ilustračný obrázok siete NN

9.2 Typy tabuliek vytvorených pri testovaní návrhu daného modelu

Tabuľky, ktoré boli vytvorené z jednotlivých kombinácií dní v uvažovaných bodoch M1 a M2 pre automatické vyhodnotenie a porovnanie dát je možno rozdeliť na tri typy (A., B. a C.), pričom tento popis postupne odpovedá daným stĺpcom v tabuľkách *Tab. 9-8* až *Tab. 9-13*:

- A. výpis všetkých hodnôt harmonických napätí v čase
- B. výpis hodnôt, ktoré majú rovnakú hodnotu v čase
- C. výpis percentuálneho prekročenia hodnoty oproti norme v danom čase

Pri uvažovaní vzájomného porovnania a vyhodnotenia daných bodov sú tieto tri typy tabuliek (A., B., a C.) doplnené o index (1., 2., a 3.) podľa *Tab. 9-10* až *Tab. 9-13* kvôli vyššiemu počtu kombinácií jednotlivých dní.

Pre obidva typy dát je možné vytvoriť jednotlivé typy tabuliek. Odlišnosť nastáva v tom, že v reálnych meraniach ale nikdy nenastane stav, kedy porovnávané dáta v jednotlivých bodoch budú úplne rovnaké. Môžu sa len približne rovnať (ako to je v prípade náhodne vygenerovaných dát v MATLABE). Keďže sa jedná o testovací model dát, bolo uvažované aj s variantom, že dáta môžu byť rovnaké (dáta vytvorené v textových súboroch).

Tieto rôzne typy tabuľkového vyhodnotenia a porovnania testovaných dát boli vytvorené za účelom komplexnejšieho prehľadu užívateľa pri zisťovaní a hodnotení zmien kvality napätia.

Typ tabuliek po A. odpovedá celkovému pohľadu na testované hodnoty v čase. Užívateľ tak má k dispozícii celkový prehľad dát v časovom formáte 24 hodín.

Typ tabuliek po B. slúži na zistenie rovnakých hodnôt (periodicity) javov v čase, ktoré platí pre spomínané dáta z textových súborov.

V prípade, že by dané vzorky v čase predstavovali vyššiu veľkosť ako stanovuje norma (približne sa rovnajú v jednotlivých dňoch v čase), je možné indikovať cyklický problém ohľadne kvality napätia.

Z hľadiska vzájomného porovnania dvoch meraných bodov M1 a M2 pri vyhodnocovaní kvality napätia by mohlo byť zaujímavé to, či nedôjde pri porovnávaní nameraných dát ku ich zmene v prípade, že by meranie prebiehalo synchronne (v rovnakom čase). Veľkosť tejto zmeny by mohla závisieť od toho, či sa v jednom z meraných bodov nachádza významný zdroj harmonických (prípadne v uzle blízkom meraného bodu). V prípade takéhoto uvažovania by mali byť dáta v druhom meranom bode znížené s ohľadom na elektrickú vzdialenosť medzi danými bodmi.

Typ tabuliek po C. slúži na výpis percentuálneho prekročenia danej hodnoty oproti norme v čase, čo predstavuje z pohľadu vyhodnotenia kvality napätia najdôležitejší predpoklad, od ktorého závisí stanovenie toho, či je alebo nie je v uvažovanej oblasti dodržaná kvalita napätia.

Východným predpokladom pre určenie percentuálneho prekročenia pri jednotlivých kombináciách dní v rámci uvažovaných bodov M1 a M2 bola ich vzájomná zhoda, z ktorej boli uvažované tie hodnoty, ktoré prevyšujú nastavený limit (veľkosť harmonickej). Následne bola ich odchýlka v čase oproti tomuto limitu uvedená v konkrétnych tabuľkách podľa *Tab. 9-12* a *Tab. 9-13*.

Jednotlivé typy tabuliek s ich popisom sú znázornené na nasledujúcich stranách. Celkovo bolo vytvorených 245 typov kombinácií jednotlivých dní v uvažovaných bodoch M1 a M2.

