

VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V BRNĚ

BRNO UNIVERSITY OF TECHNOLOGY

**FAKULTA ELEKTROTECHNIKY A KOMUNIKAČNÍCH TECHNOLOGIÍ
ÚSTAV ELEKTROENERGETIKY**

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

**INDEX KVALITY NAPĚTÍ PRO INDIKATIVNÍ
HODNOCENÍ KVALITY NAPĚTÍ V
DISTRIBUČNÍ SÍTI**

**DIPLOMOVÁ PRÁCE
MASTER'S THESIS**

**AUTOR PRÁCE
AUTHOR**

Bc. JOSEF HAUSNER

BRNO 2015



VYSOKÉ UČENÍ
TECHNICKÉ V BRNĚ

Fakulta elektrotechniky
a komunikačních technologií

Ústav elektroenergetiky

Diplomová práce

magisterský navazující studijní obor
Elektroenergetika

Student: Bc. Josef Hausner

ID: 134485

Ročník: 2

Akademický rok: 2014/2015

NÁZEV TÉMATU:

**Index kvality napětí pro indikativní hodnocení kvality napětí
v distribuční síti**

POKYNY PRO VYPRACOVÁNÍ:

1. Indicie kvality napětí a standard kvality napětí.
2. Definice a aplikovatelnost Indexu kvality napětí.
3. Analýza nastavení algoritmu pro výpočet Indexu kvality napětí.
4. Ověření variantního nastavení na souborech měření.
5. Návrh systému výpočtu Indexu kvality napětí pro měřicí místa a jeho implementace do systému monitoringu sítí.

DOPORUČENÁ LITERATURA:

podle pokynů vedoucího práce

Termín zadání: 9.2.2015

Termín odevzdání: 22.5.2015

Vedoucí práce: doc. Ing. Jiří Drápela, Ph.D.

Konzultanti diplomové práce:

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.

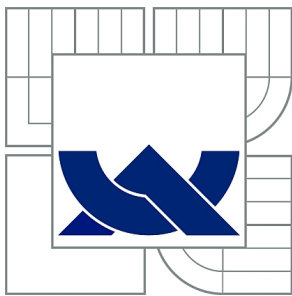
Bibliografická citace práce:

HAUSNER, J. *Index kvality napětí pro indikativní hodnocení kvality napětí v distribuční síti*. Brno: Vysoké učení technické v Brně, Fakulta elektrotechniky a komunikačních technologií, 2015. 54 s. Vedoucí diplomové práce doc. Ing. Jiří Drápela, Ph.D..

Rád bych poděkoval vedoucímu své diplomové práce panu doc. Ing. Jiří Drápelovi, Ph.D. za odborné rady, poskytnuté informace a odborný dohled při tvorbě této práce.

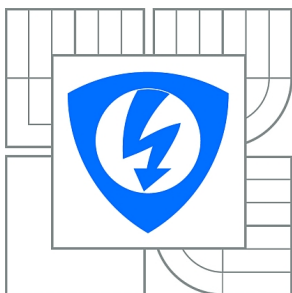
Jako autor uvedené diplomové práce dále prohlašuji, že v souvislosti s vytvořením této diplomové práce jsem neporušil autorská práva třetích osob, zejména jsem nezasáhl nedovoleným způsobem do cizích autorských práv osobnostních a jsem si plně vědom následků porušení ustanovení § 11 a následujících autorského zákona č. 121/2000 Sb., včetně možných trestněprávních důsledků vyplývajících z ustanovení části druhé, hlavy VI. Díl 4 Trestního zákoníku č. 40/2009 Sb.

.....



VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V BRNĚ

BRNO UNIVERSITY OF TECHNOLOGY



FAKULTA ELEKTROTECHNIKY A KOMUNIKAČNÍCH
TECHNOLOGIÍ

ÚSTAV ELEKTROENERGETIKY

FACULTY OF ELECTRICAL ENGINEERING AND COMMUNICATION
DEPARTMENT OF ELECTRICAL POWER ENGINEERING

INDEX KVALITY NAPĚTÍ PRO INDIKATIVNÍ HODNOCENÍ KVALITY NAPĚTÍ V DISTRIBUČNÍ SÍTI

VOLTAGE QUALITY INDEX FOR DISTRIBUTION SYSTEMS VOLTAGE QUALITY
BENCHMARKING

DIPLOMOVÁ PRÁCE

MASTER'S THESIS

AUTOR PRÁCE

AUTHOR

Bc. JOSEF HAUSNER

VEDOUCÍ PRÁCE

SUPERVISOR

doc. Ing. JIŘÍ DRÁPELA, Ph.D.

BRNO 2015

ABSTRAKT

Tato diplomová práce se zabývá návrhem nové metody pro hodnocení kvality napětí pomocí indexu kvality napětí. Tento index by měl určit celkovou kvalitu napětí v síti a porovnat kvalitu napětí v jednotlivých místech. V práci je navrženo několik algoritmů, které hodnotí naměřené charakteristiky. Z navržených algoritmů je vybrán nejvhodnější. Pro vybraný algoritmus je vytvořen program v uživatelském rozhraní GUI Matlab. V tomto programu je ověřen algoritmus s využitím naměřených charakteristik. Poslední částí práce je návrh možného využití vytvořeného algoritmu.

KLÍČOVÁ SLOVA: VQI, index kvality napětí, kvalita napětí, distribuční síť, parametry kvality napětí, napětí, frekvence, flickr, harmonické zkreslení, nesymetrie, matlab, smart metering

ABSTRACT

This Master's thesis deals with design of a new method for voltage quality benchmarking using voltage quality index. This index should determinate total voltage quality in the power grid and compare voltage quality in different places. There is design of several algorithms which value measured parameters in this thesis. The best suitable algorithm is selected. Program for this algorithm was compiled in GUI Matlab. The algorithm is verified by using measured parameters in this program. The last part of this thesis is focused on possible usage of created algorithm.

KEY WORDS: VQI, voltage quality index, voltage quality, distributed power grids, voltage quality indices, voltage, frequency, flicker, harmonic distortion, unbalance, matlab, smart metering

OBSAH

| | |
|--|----|
| SEZNAM OBRÁZKŮ..... | 8 |
| SEZNAM TABULEK | 10 |
| SEZNAM SYMBOLŮ A ZKRATEK..... | 11 |
| 1 ÚVOD..... | 12 |
| 2 CHARAKTERISTIKY A PARAMETRY NAPĚTÍ..... | 14 |
| 2.1 KMITOČET SÍTĚ..... | 15 |
| 2.2 VELIKOST A ODCHYLKY NAPÁJECÍHO NAPĚTÍ..... | 15 |
| 2.3 NESYMETRIE NAPĚTÍ | 15 |
| 2.4 RYCHLÉ ZMĚNY NAPĚTÍ | 15 |
| 2.5 HARMONICKÁ NAPĚTÍ | 16 |
| 2.6 ÚROVNĚ NAPĚTÍ SIGNÁLŮ V NAPÁJECÍM NAPĚTÍ..... | 17 |
| 3 INDEX KVALITY NAPĚTÍ | 18 |
| 3.1 FUNKCE HODNOTÍCÍ ODCHYLKY PARAMETRŮ | 20 |
| 3.2 SLUČOVACÍ FUNKCE | 30 |
| 3.2.1 ARITMETICKÝ PRŮMĚR | 30 |
| 3.2.2 SOUČIN DÍLČÍCH INDEXŮ | 34 |
| 3.2.3 GEOMETRICKÝ PRŮMĚR..... | 36 |
| 4 OVĚŘENÍ NAVRŽENÝCH FUNKCÍ NA REÁLNÉM MĚŘENÍ | 40 |
| 4.1 PROGRAM PRO POROVNÁNÍ VÝPOČTU VQI | 40 |
| 4.1.1 OVLÁDÁNÍ NAVRŽENÉHO PROGRAMU | 40 |
| 4.2 POROVNÁNÍ SLUČOVACÍCH FUNKCÍ NA NAMĚŘENÝCH HODNOTÁCH | 42 |
| 4.2.1 SOUČINOVÁ FUNKCE..... | 43 |
| 4.2.2 ARITMETICKÝ PRŮMĚR | 45 |
| 4.2.3 GEOMETRICKÝ PRŮMĚR..... | 45 |
| 5 IMPLEMENTACE INDEXU DO SYSTÉMU MONITORINGU SÍTÍ..... | 48 |
| 5.1 NÁVRH GRAFIKY MOŽNÉHO UŽIVATELSKÉHO ROZHRAŇÍ..... | 48 |
| 6 ZÁVĚR..... | 51 |
| POUŽITÁ LITERATURA | 53 |

SEZNAM OBRÁZKŮ

| | |
|--|----------------------|
| <i>Obr. 2.1 - Křivka vyjadřující maximální povolenou úroveň signálu v napájecím napětí [1].....</i> | <i>17</i> |
| <i>Obr. 3.1- Představa dílčího VQI v trojrozměrné soustavě.....</i> | <i>19</i> |
| <i>Obr. 3.2 - Grafické porovnání exponenciální a mocninné funkce na příkladu hodnocení odchytky kvality napětí v závislosti na velikosti nesymetrie</i> | <i>24</i> |
| <i>Obr. 3.3- - Grafické porovnání funkcí z kapitoly 3.1 na příkladu hodnocení odchytky kvality napětí v závislosti na velikosti napětí.....</i> | <i>25</i> |
| <i>Obr. 3.4 - Grafické porovnání funkcí z kapitoly 3.1 na příkladu hodnocení kvality napětí v závislosti na velikosti napětí.....</i> | <i>26</i> |
| <i>Obr. 3.5 - Grafické porovnání funkcí z kapitoly 3.1 na příkladu hodnocení odchytky kvality napětí v závislosti na velikosti nesymetrie.....</i> | <i>26</i> |
| <i>Obr. 3.6 - Grafické porovnání funkcí z kapitoly 3.1 na příkladu hodnocení kvality napětí v závislosti na velikosti THD_U.....</i> | <i>27</i> |
| <i>Obr. 3.7 - Grafická závislost indexu VQI na napěťové nesymetrii při použití kombinované lineárně-logaritmické funkce</i> | <i>28</i> |
| <i>Obr. 3.8 - Grafická závislost odchytky VQD na napěťové nesymetrii při použití kombinované lineárně-logaritmické funkce.....</i> | <i>28</i> |
| <i>Obr. 3.9 - Grafická závislost indexu VQI na velikosti napětí při použití kombinované lineárně-logaritmické funkce</i> | <i>29</i> |
| <i>Obr. 3.10 - Grafická závislost odchytky VQD na velikosti napětí při použití kombinované lineárně-logaritmické funkce</i> | <i>30</i> |
| <i>Obr. 3.11 - Závislost celkového indexu jednofázových parametrů vypočítaného pomocí aritmetického průměru na indexu popisujícím velikost napětí, pro různé hodnoty dílčích indexů</i> | <i>31</i> |
| <i>Obr. 3.12 - Závislost celkového indexu jednofázových parametrů vypočítaného pomocí vztahu (3.24) na indexu popisujícím velikost napětí, pro různé hodnoty dílčích indexů.....</i> | <i>33</i> |
| <i>Obr. 3.13 - Závislost celkového indexu jednofázových parametrů vypočítaného pomocí vztahu (3.27) na indexu popisujícím velikost napětí, pro různé hodnoty dílčích indexů.....</i> | <i>34</i> |
| <i>Obr. 3.14 - Závislost celkového indexu jednofázových parametrů vypočítaného pomocí vztahu (3.30) na indexu popisujícím velikost napětí, pro různé hodnoty dílčích indexů.....</i> | <i>35</i> |
| <i>Obr. 3.15- Závislost celkového indexu jednofázových parametrů vypočítaného pomocí vztahu (3.31) na indexu popisujícím velikost napětí, pro různé hodnoty dílčích indexů.....</i> | <i>Chyba!</i> |
| <i>Záložka není definována.</i> | |
| <i>Obr. 3.16 - Závislost celkového indexu jednofázových parametrů vypočítaného pomocí geometrického průměru podle vztahu (3.34) na indexu popisujícím velikost napětí, pro různé hodnoty dílčích indexů.....</i> | <i>37</i> |

| | |
|--|-----------|
| <i>Obr. 3.17 - Závislost celkového indexu jednofázových parametrů vypočítaného pomocí geometrického průměru podle vztahu (3.35) na indexu popisujícím velikost napětí, pro různé hodnoty dílčích indexů.....</i> | <i>38</i> |
| <i>Obr. 4.1 - Uživatelské rozhraní programu.....</i> | <i>41</i> |
| <i>Obr. 4.2 - Příklad nastavení programu s vykresleným průběhem VQI.....</i> | <i>42</i> |
| <i>Obr. 4.3 - Průběh desetiminutových hodnot VQI spočítaný součinnou funkcí.....</i> | <i>43</i> |
| <i>Obr. 4.4 - Průběh desetiminutových hodnot VQI spočítaný součinnou funkcí pouze pro 2 parametry</i> | <i>44</i> |
| <i>Obr. 4.5 - Průběh hodinový hodnot VQI spočítaný součinnou funkcí.....</i> | <i>44</i> |
| <i>Obr. 4.6 - Průběh desetiminutových hodnot VQI spočítaný aritmetickým průměrem</i> | <i>45</i> |
| <i>Obr. 4.7 - Průběh desetiminutových hodnot VQI spočítaný geometrickým průměrem.....</i> | <i>46</i> |
| <i>Obr. 4.8 - Průběh denních hodnot VQI spočítaný geometrickým průměrem.....</i> | <i>46</i> |
| <i>Obr. 4.9 - Průběh denních hodnot VQI spočítaný geometrickým průměrem s vynecháním 5% nejnižších dílčích indexů</i> | <i>47</i> |
| <i>Obr. 5.1 – Příklad uživatelského rozhraní pro monitorovací program [15]</i> | <i>48</i> |
| <i>Obr. 5.2- Příklad uživatelského rozhraní monitorovacího programu s mapou ve větším měřítku[15]</i> | <i>50</i> |