Tab. 9-8 Jednotlivé kombinácie dní v počte 49 pre uvažovaný bod M1

Poradie	Názov premennej vo workspace		
0.	A.	B.	C.
1.	PondelokUtorokM1	PondelokUtorokZhodaM1	PondelokPrekrocenePercentaM1
2.	PondelokStredaM1	PondelokStredaZhodaM1	UtorokPrekrocenePercentaM1
3.	PondelokStvrtokM1	PondelokStvrtokZhodaM1	StredaPrekrocenePercentaM1
4.	PondelokPiatokM1	PondelokPiatokZhodaM1	StvrtokPrekrocenePercentaM1
5.	PondelokSobotaM1	PondelokSobotaZhodaM1	PiatokPrekrocenePercentaM1
6.	PondelokNedelaM1	PondelokNedelaZhodaM1	SobotaPrekrocenePercentaM1
7.	UtorokStredaM1	UtorokStredaZhodaM1	NedelaPrekrocenePercentaM1
8.	UtorokStvrtokM1	UtorokStvrtokZhodaM1	
9.	UtorokPiatokM1	UtorokPiatokZhodaM1	
10.	UtorokSobotaM1	UtorokSobotaZhodaM1	
11.	UtorokNedelaM1	UtorokNedelaZhodaM1	
12.	StredaStvrtokM1	StredaStvrtokZhodaM1	
13.	StredaPiatokM1	StredaPiatokZhodaM1	
14.	StredaSobotaM1	StredaSobotaZhodaM1	
15.	StredaNedelaM1	StredaNedelaZhodaM1	
16.	StvrtokPiatokM1	StvrtokPiatokZhodaM1	
17.	StvrtokSobotaM1	StvrtokSobotaZhodaM1	
18.	StvrtokNedelaM1	StvrtokNedelaZhodaM1	
19.	PiatokSobotaM1	PiatokSobotaZhodaM1	
20.	PiatokNedelaM1	PiatokNedelaZhodaM1	
21.	SobotaNedelaM1	SobotaNedelaZhodaM1	

Pre uvažovaný bod M2 bolo postupované obdobne ako v M1, akurát došlo pri jednotlivých kombináciách dní ku zmene indexu z M1 na M2. Názorná ukážka je znázornená v Tab. 9-9.

Tab. 9-9 Jednotlivé kombinácie dní v počte 49 pre uvažovaný bod M2

Poradie	Názov premennej vo workspace		
0.	A.	B.	C.
1.	PondelokUtorokM2	PondelokUtorokZhodaM2	PondelokPrekrocenePercentaM2
2.	PondelokStredaM2	PondelokStredaZhodaM2	UtorokPrekrocenePercentaM2
3.	PondelokStvrtokM2	PondelokStvrtokZhodaM2	StredaPrekrocenePercentaM2
...

Pre uvažované kombinácie dní v M1 a M2 je názorná ukážka názvov uvedená v Tab. 9-10 až Tab. 9-13.

Tab. 9-10 Jednotlivé kombinácie dní v počte 49 pre uvažované body M1, M2

Poradie	Názov premennej vo workspace		
0.	A1.	A2.	A3.
1.	PondelokM1UtorokM2	PondelokM2UtorokM1	PondelokM1M2
2.	PondelokM1StredaM2	PondelokM2StredaM1	UtorokM1M2
3.	PondelokM1StvrtokM2	PondelokM2StvrtokM1	StredaM1M2
...

Tab. 9-11 Jednotlivé kombinácie dní v počte 49 pre uvažované body M1,M2

Poradie	Názov premennej vo workspace		
0.	B1.	B2.	B3.
1.	PondelokUtorokZhodaM1M2	PondelokUtorokZhodaM2M1	PondelokM1M2zhoda
2.	PondelokStredaZhodaM1M2	PondelokStredaZhodaM2M1	UtorokM1M2zhoda
3.	PondelokStvrtokZhodaM1M2	PondelokStvrtokZhodaM2M1	StredaM1M2zhoda
...

Tab. 9-12 Jednotlivé kombinácie dní v počte 42 pre uvažované body M1,M2

Poradie	Názov premennej vo workspace	
0.	C1.	C2.
1.	PondelokUtorokPrekrocenePercentaM1M2	PondelokUtorokPrekrocenePercentaM2M1
2.	PondelokStredaPrekrocenePercentaM1M2	PondelokStredaPrekrocenePercentaM2M1
3.	PondelokStvrtokPrekrocenePercentaM1M2	PondelokStvrtokPrekrocenePercentaM2M1
...