SEZNAM TABULEK

| | |
|--|-----------|
| <i>Tabulka 1- Klasifikace poklesů napětí [1]</i> | <i>14</i> |
| <i>Tabulka 2 – Klasifikace přechodných zvýšení napětí [1].....</i> | <i>14</i> |
| <i>Tabulka 2.3 - Limity harmonických napětí [1].....</i> | <i>17</i> |

SEZNAM SYMBOLŮ A ZKRATEK

| | |
|-------------|--|
| n | počet dílčích indexů menších nebo rovných nule |
| P_{lt} | dlouhodobá míra vjemu flikru |
| P_{st} | krátkodobá míra vjemu flikru |
| SNX | celkový počet stavo-uzlo-parametrů |
| $THDU$ | celkový činitel harmonického zkreslení napětí |
| U_c | smluvené napětí |
| U_m | maximální hodnota napětí |
| U_n | jmenovité napětí |
| VQD_x | odchylka kvality napětí parametru x |
| VQI | index kvality napětí |
| VQI_A | výsledný index kvality napětí spočítaný pomocí aritmetického průměru |
| VQI_G | výsledný index kvality napětí spočítaný pomocí funkce na základě geometrického průměru |
| VQI_S | výsledný index kvality napětí spočítaný pomocí součinnové funkce |
| x | hodnocený parametr |
| X_{CL} | kompatibilní úroveň pro parametr x |
| X_{max-} | záporná hodnota odchylky oceňující funkce nabývá maximální hodnoty |
| X_{max+} | kladná hodnota odchylky oceňující funkce nabývá maximální hodnoty |
| X_{max} | hodnota odchylky oceňující funkce nabývá maximální hodnoty |
| X_{nom} | nominální hodnota parametru x |
| Z_{xPL} | relativní plánovací úroveň vztažena ke kompatibilní úrovni parametru x |
| α_x | upravená hodnota dílčího indexu pro stanovení kvality aritmetickým průměrem |
| β_x | upravená hodnota dílčího indexu pro stanovení kvality součinnovou funkcí |
| Δf | odchylka frekvence |
| ΔU | odchylka velikosti napětí |
| μ_x | váha vyjadřující důležitost parametru x |
| $v_x^{(n)}$ | váha vyjadřující důležitost parametru x v bodě n |
| ξ_x | oceňující funkce pro jednotlivé odchylky x |
| ρ | činitel nesymetrie napětí |

1 ÚVOD

Elektrinu dnes díky poměrně snadnému přenosu a jednoduché transformaci na jinou formu energie můžeme označit jako nejušlechtlejší formu energie, na které je závislá naprostá většina občanů všech vyspělých zemí. Podle energetického zákona č. 458/2000 Sb. má každý odběratel právo na dodávku kvalitní elektrické energie. Kvalitu elektrické energie můžeme rozdělit na 2 části a to kvalitu dodávky elektrické energie a kvalitu napětí. Kvalitou dodávky je myšlena spolehlivost a plynulost dodávky elektrické energie. Kvalitou dodávky se zabývá vyhláška č. 540/2005 Sb. o kvalitě dodávek elektřiny a souvisejících služeb v elektroenergetice. Pro hodnocení kvality napětí jsou zavedeny určité ukazatele, které se vyhodnocují z křivek průběhu napětí. Tyto jednotlivé hodnotící charakteristiky a jejich přípustné meze jsou popsány v normě ČSN EN 50160.

Hodnotící charakteristiky napětí se můžou dělit na ty, při jejichž nedodržení přísluší odběrateli náhrada podle vyhlášky č. 540/2005 Sb., mezi tyto parametry patří velikost napětí a frekvence. Druhou skupinou jsou parametry, při jejichž nedodržení nepřísluší odběrateli finanční náhrada, mezi které patří například nesymetrie napětí, celkové harmonické zkreslení, flickr atd. Norma ČSN EN 50160 dále rozděluje napěťové charakteristiky na spojitě jevy a napěťové události. Mezi spojitě jevy patří odchylky hodnot, které se vyskytují v průběhu času. Pro některé spojitě jevy jsou stanoveny přesné meze, u některých jsou naopak uvedeny pouze informativní hodnoty. Spojitě jevy tedy můžeme rozdělit ještě na parametry závazné a parametry informativní. Mezi napěťové události patří náhlé závažné odchylky od normálního stavu způsobené nejčastěji poruchou nebo vnějšími vlivy a ve standardu jsou uvedeny pouze informativní hodnoty.

Jednotlivé parametry jsou číselně vyjádřitelné, ale v současnosti chybí hodnocení, které by číselně vyjádřilo celkovou kvalitu napětí. Kvalita napětí se v současné době hodnotí binárně, tedy změřením jednotlivých charakteristik napětí a porovnáním, zda vyhovují definovaným mezím standardu či nikoli. Měření se provádí analyzátoři sítě a pro dosažení relevantních výsledků se provádí měření v předávacím místě mezi distributorem a odběratelem. Měření kvality napětí se obvykle provádí u jednotlivců na základě nějakého podezření či stížnosti z nedodržení předepsaných charakteristik napětí. V současné době tedy chybí celkový přehled kvality napětí v distribuční síti. Dalším nedostatkem je absence schopnosti objektivně porovnávat stav kvality napětí v síti.

Postupným zavedením statických „chytrých“ elektroměrů s vyšší monitorovací funkcionalitou, které by byly schopny měřit napěťové charakteristiky, by se získal celkový přehled o jednotlivých charakteristikách v síti. Pokud by se tento monitoring doplnil určitým algoritmem, který by sloučil jednotlivé sledované parametry do jednoho indexu, který by objektivně a jednoduše zhodnotil kvalitu napětí, získal by distributor přehled o kvalitě napětí v síti, v jednotlivých odběrech či celých oblastech. Takový nástroj by mohl pomoci nalézt příčiny rušení v síti, dále by zjednodušil posuzování vlivu nápravných zařízení v síti.

Kvůli zmíněné absenci hodnotícího indexu bude hlavní problematikou této práce návrh možného algoritmu zpracovávající naměřené charakteristiky napětí, jehož výsledkem bude index popisující kvalitu napětí. Jelikož je potřeba znát parametry, ze kterých se bude index počítat, tak prvním krokem v této práci bude popsat jednotlivé parametry a jejich meze, podle kterých je kvalita

elektrické energie v současnosti hodnocena. Dále bude práce věnována indexu kvality napětí, jeho definici a návrhu několika algoritmů a jejich výpočtu, které se ověří na změřených charakteristikách. V poslední části této práce bude nastíněno, jak by mohl být navržený index využíván pro monitorování sítě.

2 CHARAKTERISTIKY A PARAMETRY NAPĚTÍ

Podle vyhlášky 540/2005 Sb. je standardem kvality napětí distribuce elektřiny s odpovídajícími parametry velikosti a odchylky napájecího napětí a frekvence. [6] Můžeme tedy říci, že velikost odchylky napájecího napětí a frekvence jsou nejdůležitější ukazatelé kvality napětí.

Dalšími ukazateli kvality dodávky elektrické energie v distribučních sítích se zabývá norma ČSN EN 50160. V tomto dokumentu se rozdělují charakteristiky na průběžné jevy a napěťové události. Napěťovými událostmi jsou myšleny odchylky od normálního nebo požadovaného tvaru vlny, které jsou způsobeny neočekávanými událostmi nebo vnějšími vlivy. Mezi napěťové události se řadí přerušování napájecího napětí, dočasné poklesy nebo zvýšení napájecího napětí. Výpadky napětí se klasifikují podle času výpadku na dlouhodobá a krátkodobá. U dočasných poklesů nebo zvýšení napájecího napětí je klasifikace rozdělena podle odchylky velikosti napětí a podle doby trvání napěťové události, jak je uvedeno v Tabulce 1 a Tabulce 2. Pro napěťové události nejsou v normě uvedeny žádné závazné hodnoty, ale pouze informativní hodnoty.

Průběžnými jevy jsou obvykle odchylky od jmenovitých hodnot vyskytujících se v průběhu času. Tyto jevy jsou způsobeny zejména charakterem zatížení a jeho změnami. Pro některé průběžné jevy jsou stanoveny přesné meze, které budou popsány v následujících podkapitolách. Pro jiné průběžné jevy jako je přítomnost meziharmonických napětí stanovené meze zatím nejsou. [1]

Tabulka 1- Klasifikace poklesů napětí [1]

| Zbytkové napětí u (%) | Doba trvání t (ms) | | | | |
|-------------------------|----------------------|-----------------------|------------------------|-------------------------|--------------------------|
| | $10 \leq t \leq 200$ | $200 \leq t \leq 500$ | $500 \leq t \leq 1000$ | $1000 \leq t \leq 5000$ | $5000 \leq t \leq 60000$ |
| $90 > u \geq 80$ | CELL A1 | CELL A2 | CELL A3 | CELL A3 | CELL A3 |
| $80 > u \geq 70$ | 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 |

Tabulka 2 – Klasifikace přechodných zvýšení napětí [1]

| Přechodné zvýšení u (%) | Doba trvání t (ms) | | |
|---------------------------|----------------------|------------------------|--------------------------|
| | $10 \leq t \leq 500$ | $500 \leq t \leq 5000$ | $5000 \leq t \leq 60000$ |
| $u \geq 120$ | CELL S1 | CELL S2 | CELL S3 |
| $120 > u \geq 110$ | CELL T1 | CELL T2 | CELL T3 |

2.1 Kmitočet sítě

Jmenovitá hodnota síťového kmitočtu je $f_n = 50$ Hz. Kmitočet sítě je vyhodnocován jako střední hodnota kmitočtu základní harmonické měřena v intervalu 10 s. Za normálních provozních podmínek musí být tato hodnota podle [1] v následujících mezích:

- u systémů se synchronním připojením k propojenému systému:
 - 50 Hz \pm 1 % (49,5 Hz až 50,5 Hz) během 99,5 % roku;
 - 50 Hz + 4 % / - 6 % (47 Hz až 52 Hz) po 100 % času;
- u ostrovních systémů:
 - 50 Hz \pm 2 % (49 Hz až 51 Hz) během 95 % týdne;
 - 50 Hz \pm 15 % (42,5 Hz až 57,5 Hz) během 99,5 % času;

2.2 Velikost a odchylky napájecího napětí

Velikost napájecího napětí je dána smluveným napájecím napětím U_c , což je ve většině případů jmenovité napětí sítě U_n .

U dodávek v nn sítích platí, že za normálních provozních podmínek musí odchylka napájecího napětí mít během každého týdne 95% průměrných efektivních hodnot (jedna průměrná hodnota je změřena během 10 period průběhu napětí) v měřicích intervalech 10 minut v rozsahu $\pm 10 \% U_n$ a současně všechny průměrné efektivní hodnoty odchylky napájecího napětí v měřicích intervalech 10 minut musí být v rozsahu $+ 10 \% U_n / - 15 \% U_n$. [1]

U dodávek ve vn sítích platí, že za normálních provozních podmínek musí odchylka napájecího napětí mít během každého týdne 95% průměrných efektivních hodnot v měřicích intervalech 10 minut v rozsahu $\pm 10 \% U_n$ a současně všechny průměrné efektivní hodnoty odchylky napájecího napětí v měřicích intervalech 10 minut musí být v rozsahu $\pm 15 \% U_n$. [1]

2.3 Nesymetrie napětí

Napěťová nesymetrie je stav ve vícefázovém systému, ve kterém efektivní hodnoty napětí nebo úhly fázového posunu mezi jednotlivými fázemi nejsou stejné. Míra nesouměrnosti je obvykle hodnocena jako poměr zpětné nebo nulové složky k sousledné složce. [2]

Podle [1] za normálních provozních podmínek musí být v libovolném týdenním období 95% desetiminutových středních efektivních hodnot zpětné složky napájecího napětí v rozsahu 0 až 2% sousledné složky. Ovšem v některých oblastech, kde jsou instalace částečně připojovány jednofázově nebo dvoufázově je povolena nesymetrie do 3%.

2.4 Rychlé změny napětí

Rychlými změnami napětí je myšleno kolísání maximální hodnoty napětí U_m v čase. Tyto změny jsou ve většině případů způsobeny spínacími procesy v síti, změnami zátěže nebo poruchami. Na rychlé změny napětí jsou citlivé světelné zdroje, u kterých se projevuje změna světelného toku úměrná změně napětí. V závislosti na frekvenci a velikosti změn napětí může dojít k blikání světelných zdrojů. Vjem blikání světelných zdrojů nazýváme flickr a je posuzován dvěma parametry, a to krátkodobou a dlouhodobou mírou vjemu flickru. Krátkodobá míra vjemu flickru P_{st}

se posuzuje v intervalu 10 minut a dlouhodobá míra vjemu flikru P_{lt} je vyhodnocována v intervalu 2 hodin.

Hlídaným parametrem podle [1] je dlouhodobá míra vjemu flikru, která za normálních provozních podmínek musí být po 95 % času, v libovolném týdenním intervalu $P_{lt} \leq 1$.

Pokud ale chceme hodnotit kvalitu v reálném čase, je vhodnější sledovat míru krátkodobého vjemu flikru, který se vyhodnocuje v intervalu 10 minut.