Tab. 9-13 Jednotlivé kombinácie dní v počte 7 pre uvažované body M1,M2

Poradie	C3.
1.	PondelokPrekrocenePercentaM1M2
2.	UtorokPrekrocenePercentaM1M2
3.	StredaPrekrocenePercentaM1M2
...	...

Pre lepšiu orientáciu výpisu daných hodnôt v MATLABE bola pre ilustráciu vytvorená tabuľka, kde je zobrazený náhľad na rozloženie jednotlivých stĺpcov a riadkov v matici. Prvé dva riadky v stĺpci „Poradie v tabuľke“ (**1** a **2**) zobrazujú formát času a to teda HH (hodiny) a MM (minúty). Záznam merania je uvažovaný od 0:0 do 23:50. Zvyšné dva riadky v stĺpci „Poradie v tabuľke“ (**3** a **4**) predstavujú hodnoty vzájomne porovnávajúcich dní, konkrétne pondelok (červená farba) a utorok (zelená farba). Ich veľkosť je uvažovaná ako stredná efektívna hodnota harmonického napätia. Celkovo je tak za jeden deň zaznamenaných 144 vzoriek zobrazených v 144 stĺpcoch. Všetky tri typy tabuliek (A.,B. a C.) znázornené v Tab. 9-14 až Tab. 9-19 boli pri uvažovaní dát z textového súboru pre názornú ukážku vytvorené v rámci bodu M1. Rovnaké výsledky je možno znázorniť aj pri uvažovaní bodu M2 a pri ich vzájomnom porovnaní.

Tab. 9-14 Zobrazenie jedného typu kombinácie celkového výpisu dát pre uvažovaný bod M1 – ilustračný pohľad (A.)

Poradie v tabuľke	Názov premennej vo workspace				
	PondelokUtorokM1				
	1	2	3	...	144
1(HH)	0	0	0	...	23
2(MM)	0	10	20	...	50
3	1	2	0.4
4	2.4	1.5	1.7

Tab. 9-15 Zobrazenie jedného typu kombinácie celkového výpisu dát pre uvažovaný bod M1 – reálny pohľad (A.)

	1	2	3	4	5	6	7
1	0	0	0	0	0	0	1
2	0	10	20	30	40	50	0
3	1	2	0.4000	0.7000	0.8000	1.2000	1.4000
4	2.4000	1.5000	1.7000	1.5000	1	1	2

Tab. 9-16 Zobrazenie jedného typu kombinácie rovnakých dát pre uvažovaný bod M1 – ilustračný pohľad (B.)

Poradie v tabuľke	Názov premennej vo workspace				
	PondelokUtorokZhodaM1				
	1	2	3	4	5
1(HH)	3	7	12	16	21
2(MM)	10	40	10	40	10
3	2	2	2	2	2
4	2	2	2	2	2

Tab. 9-17 Zobrazenie jedného typu kombinácie rovnakých dát pre uvažovaný bod M1 – reálny pohľad (B.)

	1	2	3	4	5	6	7
1	3	7	12	16	21		
2	10	40	10	40	10		
3	2	2	2	2	2		
4	2	2	2	2	2		

Tab. 9-18 Zobrazenie jedného typu kombinácie prekročených dát (v percentách oproti norme) pre uvažovaný bod M1 – ilustračný pohľad (C.)

Poradie v tabuľke	Názov premennej vo workspace				
	PondelokPrekrocenePercentaM1				
	1	2	3	4	...
1(HH)	0	0	1	1	...
2(MM)	10	50	0	10	...
3*	0.3696	0.0217	0.1087	0.7174	...

Tab. 9-19 Zobrazenie jedného typu kombinácie prekročených dát (v percentách oproti norme) pre uvažovaný bod M1 – reálny pohľad (C.)

	1	2	3	4	5	6
1	0	0	1	1	1	1
2	10	50	0	10	20	30
3	0.3696	0.0217	0.1087	0.7174	0.4130	0.5435

*Pokiaľ mala harmonická zložka napätia v čase (v danom dni) vyššiu hodnotu, ako aktuálne nastavený limit (1,15 V) uvádzaný v norme ČSN EN 50 160 ed.3, bude vypísaný jej čas a percentuálna odchýlka od normy.