2.5 Harmonická napětí

Harmonická napětí jsou způsobena převážně připojováním nelineárních zátěží. Za normálních provozních podmínek musí být v libovolném týdenním období 95 % desetiminutových středních efektivních hodnot napětí každé harmonické menší nebo rovno hodnotě uvedené v tabulce 2.1 a současně celkový činitel harmonického zkreslení THD_U musí být menší nebo roven 8 %. [1]

Celkový činitel harmonického zkreslení napětí THD_U je jedna z nejtypičtějších indicií kvality napětí a je definován jako poměr efektivních hodnot součtu všech harmonických složek až do stanoveného řádu a efektivní hodnoty základní složky. [2,3]

$$THD_{U,\check{S}N} = \sqrt{\sum_{h=2}^H \left(\frac{U_h}{U_1}\right)^2} \cdot 100\% \quad (2.1)$$

kde THD_U je činitel harmonického zkreslení napětí

h je řád harmonické,

H je konečný počet řádů harmonických, které se při výpočtu berou v úvahu,

U_h je efektivní hodnota napětí řádu h

U_1 je efektivní hodnota napětí.

U definice THD podle vztahu 2.1 je obor hodnot $H(THD_{U,\check{S}N}) = (0; \infty)$. Existuje ovšem ještě jedna definice THD , která je uvedena ve vztahu (2.2), jejím oborem hodnot je $H(THD_{U,IEC}) = (0; 100)$.

$$THD_{U,IEC} = \sqrt{\sum_{h=2}^H \left(\frac{U_h}{U_{RMS}}\right)^2} \cdot 100\% \quad (2.2)$$

$THD_{U,\check{S}N}$ lze přepočítat na $THD_{U,IEC}$ podle vztahu (2.3)

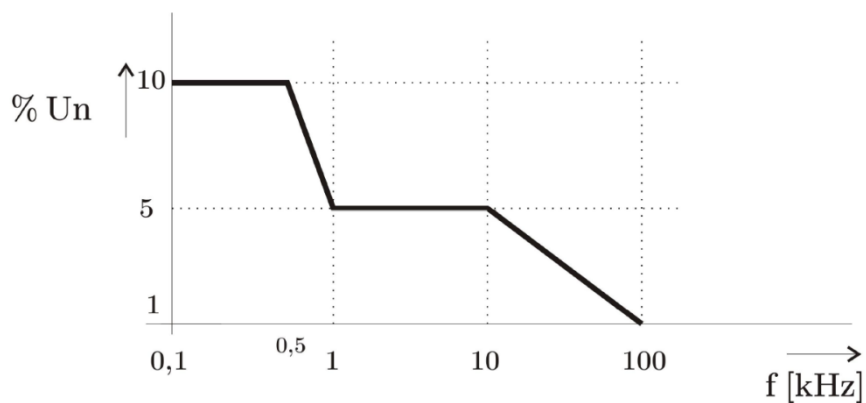
$$THD_{U,IEC} = \frac{THD_{U,\check{S}N}}{\sqrt{1 + \left(\frac{THD_{U,\check{S}N}}{100}\right)^2}} \quad (2.3)$$

Tabulka 2.3 - Limity harmonických napětí [1]

| Liché harmonické ne násobky 3 | | Liché harmonické násobky 3 | | Sudé harmonické | |
|-------------------------------|-----------------------------|----------------------------|-----------------------------|------------------------|-----------------------------|
| Řád harmonické h (-) | Harmonické napětí U_h (%) | Řád harmonické h (-) | Harmonické napětí U_h (%) | Řád harmonické h (-) | Harmonické napětí U_h (%) |
| 5 | 6 | 3 | 5 | 2 | 2 |
| 7 | 5 | 9 | 1,5 | 4 | 1 |
| 11 | 3,5 | 15 | 0,5 | 6...24 | 0,5 |
| 13 | 3 | 21 | 0,5 | | |
| 17 | 2 | | | | |
| 19 | 1,5 | | | | |
| 23 | 1,5 | | | | |
| 25 | 1,5 | | | | |

2.6 Úrovně napětí signálů v napájecím napětí

Jedná se o signály superponované k napájecímu napětí za účelem přenosu informací pomocí distribuční sítě. Střední hodnota napětí tohoto signálu měřeného po dobu tří sekund musí být v 99 % dne menší nebo rovná hodnotám daným na Obr. 2.1.



Obr. 2.1 - Křivka vyjadřující maximální povolenou úroveň signálu v napájecím napětí [1]

3 INDEX KVALITY NAPĚTÍ

V současné době se kvalita napětí posuzuje porovnáním závazných parametrů napětí v síti, které jsou uvedeny v kapitole 2 a vyhodnocením, zda jsou všechny parametry dodrženy a kvalita vyhovuje nebo je některý z hlídaných parametrů mimo meze a kvalita je nedostačující. Je třeba zavést takový ukazatel kvality napětí, který by sloučil hodnoty všech hlídaných parametrů do jednoho indexu. Takový index by pouze neukazoval, zda kvalita napětí vyhovuje standardu, ale vyhodnotil by i závažnost všech zkreslení a odchylek od ideálního harmonického průběhu napětí a sloučil by tyto vyhodnocení do jednoho konkrétního čísla. [5]

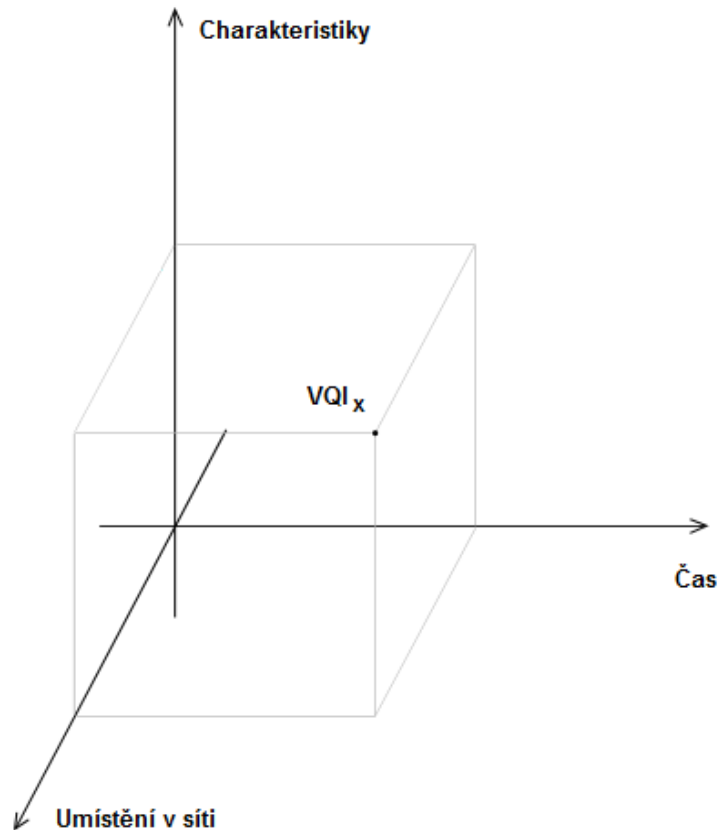
V některých pramenech je index definován tak, že dokáže hodnotit pouze kvalitu napětí v přípustných mezích a při překročení těchto mezí se kvalita vyhodnotí jako nevyhovující. [6,7] Bylo by ovšem vhodné, aby index kvality napětí dokázal určitým způsobem zhodnotit i nekvalitní napětí a číselně vyjádřit jak moc závažná odchylka u daného parametru od definovaných mezí nastala.

Tento nástroj by měl zvládnout indikaci kvality napětí pro určité oblasti, jednotlivé odběry pro vybrané parametry ve zvoleném časovém úseku popřípadě online hodnocení v reálném čase. Takový index by byl užitečným nástrojem pro distributora a poskytl by větší přehled o kvalitě napětí v distribuční síti.

V literatuře jsou definovány různé druhy indexů kvality podle využití. Například pro porovnání jednotlivých míst v síti [9], pro hodnocení výkonnosti nápravných prostředků [6], které vyhodnocují obecně jednotlivé ukazatele parametrů kvality napětí podle určitého standardu. Nebo je index definován pro hodnocení kvality napětí pro konkrétní spotřebiče, jako jsou například indukční motory, který posuzuje dopad vybraných ukazatelů na zvýšené tepelné namáhání stroje. [10] Většina algoritmů výpočtu nejprve určí dílčí indexy, které popisují hodnotu kvality pomocí každého parametru zvlášť. Tyto dílčí parametry mohou představovat například poměrnou hodnotu daného parametru jako změřená hodnota ku jmenovité hodnotě, nebo mohou být spočítány podle určité lineární či nelineární funkce. Tyto dílčí indexy se sloučí podle určité slučovací funkce do konečného výsledného indexu.

Můžeme tedy říci, že index kvality napětí (*VQI*), je určitá číselná hodnota, která popisuje míru kvality napětí. Tento výsledný index je sloučen z určitého množství dílčích indexů, v závislosti na požadovaném vyhodnocovaném časovém úseku, počtu odběrných míst a počtu uvažovaných ukazatelů kvality napětí.

Dílčí lokální index kvality napětí si lze představit jako bod v trojrozměrné soustavě jak je znázorněno na Obr. 3.1, kdy jeden rozměr představuje čas, druhý rozměr představuje charakteristiku napětí, tedy odchylku velikosti napětí, odchylku kmitočtu sítě, nesymetrie atd. Třetí rozměr pak představuje umístění v elektrizační síti.



Obr. 3.1- Představa dílčího VQI v trojrozměrné soustavě

VQI v našem případě můžeme definovat tak, aby nabýval hodnot 0 až 1, kdy hodnota 1 by znamenala ideální stav a hodnota 0 by znamenala nedodržení mezi závazných parametrů a tedy nevyhovující kvalitu. Pokud bychom chtěli pomocí VQI oceňovat i míru nekvality napětí, tak můžeme index definovat tak, že při nekvalitním napětí bude VQI nabývat záporných hodnot, čili rozsah VQI by mohl nabývat od hodnoty -1 až 1, kdy hodnota -1 by odpovídala maximální nekvalitě, hodnota 0 by odpovídala hranici kompatibilní úrovně a hodnota 1 by odpovídala ideálnímu stavu kvality napětí sítě. VQI můžeme tedy obecně zapsat jako:

$$VQI = 1 - VQD \quad (3.1)$$

VQI můžeme nezávisle vyjádřit pro jednotlivé parametry z množiny x , kde $x \in \{\Delta U; \Delta f; \rho; \dots\}$. Parametry se mohou dále rozčlenit na globální a lokální, mezi globální parametry patří pouze odchylky kmitočtu, protože kmitočet sítě je ve všech místech stejný. Lokální se mohou dělit na třífázové, mezi které patří například napěťová nesymetrie a jednofázové, kam můžeme zařadit všechny parametry, které jsou měřitelné na jedné fázi a nemusí být závislé na témže parametru jiné fáze či místa. Mezi fázové parametry pak patří například celkové harmonické zkreslení, odchylka velikosti napětí nebo velikost flikru. Ve smyslu tohoto rozčlenění parametrů je potom každý VQI funkcí provozního stavu sítě (značeno indexem s), uzlu u lokálních parametrů (značeno indexem n) a fáze u jednofázových parametrů (značeno indexem l). Potom obecně platí:

$$VQI_x^{(s,n,l)} = 1 - VQD_x^{(s,n,l)} \quad (3.2)$$

kde $VQD_x^{(s,n,l)}$ je odchylka kvality napětí, která vyjadřuje míru závažnosti odchylky daného parametru od ideální hodnoty. Pokud bychom měli posuzovat parametr pouze v mezích

kompatibilní úrovně, může $VQD_x^{(s,n,l)}$ nabývat hodnot od 0 do 1. Hodnota 0 v tomto případě charakterizuje ideální stav tedy nulovou odchylku, hodnota 1 je stav, kdy daný parametr nevyhovuje. Pokud bychom hodnotili kvalitu i mimo povolené meze, tak VQD bude nabývat hodnot větších jak 1, v tomto případě by pak hodnota $VQI_x^{(s,n,l)}$ byla záporná. [6]

Jednotlivé odchylky závazných parametrů nemusí mít vždy stejnou váhu, co se týče kvality napětí, například můžeme říci s odkazem na kapitolu 2, že odchylka frekvence má větší váhu než napěťová nesymetrie. Tato váha se pak může lišit v různých místech podle potřeb provozovatele, může se odchylka $VQD_x^{(s,n,l)}$ spočítat jako:

$$VQD_x^{(s,n,l)} = \mu_x \cdot v_x^{(n)} \cdot \xi_x^{(s,n,l)} \quad (3.3)$$

kde μ_x vyjadřuje váhu zohledňující důležitost daného parametru x . Váha nabývá hodnot od 0 do 1, kdy nula představuje bezvýznamný parametr a 1 nejdůležitější parametr.

$v_x^{(n)}$ je váha zahrnující důležitost parametru x v daném uzlu n , tato váha stejně jako v předešlém případě nabývá hodnot od 0 do 1.

$\xi_x^{(s,n,l)}$ je vlastní oceňující hodnota pro jednotlivé odchylky

[6]

Hodnota $\xi_x^{(s,n,l)}$ vyjadřuje míru odchýlení hodnoceného parametru od ideálního stavu. Pokud je tato hodnota větší než jedna, tak vyjadřuje míru překročení maximální přípustné hodnoty odchylky. Výpočet této hodnoty se může lišit podle účelu nebo podle hodnoceného parametru. Jednotlivé funkce jsou popsány v následující podkapitole. [9]

3.1 Funkce hodnotící odchylky parametrů

Pro hodnocení odchylek jednotlivých parametrů je potřeba vytvořit určitou funkci, která převede číselnou hodnotu naměřeného parametru napětí na vlastní oceňující hodnotu odchylky $\xi_x^{(s,n,l)}$, dále pak použitelnou ve vztahu (3.3). U této funkce je potřeba, aby obor hodnot pro hodnotící funkci byl v rozmezí 0 až 2, kdy hodnota 1 je hranice odchylky překračující kompatibilní úroveň hodnoceného parametru. Pro tento účel bylo navrženo několik funkcí, které jsou popsány v následujících řádcích a na konci kapitoly graficky porovnány.

Konstanta

$$\xi_x^{(s,n,l)} = 0; \quad \text{pro } x^{(s,n,l)} \in \langle 0; \infty \rangle \quad (3.4)$$

kde $x^{(s,n,l)}$ je parametr napětí v jednotlivém stavu sítě, uzlu či fáze.

Podle této funkce nabývá závažnost odchylky konstantní hodnoty rovné 0, a říká tedy, že jakákoliv odchylka je přípustná.

Binární funkce

$$\xi_x^{(s,n,l)} = \begin{cases} 0; & \text{pro } 0 \leq x^{(s,n,l)} \leq x_{CL} \\ 1; & \text{pro } x^{(s,n,l)} \geq x_{CL} \end{cases} \quad (3.5)$$

kde x_{CL} je kompatibilní úroveň pro odchylku daného parametru, které jsou dány následovně:

- pro odchylku frekvence $\Delta f_{CL} = 0,01 f_{nom}$
- pro odchylku napětí $\Delta U_{CL} = 0,1 U_{nom}$
- pro nesouměrnost napětí $\rho_{CL} = 2 \%$
- pro celkové harmonické zkreslení $THD_{CL} = 8 \%$
- pro krátkodobou míru vjemu flikru $Pst_{CL} = 1$

Tato funkce odpovídá dnešnímu binárnímu hodnocení odchylky od ideální hodnoty hlídaného parametru.

Lineární funkce

$$a) \quad \xi_x^{(s,n,l)} = \begin{cases} \frac{x^{(s,n,l)}}{x_{CL}} ; & \text{pro } 0 \leq x^{(s,n,l)} \leq x_{CL} \\ \frac{x^{(s,n,l)} - x_{CL}}{x_{max+} - x_{CL}} + 1 ; & \text{pro } x_{CL} \leq x^{(s,n,l)} \leq x_{max+} \\ 2 ; & \text{pro } x^{(s,n,l)} \geq x_{max+} \end{cases} \quad (3.6)$$

kde x_{max} je hodnota odchylky, kdy oceňující funkce nabývá maximální hodnoty a je zvolena následovně:

- pro nesouměrnost napětí $\rho_{max} = 100 \%$
- pro celkové harmonické zkreslení $THD_{max} = 100 \%$
- pro krátkodobou míru vjemu flikru $Pst_{max} = 10$

Jelikož obor hodnot pro $THD_{U\check{C}SN}$ je $H(THD_{U\check{C}SN}) = (0; \infty)$, je obtížné pro výpočet volit maximum v nekonečnu, proto je vhodné naměřené hodnoty $THD_{U\check{C}SN}$ přepočítat podle vztahu (2.3) na hodnoty THD_{UIEC} a zvolit maximum $THD_{max} = 100 \%$. Pokud dojde k přepočtu hodnot na THD_{UIEC} je třeba i přepočítat kompatibilní úroveň THD_{CL} , která po přepočtu vychází na $THD_{CL} = 7.97452228 \%$.

S volbou maximální hodnoty flikru je to poněkud složitější, protože neexistuje žádná definice ani přepočet s konečnou hodnotou Pst , proto byla zatím zvolena maximální hodnota $Pst_{max} = 10$. Podle [11] je to hodnota krátkodobého flikru, u kterého nepřesáhne u flirkmetrů třídy A nejistota měření předepsaná normou IEC 61000-4-15.

Lineární funkce (3.6) je vhodná k porovnávání kvality napětí pro parametry, jejichž kompatibilní úroveň je ohraničená od ideální hodnoty z jedné strany, ideální hodnota je tedy v nule a se zhoršující se kvalitou hodnota daného parametru roste. Jedná se o parametry, jako je nesouměrnost napětí, celkové harmonické zkreslení a krátkodobá míra vjemu flikru.

K porovnávání kvality napětí pro parametry, jejichž kompatibilní úroveň je ohraničená od ideální hodnoty x_{nom} ze dvou stran, tedy odchylku velikost napětí a frekvence, je vhodný druhý typ lineární funkce (3.7)

$$b) \quad \xi_x^{(s,n,l)} = \begin{cases} \frac{x^{(s,n,l)}}{x_{CL}}; & \text{pro } 0 \leq x^{(s,n,l)} \leq x_{CL} \\ \frac{x^{(s,n,l)} - x_{CL}}{x_{max+} - x_{CL}} + 1; & \text{pro } x_{CL} \leq x^{(s,n,l)} \leq x_{max+} \\ \frac{x^{(s,n,l)} + x_{CL}}{x_{max-} + x_{CL}} + 1; & \text{pro } -x_{CL} \geq x^{(s,n,l)} \geq x_{max-} \\ 2; & \text{pro } (x^{(s,n,l)} \geq x_{max+}) \cup (x^{(s,n,l)} \leq x_{max-}) \end{cases} \quad (3.7)$$

kde x_{max+} je hodnota kladné odchylky, kdy oceňující funkce nabývá maximální hodnoty a je zvolena následovně:

- pro odchylku frekvence $\Delta f_{max+} = 0,04 f_{nom}$
- pro odchylku napětí $\Delta U_{max+} = U_{nom}$

x_{max-} je hodnota záporné odchylky, kdy oceňující funkce nabývá maximální hodnoty a je zvolena následovně:

- pro odchylku frekvence $\Delta f_{max-} = -0,06 f_{nom}$
- pro odchylku napětí $\Delta U_{max-} = -U_{nom}$

Velikost parametru Δf_{max-} a Δf_{max+} je zvolena v souladu s ČSN EN 50160, jako meze pro odchylku frekvence, která se nesmí překročit po 100 % času. Velikost parametrů ΔU_{max+} a ΔU_{max-} je zvoleno tak, aby bylo hodnoceno napětí od 0 po dvojnásobek jmenovitého napětí,

$$c) \quad \xi_x^{(s,n,l)} = \begin{cases} \frac{x^{(s,n,l)} - z_{xPL} \cdot x_{CL}}{x_{CL} \cdot (1 - z_{xPL})}; & \text{pro } 0 \leq x^{(s,n,l)} \leq x_{CL} \\ \frac{x^{(s,n,l)} - x_{CL}}{x_{max+} - x_{CL}} + 1; & \text{pro } x_{CL} \leq x^{(s,n,l)} \leq x_{max+} \\ 2; & \text{pro } x^{(s,n,l)} \geq x_{max+} \end{cases} \quad (3.8)$$

kde z_{xPL} je relativní plánovací úroveň vztažena ke kompatibilní úrovni a určuje počáteční necitlivost funkce a podle [6] mohou být zvoleny následovně:

- pro odchylku frekvence $z_{\Delta f_{CL}} = 0,7$
- pro odchylku napětí $z_{\Delta U_{CL}} = 0,6$
- pro nesouměrnost napětí $z_{\rho_{CL}} = 0,7$
- pro celkové harmonické zkreslení $z_{THD_{CL}} = 0,7$
- pro krátkodobou míru vjemu flikru $z_{Pst_{CL}} = 0,7$

Tato funkce vychází z funkce (3.6), ale zavádí zde počáteční necitlivost pomocí relativní plánovací úrovně. Podobně jako je tomu u funkce (3.6) je i tato funkce vhodná pro parametry jako je nesouměrnost napětí, celkové harmonické zkreslení a krátkodobá míra vjemu flikru.

$$d) \quad \xi_x^{(s,n,l)} = \begin{cases} \frac{x^{(s,n,l)} - z_{xPL} \cdot x_{CL}}{x_{CL} \cdot (1 - z_{xPL})} & \text{pro } 0 \leq x^{(s,n,l)} \leq x_{CL} \\ \frac{x^{(s,n,l)} - x_{CL}}{x_{max+} - x_{CL}} + 1; & \text{pro } x_{CL} \leq x^{(s,n,l)} \leq x_{max+} \\ \frac{x^{(s,n,l)} + x_{CL}}{x_{max-} + x_{CL}} + 1; & \text{pro } -x_{CL} \geq x^{(s,n,l)} \geq x_{max-} \\ 2; & \text{pro } (x^{(s,n,l)} \geq x_{max+}) \cup (x^{(s,n,l)} \leq x_{max-}) \end{cases} \quad (3.9)$$

Funkce (3.9) je obdobná funkce s počáteční necitlivostí jako u funkce (3.8) ale je vhodná pro hodnocení oboustranných parametrů tedy odchylku frekvence a odchylku velikosti napětí.

Exponenciální funkce

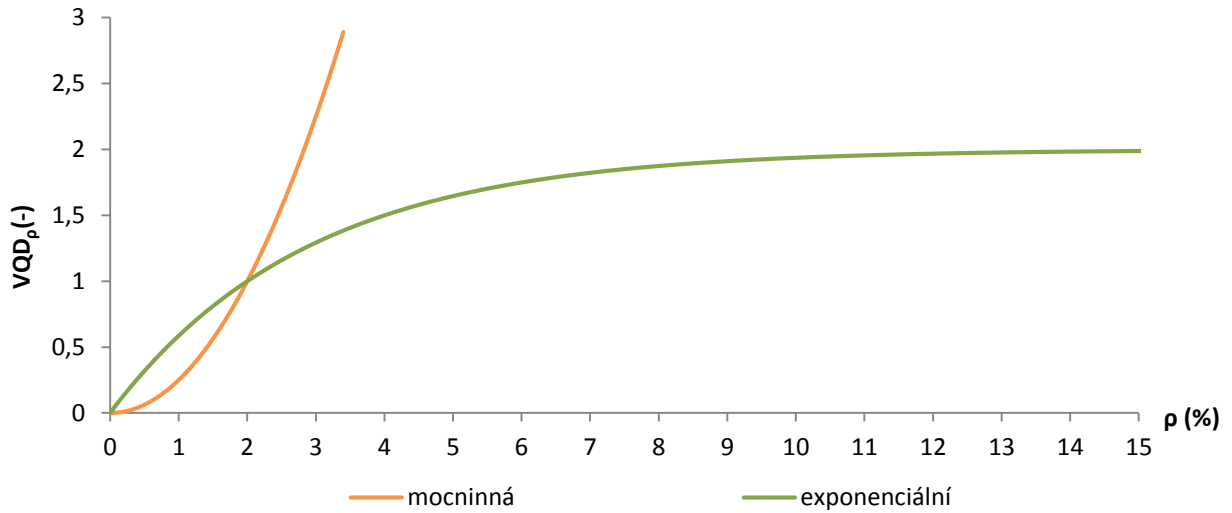
$$\xi_x^{(s,n,l)} = 2 - 2 \cdot EXP\left(\frac{\ln(0,5) \cdot x^{(s,n,l)}}{x_{CL}}\right); \text{ pro } x^{(s,n,l)} \in \langle 0; \infty \rangle \quad (3.10)$$

Je to spojitá funkce, která s rostoucí odchylkou od ideální hodnoty snižuje citlivost na tuto odchylku. Tato funkce je navržena tak, že při dosažení hranice kompatibilní úrovně je funkce rovna hodnotě 1 a tedy VQI je roven nule. Jak je vidět na Obr. 3.2, tato funkce má zpočátku velkou strmost, se zvyšující se odchylkou strmost klesá, proto tato funkce není vhodná pro hodnocení kvality napětí, ale je naopak vhodná pro hodnocení mimo kompatibilní úroveň, kdy strmost už není tak velká.

Mocninná funkce

$$\xi_x^{(s,n,l)} = \left(\frac{x^{(s,n,l)}}{x_{CL}}\right)^2; \text{ pro } x^{(s,n,l)} \in \langle 0; \infty \rangle \quad (3.11)$$

Tato funkce je opakem předchozího typu funkce. V tomto případě s rostoucí odchylkou od ideální hodnoty, citlivost funkce roste. Počáteční necitlivost jde regulovat mocnitelem funkce. Pro tuto funkci není vhodné omezovat obor hodnot pouze od 0 do 2 jako v předchozích případech z důvodu velké strmosti funkce u větších odchylek. V tomto případě může oproti předchozím funkcím výsledný VQI nabývat hodnot i nižších než -1. Ovšem pro velkou strmost není vhodná pro hodnocení nekvality napětí.