Všetky tieto kombinácie pre dané uvažované body boli zhrnuté do jednotlivých tabuliek, ktoré odpovedajú popisu podľa Tab. 9-20. Vyhľadanie konkrétnej kombinácie dní v tejto tabuľke zodpovedá **písmenu v stĺpci** a **poradiu** uvedeného v Tab. 9-8 až Tab. 9-13.

Tab. 9-20 Prehľad názvov výsledných tabuliek v MATLAVE

Popis	Názov premennej vo workspace
Uvažovaný bod	M1
Uvažovaný bod	M2
Výpis všetkých hodnôt v M1 a M2	M3
Rovnaké hodnoty v M1 a M2	M4
V rovnakých hodnotách v M1 a M2 si zapamätajú tie, ktoré prekročili limit a zisti ich percentuálnu odchýlku v čase od normy	M5

Daný testovací model dokáže analyzovať aj dáta inej harmonickej zložky, pričom je nutné v hlavnom súbore spraviť potrebné korekcie podľa Tab. 9-21. Pre správnu činnosť (nastavenie) musia byť všetky zmeny limitu, závisiaceho od veľkosti harmonickej zložky v norme, rovnaké. Z hľadiska jednoduchosti vyhľadávania jednotlivých sekcií je možné použiť v hlavnom zdrojovom kóde klávesovú skratku na vyhľadávanie v súbore.

Tab. 9-21 Zmena dát pre testovanie inej veľkosti harmonickej zložky napätia

Popis v časti, kde dôjde ku zmene v zdrojovom kóde	Názov premennej v zdrojovom kóde	
	M1	M2
V jednotlivých typoch kombinácií dní	limit0	
Prekročenie limitu (každý deň)	limit1	limit2
Prekročenie limitu za celý týždeň - priemerná percentuálna hodnota (%)	limit3	limit4
Popis grafu M1/M2 + boxplot M1/M2	limitM1	limitM2
Zmena limitu (Pokiaľ dáta z hľadiska veľkosti nezodpovedajú nastaveniu y-ovej osi, je nutné ju dodatočne upraviť)	ylim	

10 ZÁVER

V teoretickej časti sú popísané charakteristiky napätia v DS NN podľa normy ČSN EN 50 160 ed.3, ktorá rozdeľuje jednotlivé parametre na priebežné javy a napät'ové udalosti. V nej je definovaný ich maximálny limit, ktorý z pohľadu kvality napätia nemôže byť prekročený.

Monitorovanie a triedy presnosti meracích prístrojov, vyhodnocujúce jednotlivé parametre z pohľadu dodržania ich maximálneho limitu, sú odlišné. Najpresnejšia a najnáročnejšia metóda uvádzaná v norme ČSN EN 61000-4-30 ed.3 je trieda presnosti A. Nasleduje trieda S. Táto trieda presnosti je miernejšia ako trieda A., avšak dokáže poskytnúť relevantné údaje postačujúce pre vyhodnotenie kvality napätia. Poslednou je trieda presnosti B, ktorej metódy nesmú byť použité pre nové prístroje a slúži iba k podpore existujúcich prístrojov.

V poslednej dobe je čoraz väčšia snaha o kontinuálne monitorovanie NN sietí, ktoré sa v súčasnosti vykonávajú iba v prípade sťažnosti, abnormálnych stavoch alebo rozvíjajúcej sa siete. Existuje tak rada konceptov a možností obojsmernej komunikácie (výmene dát) medzi prevádzkovateľom DS a odberateľom, respektíve uzlami siete. Prínosom z pohľadu dispečera by tak bol komplexnejší prehľad diania v sieti, naopak pre zákazníka väčšia informovanosť o spotrebe elektrickej energie.

Dôležitou súčasťou pri meraní elektrických veličín je správna organizácia merania a korektné nastavenie analyzátoru PQ v ohľade na intervaly merania, hodnotenia a agregácie odpovedajúce danému parametru kvality napätia. Základným časovým vyhodnocovacím intervalom pre vyhodnotenie celej rady parametrov v súlade s normou ČSN EN 61000-4-30 ed.3 je desať periód signálu pre sieť s menovitou frekvenciou 50 Hz.