Obr. 3.2 - Grafické porovnání exponenciální a mocninné funkce na příkladu hodnocení odchyly kvality napětí v závislosti na velikosti nesymetrie

Kombinace mocninné a exponenciální funkce

Jelikož exponenciální funkce není příliš vhodná pro hodnocení kvality kvůli počáteční velké strmosti a naopak mocninná funkce je nevhodná kvůli konečné strmosti lze udělat kombinaci obou funkcí, která by vypadala následovně:

$$\begin{aligned}
 & \xi_x^{(s,n,l)} \\
 \text{a) } & = \begin{cases} \left(\frac{x^{(s,n,l)}}{x_{CL}}\right)^2 & ; \quad \text{pro } 0 \leq x^{(s,n,l)} \leq x_{CL} \\ 2 - 2 \cdot \text{EXP}\left(\frac{\ln(0,5) \cdot x^{(s,n,l)}}{x_{CL}}\right) & ; \text{pro } x^{(s,n,l)} \geq x_{CL} \\ 2 & ; \quad \text{pro } (x^{(s,n,l)} \geq x_{max+}) \end{cases} \quad (3.12)
 \end{aligned}$$

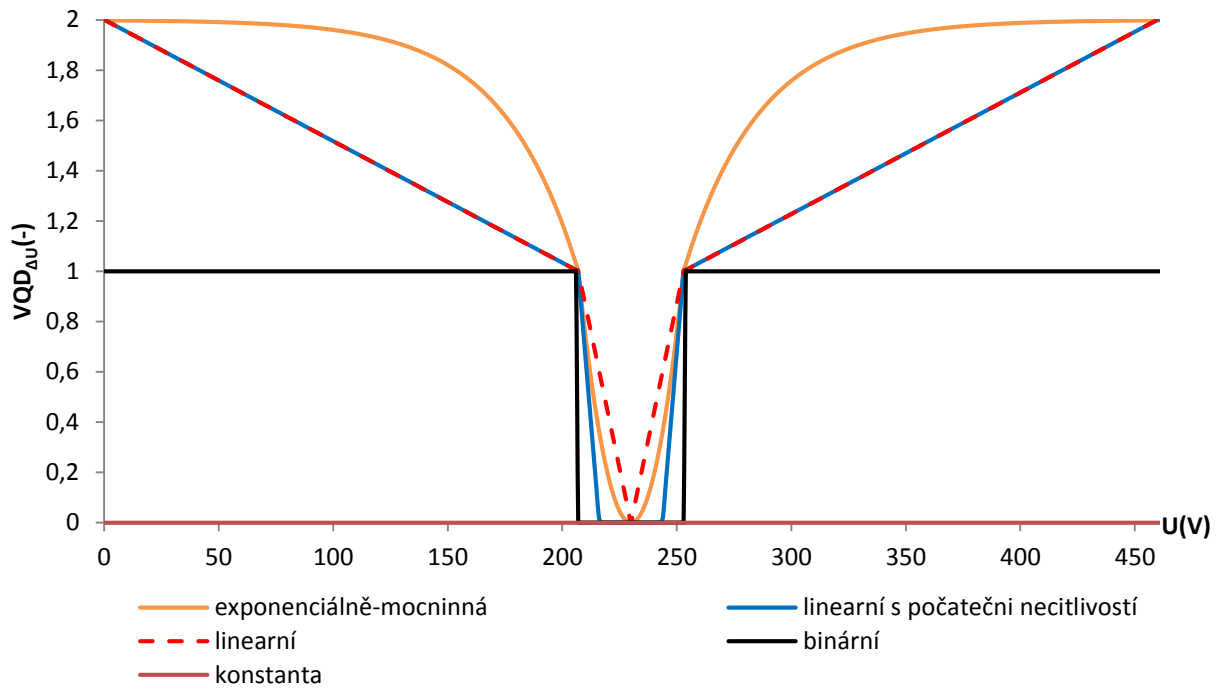
Tedy mocninná funkce bude hodnotit daný parametr v mezích kompatibilní úroveň a exponenciální funkce hodnotí parametr mimo kompatibilní úroveň. Tato kombinovaná funkce je graficky porovnána společně s ostatními funkcemi na grafech na Obr. 3.3, Obr. 3.4, Obr. 3.5 a Obr. 3.6

$$\begin{aligned}
 \text{b) } & \xi_x^{(s,n,l)} = \begin{cases} \left(\frac{x^{(s,n,l)}}{x_{CL}}\right)^2 & ; \quad \text{pro } 0 \leq |x^{(s,n,l)}| \leq x_{CL} \\ 2 - 2 \cdot \text{EXP}\left(\frac{\ln(0,5) \cdot |x^{(s,n,l)}|}{x_{CL}}\right) & ; \text{pro } \begin{cases} -x_{CL} \geq x^{(s,n,l)} \geq x_{max-} \\ x_{CL} \leq x^{(s,n,l)} \leq x_{max+} \end{cases} \\ 2 & ; \quad \text{pro } (x^{(s,n,l)} \geq x_{max+}) \cup (x^{(s,n,l)} \geq x_{max-}) \end{cases} \quad (3.13)
 \end{aligned}$$

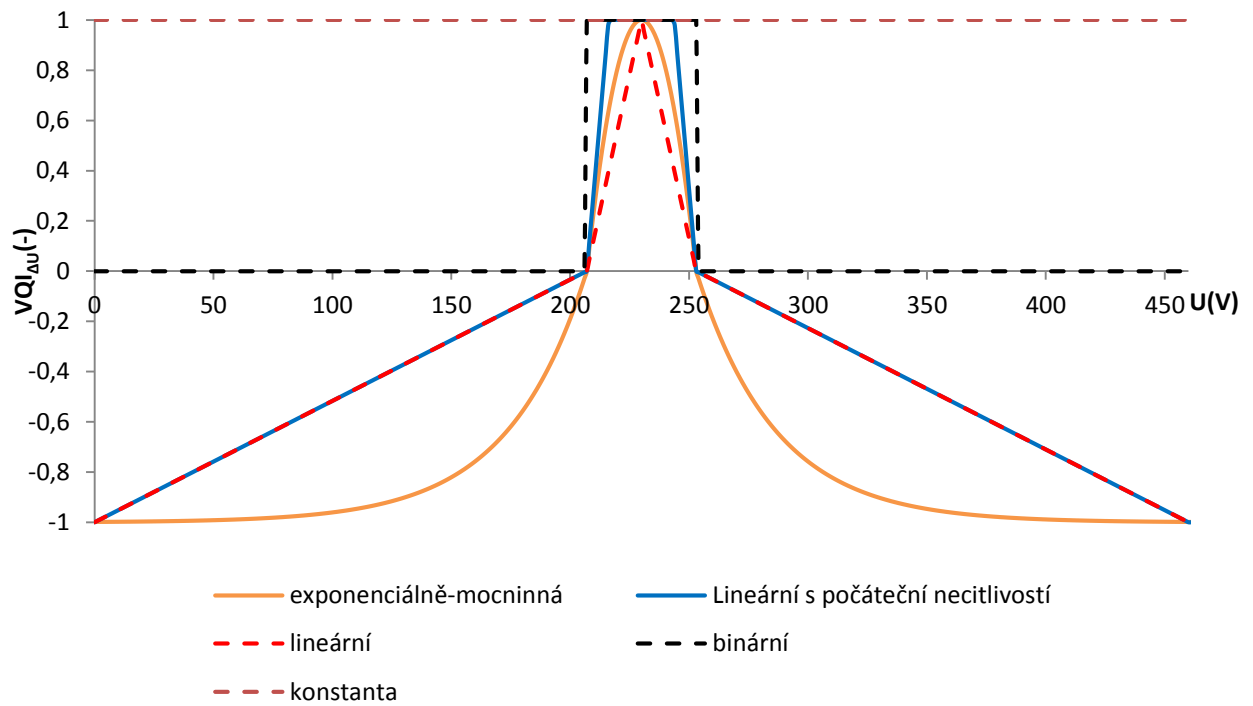
Varianta kombinace exponenciální a mocninné funkce podle vztahu (3.13) je použitelná pro parametry, jejichž kompatibilní úroveň je ohraničená od ideální hodnoty x_{nom} ze dvou stran, kdežto pro parametry ohraničené z jedné strany je navržena funkce (3.12).

Hodnotící funkce jsou graficky znázorněny na Obr. 3.3 a Obr. 3.4 pro hodnocení velikosti napětí. Můžeme zde pozorovat, že lineární funkce a lineární funkce s počáteční necitlivostí se pro hodnocení nekvality překrývají a liší se pouze v pásmu kompatibility kvůli úmyslné počáteční necitlivosti.

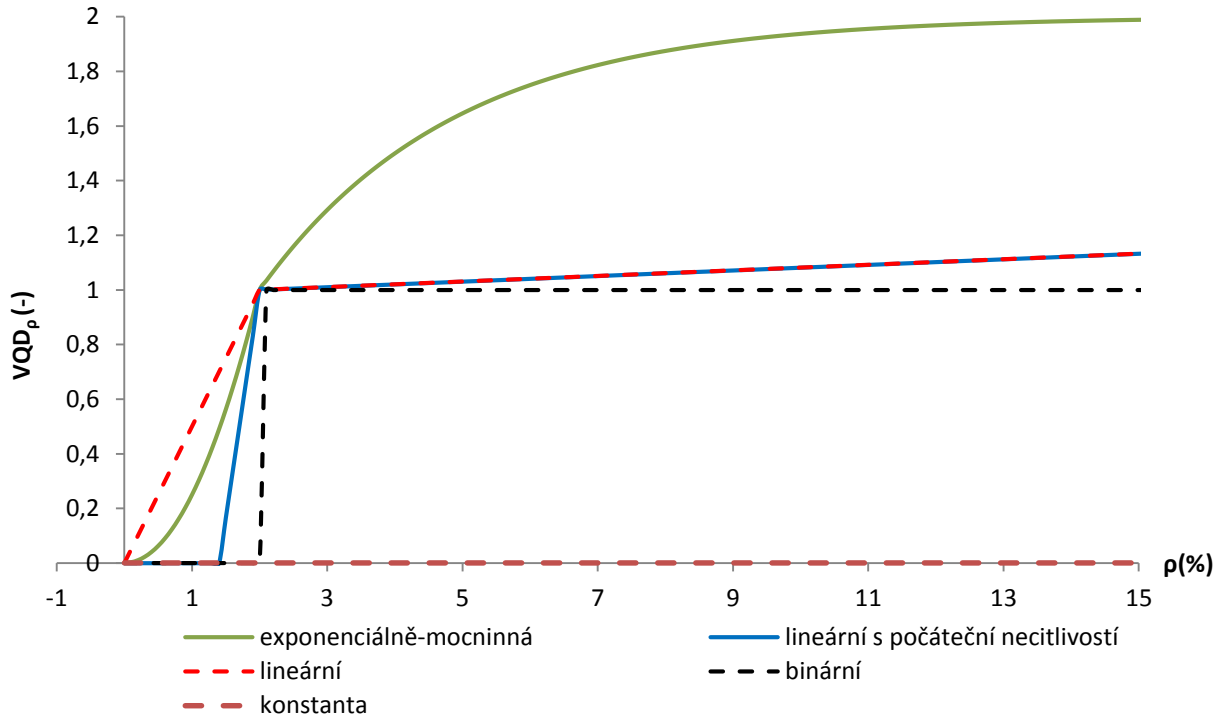
Dále na Obr. 3.5 a Obr. 3.6 jsou graficky znázorněny hodnotící funkce na příkladu hodnocení velikosti napěťové nesymetrie.



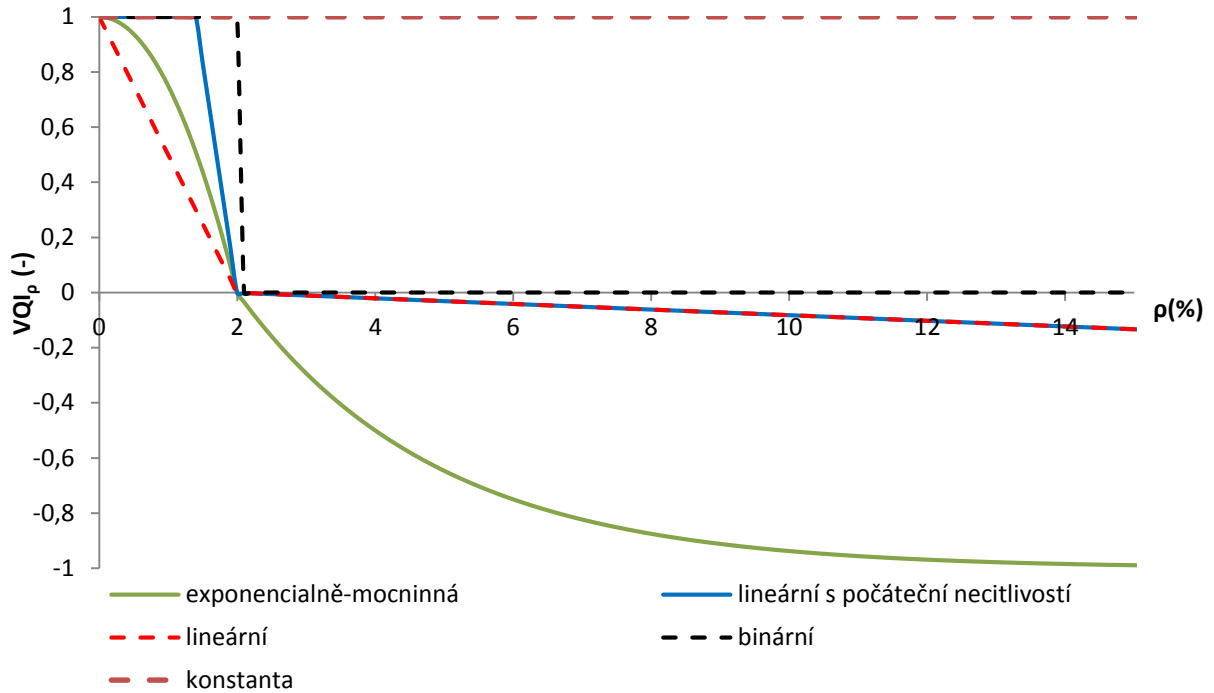
Obr. 3.3- - Grafické porovnání funkcí z kapitoly 3.1 na příkladu hodnocení odchylky kvality napětí v závislosti na velikosti napětí



Obr. 3.4 - Grafické porovnání funkcí z kapitoly 3.1 na příkladu hodnocení kvality napětí v závislosti na velikosti napětí



Obr. 3.5 - Grafické porovnání funkcí z kapitoly 3.1 na příkladu hodnocení odchylky kvality napětí v závislosti na velikosti nesymetrie



Obr. 3.6 - Grafické porovnání funkcí z kapitoly 3.1 na příkladu hodnocení kvality napětí v závislosti na velikosti THD_U