Keďže vplyvom spoločenskej objednávky a ekonomického tlaku prichádzajú na trh zariadenia s menšími rozmermi, hmotnosťou, nižšou cenou, jednoduchou dostupnosťou a hlavne s vyšším podielom elektroniky dochádza pri ich pripojovaní do siete k nárastu nelineárnych odberov prúdu, väčšieho zaťažovania siete a následne ku skresleniu (deformácii) napájacieho napätia v elektrizačnej sústave. Dôsledkom odoberaných harmonických prúdov vznikajú harmonické napätia, ktoré majú v norme ČSN EN 50 160 ed.3 definované maximálne percentuálne hodnoty, ktoré musia byť za normálnych prevádzkových podmienok v ľubovoľnom týždennom období 95 % desaťminútových stredných efektívnych hodnôt napätí každej harmonickej menšie alebo rovné hodnote podľa *Tab. 3-1*.

Pri analýze vplyvu nelineárneho spotrebičov na charakteristiky napätia sa vychádza z toho, že daný odoberaný prúd je deformovaný a periodický. Na základe toho je možné podľa Fourierového teorému (využitím jeho spektrálneho tvaru) rozložiť tento odber na radu harmonických priebehov s frekvenciami, ktoré sú násobkom základnej harmonickej (50Hz) a jednosmernej zložky. Fázorový súčet prúdov všetkých spotrebičov v danej fázy potom určuje jednak celkové zaťaženie, prípadne príspevok k zaťaženiu napájacieho systému.

Na základe ustáleného chodu, vychádzajúceho z modelov jednotlivých prvkov a topológii siete, je možné vypočítať výsledné prúdové a napät'ové pomery v sieti. Modelovanie danej siete ale vychádza z predpokladu, že nelineárne spotrebiče sú nahradené ideálnymi prúdovými zdrojmi, ktoré sú nezávislé na zmenách napätia v sieti. Nie je tak rešpektovaná zmena parametrov odberu pri zmene napájacieho napätia. Reálny dopad (chovanie) nelineárnych spotrebičov na sieť je tak možné určiť iba na základe simulácie siete s použitím reálnych modelov, teda riešiť napájaciu sieť

so spotrebičmi v časovej oblasti ako prechodný dej, ktorého výsledky sú priebehy okamžitých hodnôt základných veličín napätia a prúdu.

V praktickej časti práce je vytvorený testovací model dát, ktorý dokáže automaticky vyhodnotiť stav kvality elektrickej energie z pohľadu vyšších harmonických napätí v programátorskom prostredí MATLAB. Keďže reálne dáta, ktoré boli potrebné pre overenie správnej funkčnosti navrhnutého modelu neboli z dôvodu ich ochrany uvažované, boli vytvorené dva typy testovaných dát.

Na základe teoretických predpokladov sú určené jednotlivé intervaly a počet vzoriek (harmonických napätí), ktoré kopírujú štandardný záznam potrebný pre vyhodnotenie danej oblasti (siete) z pohľadu vyšších harmonických.

Z pohľadu užívateľa je vytvorené grafické a tabuľkové znázornenie stavu vzoriek v čase. Limit, oproti ktorému nastane automatické vyhodnotenie a porovnanie uvažovaných dát je nastavený pre nepárnu 15. harmonickú, ktorá ma absolútnu veľkosť napätia 1,15 V prepočítanú z referenčnej hodnoty napätia 230 V.

Pre overenie korektnosti návrhu daného modelu sú realizované dva typy vstupných dát, a to manuálne (formou textového súboru) a softvérovo (vygenerovaním náhodných dát).

Následne sú vytvorené dva typy grafov (krabicový a bodový), ktoré obidva majú svoje opodstatnenie. Bodový graf predstavuje štandardný stav v sieti, kedy harmonické napätia (stredné efektívne hodnoty) v priebehu 10 minútových záznamov oscilujú v čase. Naopak krabicový graf je vytvorený na základe algoritmu, ktorý percentuálne vyhodnocuje prostredníctvom stanoveného limitu v každej hodine počet prekročených vzoriek. Počet prekročení je následne takto nastavený v rámci jednotlivých dní a aj priemerne v rámci celého týždňa.