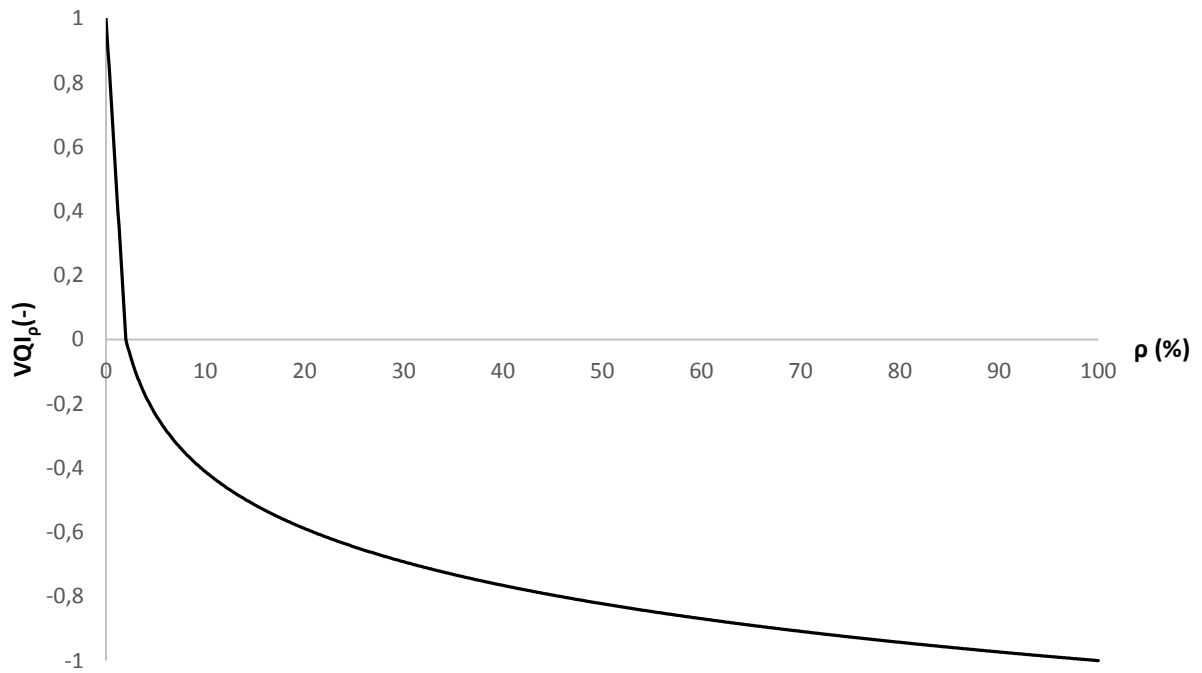
Nejúčelnější pro hodnocení kvality napětí a jejího vývoje je použití lineární funkce. Použití lineární funkce v celém rozsahu ovšem není vhodné z důvodu, že x_{max} je ve většině charakteristik umístěno ve velké vzdálenosti od kompatibilní úrovně x_{CL} , a při velkých změnách jednotlivých parametrů $x^{(s,n,l)}$ mimo kompatibilní úroveň by docházelo pouze k nepatrným změnám pohybu VQI_x . Z toho důvodu je vhodné zkombinovat 2 funkce a to tak, že pro kompatibilní úroveň by byla použita lineární funkce a mimo kompatibilní úroveň by byla použita funkce exponenciální, která má z počátku větší strmost, která se zvětšujícím parametrem snižuje. Ovšem kvůli obtížnému nastavování exponenciální funkce tak, aby v hodnotě x_{max+} byla funkce rovna $\xi_x^{(s,n,l)} = 2$ a zároveň v hodnotě x_{CL} byla funkce rovna $\xi_x^{(s,n,l)} = 1$, jsem zvolil funkci logaritmickou. Kombinace lineární a logaritmické funkce vypadá následovně:

$$a) \quad \xi_x^{(s,n,l)} = \begin{cases} \frac{x^{(s,n,l)}}{x_{CL}} ; & \text{pro } 0 \leq x^{(s,n,l)} \leq x_{CL} \\ a \cdot \ln(x^{(s,n,l)}) + b ; & \text{pro } x_{CL} \leq x^{(s,n,l)} \leq x_{max+} \\ 2 ; & \text{pro } x^{(s,n,l)} \geq x_{max+} \end{cases} \quad (3.14)$$

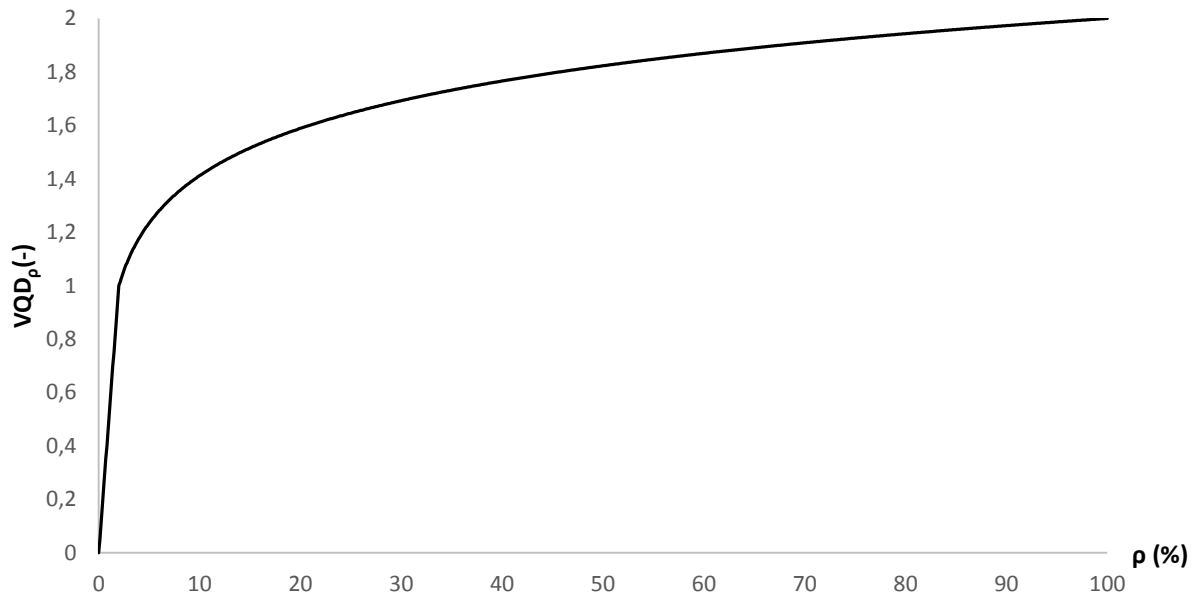
kde členy a a b mají hodnotu:

$$a = \frac{1}{\ln\left(\frac{x_{max+}}{x_{CL}}\right)} \quad (3.15)$$

$$b = 2 - a \cdot \ln(x_{max+}) \quad (3.16)$$



Obr. 3.7 - Grafická závislost indexu VQI na napěťové nesymetrii při použití kombinované lineárně-logaritmické funkce



Obr. 3.8 - Grafická závislost odchylky VQD na napěťové nesymetrii při použití kombinované lineárně-logaritmické funkce

Pro parametry, jejichž kompatibilní úroveň je ohraničená od ideální hodnoty x_{nom} ze dvou stran vypadá kombinace lineárně-logaritmické funkce následovně:

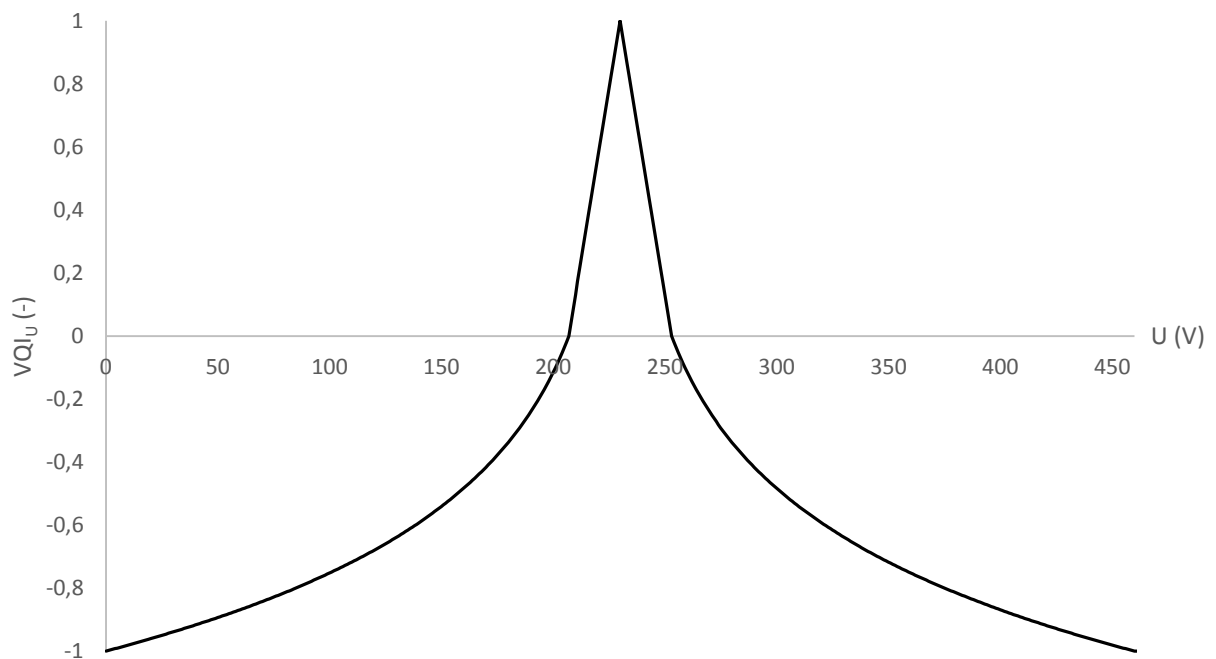
$$b) \quad \xi_x^{(s,n,l)} = \begin{cases} \frac{x^{(s,n,l)}}{x_{CL}}; & \text{pro } 0 \leq x^{(s,n,l)} \leq x_{CL} \\ a \cdot \log(x^{(s,n,l)}) + b; & \text{pro } x_{CL} \leq x^{(s,n,l)} \leq x_{max+} \\ c \cdot \log(|x^{(s,n,l)}|) + d; & \text{pro } -x_{CL} \geq x^{(s,n,l)} \geq x_{max-} \\ 2; & \text{pro } (x^{(s,n,l)} \geq x_{max+}) \cup (x^{(s,n,l)} \leq x_{max-}) \end{cases} \quad (3.17)$$

kde členy a a b se vypočítají podle vztahu (3.15) a (3.16), členy c a d se vypočítají dle vztahu (3.18) a (3.19).

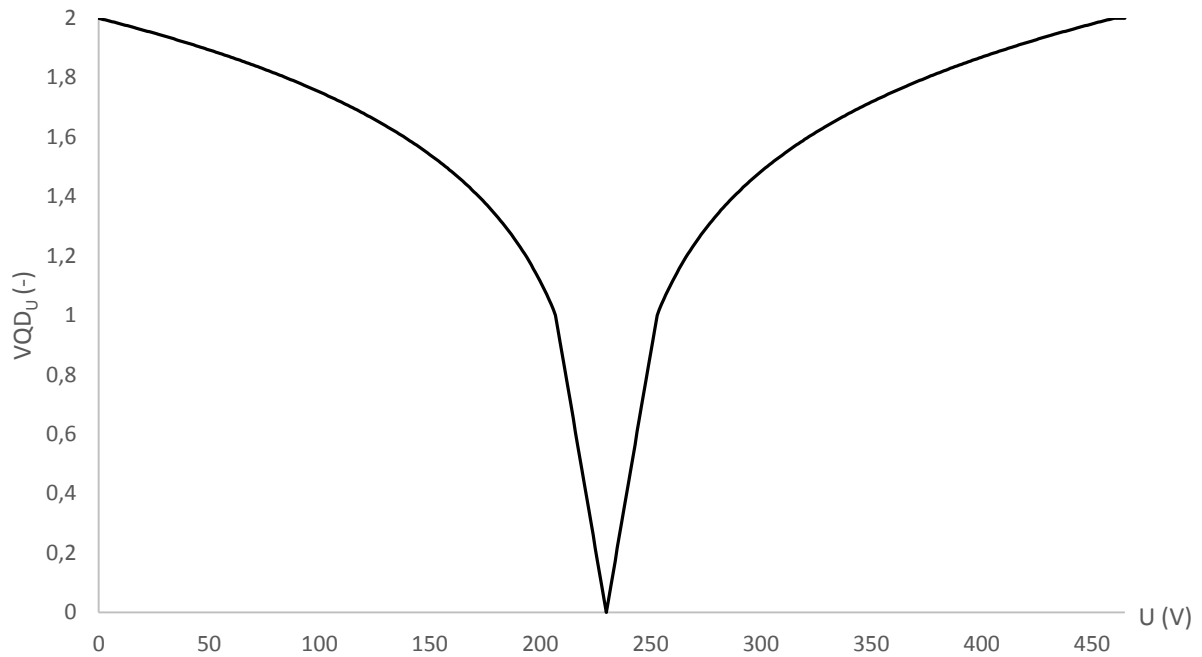
$$c = \frac{1}{\log \left| \frac{x_{max+}}{x_{CL}} \right|} \quad (3.18)$$

$$d = 2 - c \cdot \log |x_{max-}| \quad (3.19)$$

Grafické zobrazení hodnocení podle vztahu (3.17) je zobrazeno na Obr. 3.9 a Obr. 3.10 na příkladu hodnocení odchylky velikosti napětí.



Obr. 3.9 - Grafická závislost indexu VQI na velikosti napětí při použití kombinované lineárně-logaritmické funkce



Obr. 3.10 - Grafická závislost odchylky VQD na velikosti napětí při použití kombinované lineárně-logaritmické funkce

3.2 Slučovací funkce

Z dílčích indexů pro jednotlivé parametry VQI_x je potřeba vytvořit jeden společný index VQI , který by dostatečně popsal kvalitu napětí. Toho se docílí použitím určité slučovací funkce. Tato funkce by měla správně určit celkovou kvalitu napětí, tedy když bude jeden z dílčích indexů nulový nebo menší než 1, součinnová funkce musí výsledný index vyhodnotit taktéž jako nulový či záporný. Dalším požadavkem na slučovací funkci je, aby výsledný index dobře popsal vývoj kvality napětí, tedy aby bylo z výsledného indexu zjistitelné, jestli došlo ke zlepšení či zhoršení stavu kvality napětí oproti předchozímu stavu. Dále by bylo vhodné, aby slučovací funkce byla spojitá, tedy aby při plynulé změně jednoho z dílčích indexů nedocházelo ke skokové změně celkového indexu.

Nabízí se několik řešení použití součinnových a součtových funkcí, které využívají aritmetický či geometrický průměr nebo jednoduchý součin dílčích indexů. Tyto funkce jsou detailně rozebrány v následujících podkapitolách.

3.2.1 Aritmetický průměr

Jako nejjednodušší řešení se jeví použít součtovou funkci ve formě aritmetického průměru.

$$a) \quad VQI_A = \frac{1}{I} \sum_{i=1}^I VQI_{x(i)} \quad (3.20)$$

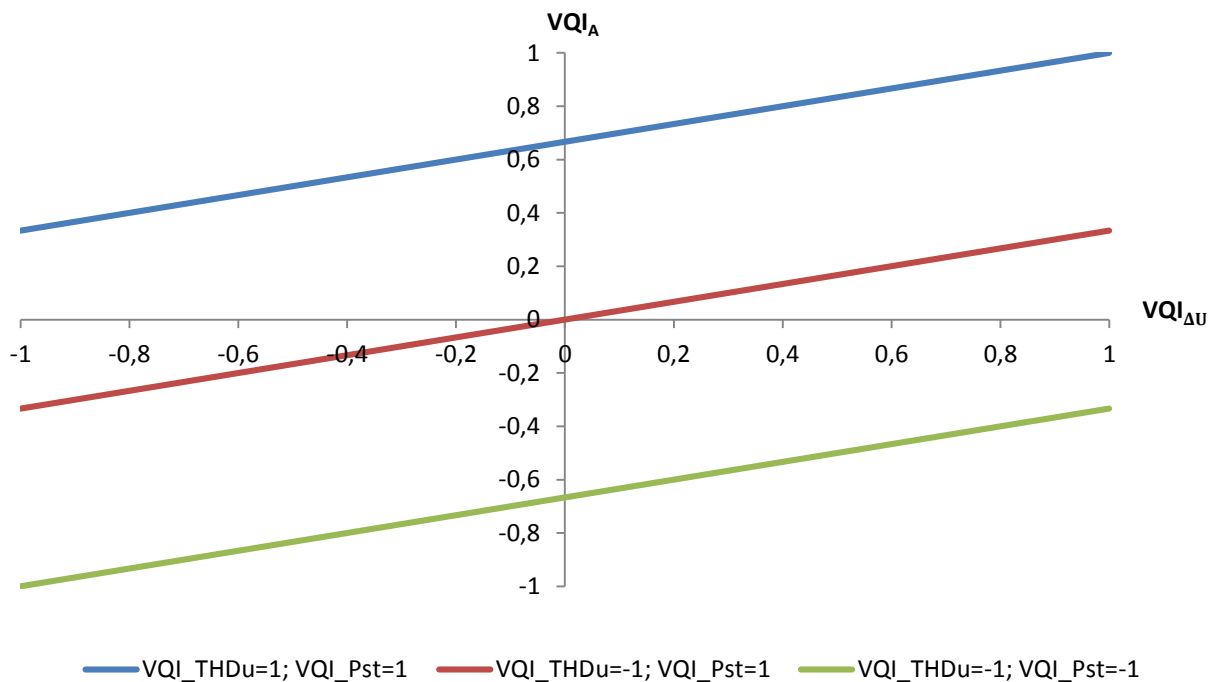
Grafické zobrazení této funkce za různých hodnot dílčích indexů je znázorněn na Obr. 3.11.

Tento způsob je vhodný pouze pro orientační měření nebo pro porovnávání zlepšení či zhoršení stavu sítě. Z hlediska stanovení celkové kvality napětí není aritmetický průměr vhodný,

protože můžou nastat případy, kdy je jeden nebo několik dílčích indexů záporných, tedy nevyhovujících, ale po sloučení pomocí aritmetického průměru může být hodnota celkového indexu kladná. Například pokud by bylo zjištěno, že hodnoty dvou dílčích indexů pro jednofázové parametry jsou rovny hodnotám: $VQI_{THDu(1)} = 1$, $VQI_{Pst(1)} = 1$, tedy ideálnímu stavu a index hodnotící velikost napětí je roven $VQI_{\Delta U(1)} = -1$ tedy absolutně nevyhovujícím stavu. Výsledný index podle vztahu (3.15) se potom vyjádří jako:

$$VQI_{A(1)} = \frac{1}{3}(1 + 1 - 1) = 0,3 \quad (3.21)$$

Pro tento případ výsledný index vypočítaný pomocí aritmetického průměru chybně ukazuje kvalitu napětí jako vyhovující (index je kladný), ačkoliv kritérium pro velikost napětí není splněno. Pokud bychom provedli druhé měření a index hodnotící velikost napětí by se zlepšil na hodnotu $VQI_{\Delta U(2)} = -0,5$ a ostatní indexy $VQI_{x(2)}$ by zůstaly stejné, hodnota výsledného indexu by se změnila na $VQI_{A(2)} = 0,5$. Druhé měření by tedy ukázalo opět chybné stanovení kvality napětí, ale správně by ukázalo zlepšení kvality oproti předchozímu případu ($VQI_{A(1)} < VQI_{A(2)}$).



Obr. 3.11 - Závislost celkového indexu jednofázových parametrů vypočítaného pomocí aritmetického průměru na indexu popisujícím velikost napětí, pro různé hodnoty dílčích indexů

Pokud bychom chtěli aplikovat aritmetický průměr na zjištění celkového indexu, použijeme následující vztah (3.22) [6],

$$VQI_A = \frac{1}{S[X_0 + N(X_3 + 3X_1)]} \sum_s \left[\sum_{x_0}^{X_0} VQI_{x_0}^{(s)} + \sum_n \left[\sum_{x_3}^{X_3} [VQI_{x_3}^{(s,n)}] + \sum_l \left[\sum_{x_1}^{X_1} [VQI_{x_1}^{(s,n,l)}] \right] \right] \right] \quad (3.22)$$

kde S je celkový počet hodnocených stavů, N celkový počet hodnocených uzlů, a X_0 počet globálních hodnocených parametrů, X_3 počet třífázových hodnocených parametrů a X_1 je počet jednofázových hodnocených parametrů. Celkový počet hodnocených stavo-uzlo-parametrů SNX je pak [6]:

$$SNX = S[X_0 + N(X_3 + 3X_1)] \quad (3.23)$$

Pokud bychom pomocí aritmetického průměru zjišťovali, zda kvalita napětí vyhovuje zavedenému standardu, musí se výchozí vztah upravit přidáním podmínky například podle vztahu (3.24),

$$b) \quad VQI_A = \begin{cases} \frac{1}{I} \sum_{i=1}^I VQI_{x(i)}; & \text{jsou - li všechny } VQI_{x(i)} > 0 \\ \frac{1}{I} \sum_{i=1}^I \alpha_{x(i)}; & \text{je - li alespon 1 } VQI_{x(i)} \leq 0 \end{cases} \quad (3.24)$$

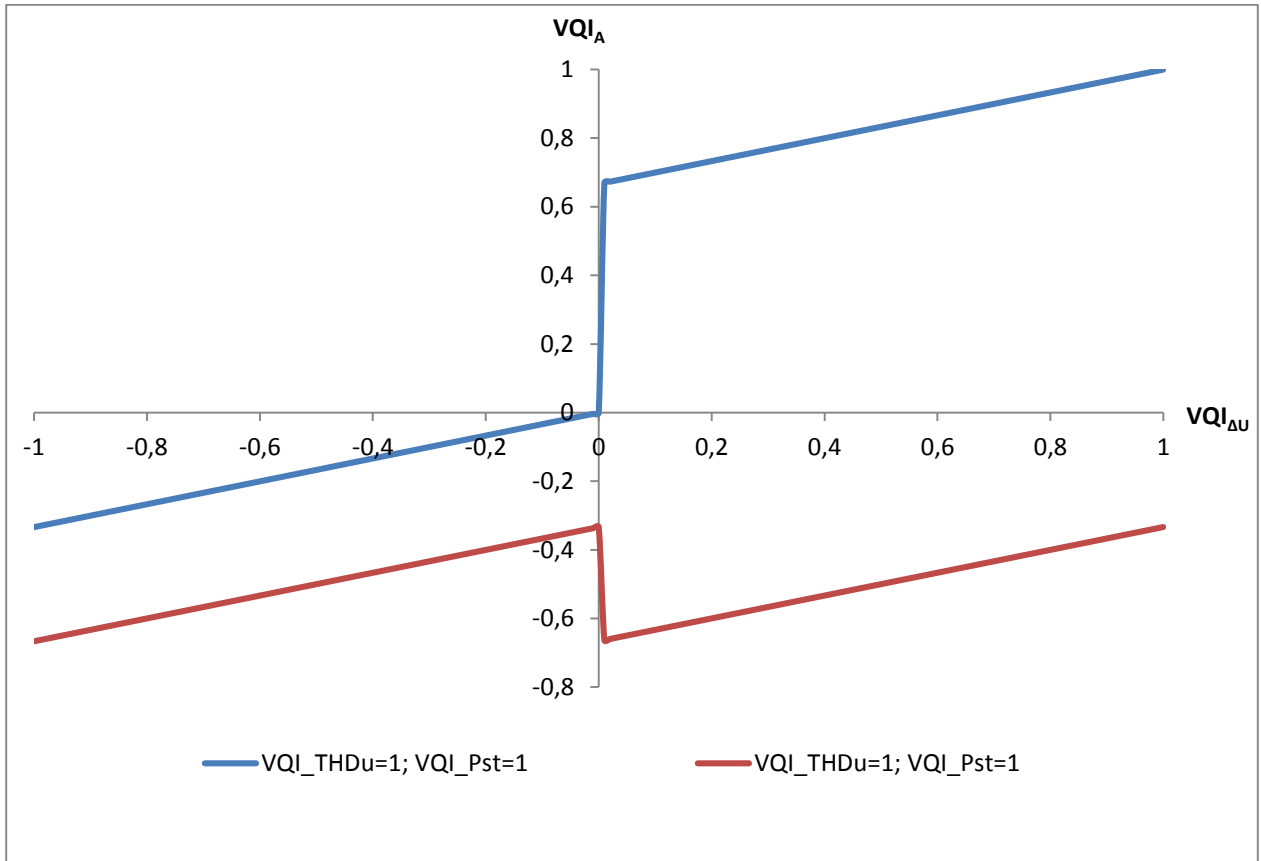
kde α_x je upravená hodnota dílčího indexu pro stanovení kvality aritmetickým průměrem a určí se jako:

$$\alpha_x = \begin{cases} VQI_x; & \text{pro } VQI_x \leq 0 \\ VQI_x - 1; & \text{pro } VQI_x > 0 \end{cases} \quad (3.25)$$

Pokud použijeme stejný příklad jako pro funkci (3.21), tedy dílčí indexy budou rovny $VQI_{THDu(1)} = 1$, $VQI_{Pst(1)} = 1$, $VQI_{\Delta U(1)} = -1$. Výsledný index se určí jako:

$$VQI_{A(1)} = \frac{1}{3} ((1 - 1) + (1 - 1) - 1) = -0, \bar{3} \quad (3.26)$$

Tato upravená funkce už správně vyhodnotí kvalitu napětí jako nevyhovující. Pokud bychom provedli druhý výpočet se stejnými hodnotami dílčích indexů, jen se změnou indexu popisující velikost napětí na hodnotu $VQI_{\Delta U(2)} = -0,5$, tak výsledný index bude roven hodnotě $VQI_{A(2)} = -0,1\bar{6}$. Správně by tedy vyhodnotil kvalitu jako nevyhovující a současně by bylo vidět zlepšení oproti prvnímu výpočtu.