Z hľadiska väčšej prehľadnosti a komplexnejšej manipulácie jednotlivých grafických závislostí je vytvorené grafické užívateľské rozhranie GUI (Graphical User Interface).

Tabuľky, ktoré sú vytvorené z jednotlivých kombinácií dní v uvažovaných bodoch M1 a M2 pre automatické vyhodnotenie a porovnanie dát je možno rozdeliť na tri typy, a to výpis všetkých hodnôt harmonických napätí v čase, výpis hodnôt, ktoré majú rovnakú hodnotu v čase, výpis percentuálneho prekročenia hodnoty oproti norme v danom čase.

V danom modeli je možnosť testovať aj dáta inej harmonickej zložky, pričom je nutné v hlavnom súbore spraviť potrebné korekcie podľa *Tab. 9-21*.

10.1 Návrh ďalšieho riešenia

Keďže navrhnutý model vyhodnocuje z pohľadu kvality napätia dva nezávislé body a pracuje so vstupnými dátami, ktoré sa navzájom v uvažovaných bodoch neovplyvňujú, bola by možnosť ho rozšíriť o väčší počet uvažovaných bodov a následne vyhodnocovať ich vzájomné ovplyvňovanie prostredníctvom elektrickej vzdialenosti medzi danými uzlami testovanej siete. Výsledok by tak mohol komplexnejšie mapovať zmeny nameraných dát v prípade, že by bol v danej sieti významný zdroj harmonických.

POUŽITÁ LITERATÚRA

- [1] TLUSTÝ, J., J. ŠVEC, Z. BRETTSCHEIDER, Z. KOCUR, P. MAREČEK, Z. MÜLLER a T. SÝKORA. *Návrh a rozvoj elektroenergetických sítí*. Vyd. 1. Praha: České vysoké učení technické v Praze, 2011, 255 s. ISBN 978-80-01-04939-6. Dostupné také z: http://www.mpo-efekt.cz/upload/7799f3fd595eeee1fa66875530f33e8a/cvut-4-navrh_siti.pdf
- [2] BILÍK, P. Monitorování kvality elektřiny. *ELEKTRO*. 2008, (2), 2. Dostupné také z: <http://www.odbornecasopisy.cz/res/pdf/36632.pdf>
- [3] DRÁPELA, J. Kvalita elektrické energie a EMC: Komplexní inovace studijních programů a zvyšování kvality výuky na FEKT VUT v Brně OP VK CZ.1.07/2.2.00/28.0193. 2016, 357 s. Dostupné také z: <https://moodle.vutbr.cz/mod/resource/view.php?id=69184>
- [4] *Kvalita elektrickej energie* [online]. SZATHMÁRY, P. s. 12 [cit. 2016-11-05]. Dostupné také z: http://www.pro.sk/ukazky/kvalita_elektrickej_energie.pdf
- [5] DUGAN, R.C., M.F. MCGRANAGHAN, S. SANTOSO a H.W. BEATY. *PROFESSIONAL ENGINEERING: Electrical Power Systems Quality*. 2. The McGraw-Hill Companies., 2004, 525 s. Dostupné také z: <https://docs.google.com/file/d/0B5vXY4-Kg5GeNTVwZG1YMFpRakk/edit>
- [6] ČSN EN 50 160 ed.3: Charakteristiky napětí elektrické energie dodávané z veřejných distribučních sítí. Praha: Úřad pro technickou normalizaci, metrologii a státní zkušebnictví, 2011.
- [7] ČSN EN 61000-4-30 ed.3: Elektromagnetická kompatibilita (EMC) - Část 4-30: Zkušební a měřicí technika - Metody měření kvality energie. Úřad pro technickou normalizaci, metrologii a státní zkušebnictví. 2015.
- [8] HAASZ, V. a J. NOVÁK. *Měření na číslicových obvodech*. Praha: Česká technika - nakladatelství ČVUT, 2006, 91 s. ISBN 80-010-3389-9.
- [9] HAASZ, V. a M. SEDLÁČEK. *Elektrická měření: přístroje a metody*. Vyd. 2. Praha: Vydavatelství ČVUT, 2003, 337 s. ISBN 80-010-2731-7.
- [10] KOLACIA T. *Měření elektrických veličin v distribučních sítích 22 kV a 0,4 kV s disperzními zdroji*. Brno: Vysoké učení technické v Brně, Fakulta elektrotechniky a komunikačních technologií, 2015, 80 s. Vedoucí diplomové práce doc. Ing. Jiří Drápela, Ph.D..
- [11] SCHLABBACH, J., D. BLUME a T. STEPHANBLOME. *Voltage Quality in Electrical Power Systems*. 36. The Institution of Engineering and Technology, 2001, 241 s. ISBN 978-0-85296-975-5. Dostupné také z: www.theiet.org
- [12] PAWLAS, J. *Konference Energie pro budoucnost XVII: Zajištění kvality elektřiny – podmínky připojení a možnost odběratele je splnit* [online]. 2016, 37 s. [cit. 2017-03-30]. Dostupné z: http://www.odbornecasopisy.cz/data-ftp-user/konference/2016/Energie_pro_budoucnost_AMPER_2016/04_Pawlas.pdf
- [13] URIBE-PÉREZ, N., L. HERNÁNDEZ, D. DE LA VEGA a I. ANGULO. *State of the Art and Trends Review of Smart Metering in Electricity Grids*. 2016, 24 s. Dostupné také z: <http://www.mdpi.com/2076-3417/6/3/68>
- [14] CAMPBELL, M., N. WATSON a A. MILLER. *EEA Conference & Exhibition: Smart Meters to Monitor Power Quality at Consumer Premises*. 2015, 12 s. Dostupné také z:

- http://www.epecentre.ac.nz/research/EEA_2015/Smart%20Metering_Full%20Paper_v6.pdf
- [15] PNE 33 3430-7 Podniková norma energetiky pre rozvod elektrické energie: Charakteristiky napětí elektrické energie ve veřejné distribuční síti. 3.vydanie. 2008, 52 s. Dostupné také z: <http://www.csres.cz/Upload/PNE%2033%203430-7%203.vyd%C3%A1n%C3%AD.pdf>
- [16] PNE 33 340-1 Podniková norma energetiky pro rozvod elektrické energie: Parametry kvality elektrické energie – Část 1: Harmonické a meziharmonické. 3.vydanie. 2009, 25 s. Dostupné také z: <http://www.mojeenergie.cz/cz/pne-33-3430-2009>
- [17] *PPDS: KVALITA NAPĚTÍ V DISTRIBUČNÍ SOUSTAVĚ, ZPŮSOBY JEJÍHO ZJIŠŤOVÁNÍ A HODNOCENÍ*. 3. 2011, 42 s. Dostupné také z: <https://www.eon-distribuce.cz/dokumenty-ke-stazeni/elektrina-2/predpisy/pravidla-provozovani-distribucni-soustavy/priloha-3-k-ppds-2016-kvalita-napeti/P%C5%99%C3%ADloha%203%20PPDS%202016%20-%20KVALITA%20NAP%C4%9AT%C3%8D.pdf>
- [18] SKÁLA, P. *Distribuční a průmyslové sítě: Spolehlivost distribučních sítí*. 2015, 72 s. Dostupné také z: https://moodle.vutbr.cz/pluginfile.php/261938/mod_resource/content/1/Spolehlivost%20distribucni%20a%20prumyslovy%20siti%20-%20v2015_v1.pdf
- [19] TESAŘOVÁ, M. Rušivé jevy v průmyslových sítích (energetické rušení). *Průmyslová elektroenergetika* [online]. Plzeň, 2000, s. 16 [cit. 2017-02-12]. Dostupné z: <http://home.zcu.cz/~tesarova/PE/Soubory/Kap8.pdf>
- [20] DRÁPELA, J. *VĚDECKÉ SPISY VYSOKÉHO UČENÍ TECHNICKÉHO V BRNĚ: ZPĚTNÉ RUŠIVÉ VLIVY OSVĚTLOVACÍCH SOUSTAV NA NAPÁJECÍ SÍŤ* [online]. 2006 [cit. 2017-02-12]. Dostupné z: <http://www.vutium.vutbr.cz/tituly/pdf/ukazka/80-214-3352-6.pdf>
- [21] MEDINA, A., J. SEGUNDO-RAMIREZ, P. RIBEIRO, W. XU, K.L. LIAN, G.W. CHANG, V. DINAVAHÍ a N.R. WATSON. *Harmonic Analysis in Frequency and Time Domain: IEEE Task Force on Harmonics Modeling and Simulation* [online]. 2013 [cit. 2017-02-28]. Vol.28. Dostupné z: <http://ieeexplore.ieee.org/stamp/stamp.jsp?arnumber=6514799>
- [22] HOLEY, D.M. a V.K. CHANDRAKAR. *International Research Journal of Engineering and Technology (IRJET): Harmonic Analysis Techniques of Power System-A Review*. Vol.03. 2016. Dostupné také z: <https://www.irjet.net/archives/V3/i2/IRJET-V3I2117.pdf>
- [23] MLÝNEK, P., R. FUJDIÁK, P. MAŠEK, J. HOŠEK, J.J. ZAMPHIROPOLOS, J. PAŘÍZEK a J. VACULÍK. *Konference ČK CIRED 2016: Komunikační technologie pro konkrétní oblasti smart grid a provoz mřížové sítě* [online]. 2016. 11 s. [cit. 2017-03-24].
- [24] RAJSKÝ, F. a J. KLOUD. *Konference ČK CIRED 2015: Měření kvality elektrické energie v DTS* [online]. 2015. 19 s. [cit. 2017-03-25].
- [25] PAWLAS, J. *Konference Energie pro budoucnost XVII: Kvalita elektřiny po změnách technologie teplotěnských provozů* [online]. 2014, 37 s. [cit. 2017-03-30]. Dostupné z: http://www.electroindustry.cz/files/prilohyudalosti/teplarenstvi2014/6_ELCOM_Kvalita_elektriny_po_zmenach.pdf
- [26] PITHART, J. *Systémy monitorování kvality elektrické energie*. Diplomová práce. Brno: Ústav elektroenergetiky FEKT VUT v Brně, 2008, 59 stran.

- [27] ELCOM, a.s. - Divize Virtuální instrumentace, Uživatelský manuál: Komplexní systém monitoringu a analýzy kvality elektřiny. 2008, 119 s. Dostupné také z: <http://www.elcom.cz/cz/ke-stazeni/merici-systemy/testandmeasurement-cz/system-monitoringu-a-analyzy-kvality-elekriny-bk-elcom-uzivatelske-manualy/bk-measure-mereni/stahnout>.
- [28] PIKOUS, J. *Dopady hromadného připojování nelineárních domácích spotřebičů*. Diplomová práce. Plzeň: Katedra technologií a měření v Plzni. 2015, 77 stran.
- [29] KŮS, V. a J. DUSPIVA. *Konference ČK CIRED 2016: Vliv malých spotřebičů na napájecí soustavu v sídlišti rodinných domů* [online]. 2016, 11 s. [cit. 2017-04-15].
- [30] KŮS, V. a J. DUSPIVA. *Konference ČK CIRED 2015: Vlivy připojení velkého počtu nelineárních spotřebičů na kvalitu napětí v síti* [online]. 2015, 11 s. [cit. 2017-04-15].
- [31] KAŠPÍREK, M., D. MEZERA a K. PROCHÁZKA. *Konference ČK CIRED 2014: Analýza harmonických napětí v distribuční síti NN* [online]. 2014, 27 s. [cit. 2017-04-15].
- [32] GIL-DE-CASTRO, A., S.K. RÖNNBERG, M.H.J. BOLLEN a A. MORENO-MUÑOZ. *Harmonics from household equipment and different lamp technologies* [online]. 2013, 6 s. [cit. 2017-04-16]. Dostupné z: <http://ieeexplore.ieee.org/stamp/stamp.jsp?arnumber=6601119>
- [33] RÖNNBERG, S.K., M. WAHLBERG a M.H.J. BOLLEN. *Harmonic Emission before and after Changing to LED lamps - Field Measurements for an urban area* [online]. 2012, 6 s. [cit. 2017-04-16]. Dostupné z: <http://ieeexplore.ieee.org/stamp/stamp.jsp?arnumber=6381215>