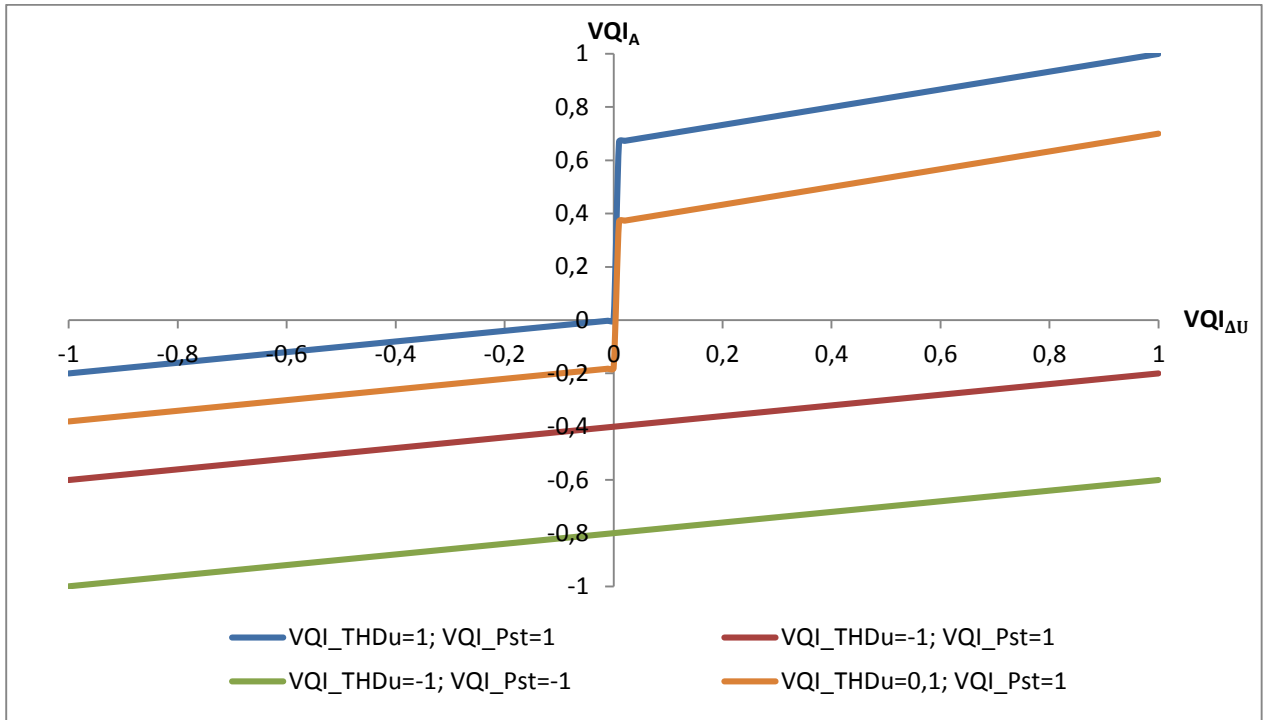
Obr. 3.12 - Závislost celkového indexu jednofázových parametrů vypočítaného pomocí vztahu (3.24) na indexu popisujícím velikost napětí, pro různé hodnoty dílčích indexů

Nevýhodou této funkce je, že mohou nastat situace, kdy kladný vyhovující dílčí index bude mít stejnou váhu jako záporný nevyhovující dílčí index, jak je vidět na Obr. 3.12, což je pro hodnocení kvality nepřijatelné. Tuto nedokonalost odstraníme úpravou funkce následovně:

$$c) \quad VQI_A = \begin{cases} \frac{1}{I} \sum_{i=1}^I VQI_{x(i)}; & \text{jsou – li všechny } VQI_x > 0 \\ \frac{2I}{2I-1} \left(\frac{1}{I} \sum_{i=1}^I \left[\frac{\alpha_{x(i)}}{2} \right] - \frac{n-1}{2 \cdot I} \right); & \text{je – li alespon 1 } VQI_x \leq 0 \end{cases} \quad (3.27)$$

kde n je počet dílčích indexů $VQI_x \leq 0$ a I je celkový počet dílčích indexů

Funkce (3.27) umožní bezpečně určit celkovou kvalitu napětí a dokáže spolehlivě popsat vývoj kvality napětí. Ovšem nevýhodou této funkce je složitý vzorec a nespojitost za určitých podmínek, jak je vidět na Obr. 3.13.



Obr. 3.13 - Závislost celkového indexu jednofázových parametrů vypočítaného pomocí vztahu (3.27) na indexu popisujícím velikost napětí, pro různé hodnoty dílčích indexů

Celkový index kvality napětí bychom pak spočítali při aplikaci vztahu (3.27) jako:

$$VQI_A = \begin{cases} \frac{1}{SNX} \sum_s \left[\sum_{x_0}^{x_0} VQI_{x_0}^{(s)} + \sum_n \left[\sum_{x_3}^{x_3} [VQI_{x_3}^{(s,n)}] + \sum_l \left[\sum_{x_1}^{x_1} [VQI_{x_1}^{(s,n,l)}] \right] \right] \right]; & \text{jsou - li všechny } VQI_x > 0 \\ \frac{2SNX}{2SNX - 1} \left[\sum_s \left[\sum_{x_0}^{x_0} \frac{\alpha_{x_0}^{(s)}}{2} + \sum_n \left[\sum_{x_3}^{x_3} \left[\frac{\alpha_{x_3}^{(s,n)}}{2} \right] + \sum_l \left[\sum_{x_1}^{x_1} \left[\frac{\alpha_{x_1}^{(s,n,l)}}{2} \right] \right] \right] \right] - \frac{n-1}{2 \cdot SNX} \right]; & \text{je - li alespoň 1 } VQI_x \leq 0 \end{cases} \quad (3.28)$$

3.2.2 Součin dílčích indexů

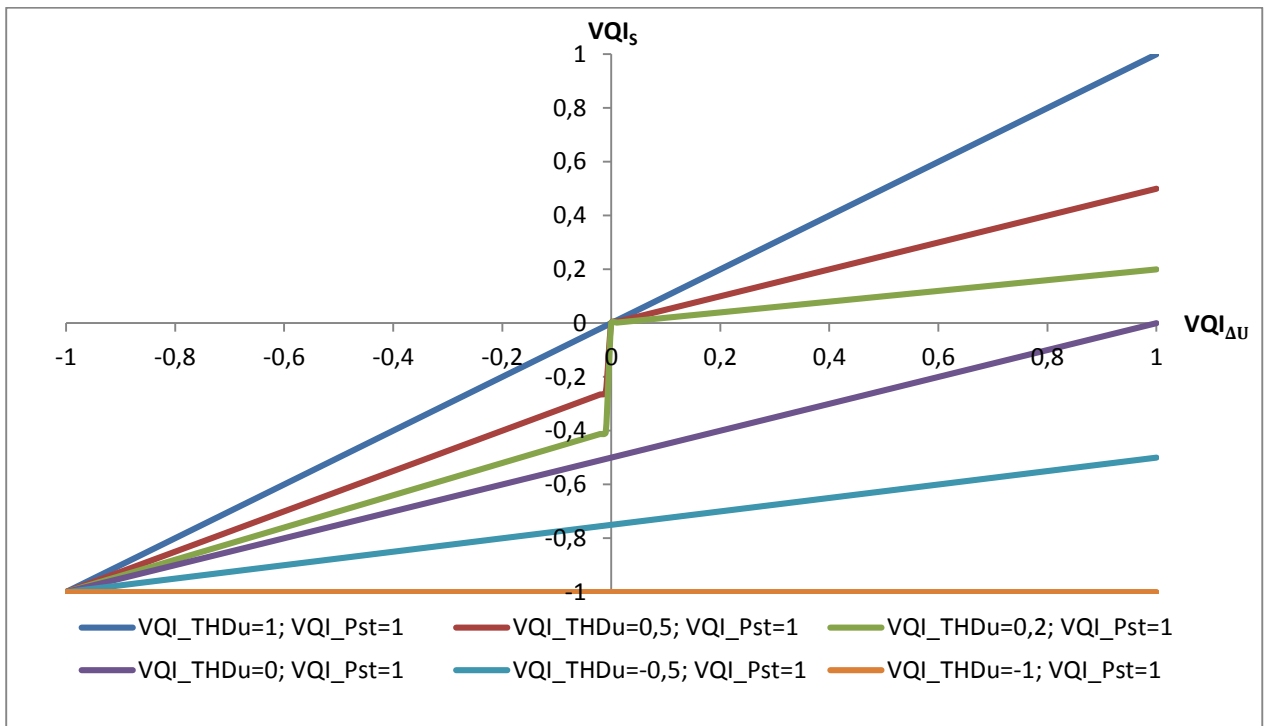
Jako slučovací funkci lze použít jednoduchý součin dílčích indexů, podle vztahu (3.29).

$$a) \quad VQI_S = \prod_{i=1}^I VQI_{x(i)} \quad (3.29)$$

Použití součinu je vhodné pro VQI s definovaným oborem hodnot 0 až 1. Výhodou této funkce je, že pokud je jediný dílčí index nulový, je pak nulový i celkový index VQI_S . Toto řešení není vhodné pro posuzování nekvality napětí, neboť u sudého počtu záporných dílčích indexů bude výsledný index kladný. Pokud se vztah ošetří podmínkou, že když bude alespoň jeden dílčí index záporný, bude záporný i výsledný index, nastane další problém a to takový, že výsledný index bude nejvíce ovlivněn dílčím indexem, který bude nejbližší nule a nikoliv nejnižším indexem, kterým by bylo potřeba. Mohu uvést na příkladu: pokud bychom slučovali dva dílčí indexy, z nichž první by

měl hodnotu $VQI_{THD(1)} = -0,2$ a druhý $VQI_{\Delta U(1)} = 0$, výsledný součinný index by pak ukázal hodnotu $VQI_{S(1)} = 0$. Pokud bychom měli druhý stav, kdy $VQI_{THD(2)} = -0,5$ a druhý index $VQI_{\Delta U(2)} = 0$, tak by opět výsledný index byl roven $VQI_{S(2)} = 0$ i přes značné zhoršení jednoho z dílčího indexu. Aby se odstranila tato singularita v 0, byl vzorec upraven následovně:

$$b) \quad VQI_S = \begin{cases} \prod_{i=1}^I VQI_{x(i)}; & \text{jsou - li všechny } VQI_x > 0 \\ \frac{\prod_{i=1}^I (VQI_x + 1)}{2^{I-1}} - 1; & \text{je - li alespon 1 } VQI_x \leq 0 \end{cases} \quad (3.30)$$



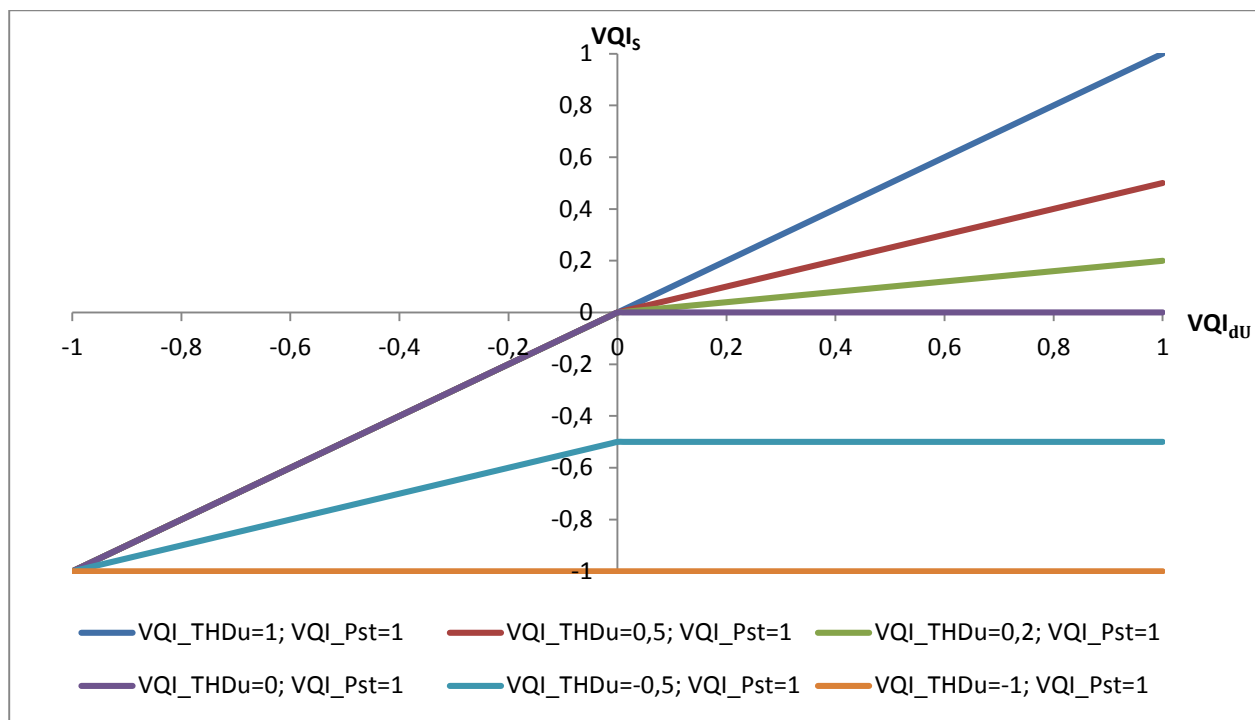
Obr. 3.14 - Závislost celkového indexu jednofázových parametrů vypočítaného pomocí vztahu (3.30) na indexu popisujícím velikost napětí, pro různé hodnoty dílčích indexů

Při použití součinu indexů podle vztahu (3.30) bude hodnota výsledného indexu vždy menší nebo rovna hodnotě nejmenšího dílčího indexu. Určí tedy správně, zdali je kvalita napětí přípustná či nikoliv a byla by tedy vhodná pro on-line hodnocení. Ovšem oproti součtové funkci (3.27) využívající aritmetický průměr, nedokáže vždy spolehlivě posoudit vývoj kvality napětí. Pokud jeden dílčí index bude mít hodnotu $VQI_x = -1$, tak výsledný index bude mít hodnotu vždy $VQI_S = -1$ bez ohledu na výsledky ostatních dílčích indexů. Další nevýhodou této funkce je, že za určitých podmínek se může vyskytovat určitá nespojitost, která lze vidět na Obr. 3.14. Pro eliminování této skokové změny se může funkce upravit podle vztahu (3.31):

$$c) \quad VQI_S = \begin{cases} \prod_{i=1}^I VQI_{x(i)}; & \text{jsou - li všechny } VQI_x \geq 0 \\ -1 + \prod_{n=1}^N (VQI_{\bar{V}QI_{x(n)}} + 1); & \text{je - li alespon 1 } VQI_x < 0 \end{cases} \quad (3.31)$$

kde $VQI_{VQI_x}^-$ je záporný dílčí index, I je celkový počet dílčích indexů a N je celkový počet záporných indexů.

Tedy jsou-li všechny dílčí indexy kladné, užije se jednoduchý součin všech dílčích indexů, je-li alespoň jeden dílčí index záporný, počítá se pouze se zápornými dílčími indexy.



Obr. 3.15 - Závislost celkového indexu jednofázových parametrů vypočítaného pomocí vztahu (3.31) na indexu popisujícím velikost napětí, pro různé hodnoty dílčích indexů

Na **Chyba! Nenalezen zdroj odkazů.** lze vidět, že znázorněná funkce už je spojitá, ovšem má zhoršenou schopnost popisu vývoje kvality napětí. Pokud se tedy bude vyskytovat jeden nebo více záporných dílčích indexů, kladné dílčí indexy nebudou mít na výsledný index žádný vliv.

Celkový index kvality napětí bychom pak spočítaly při aplikaci vztahu (3.31) jako:

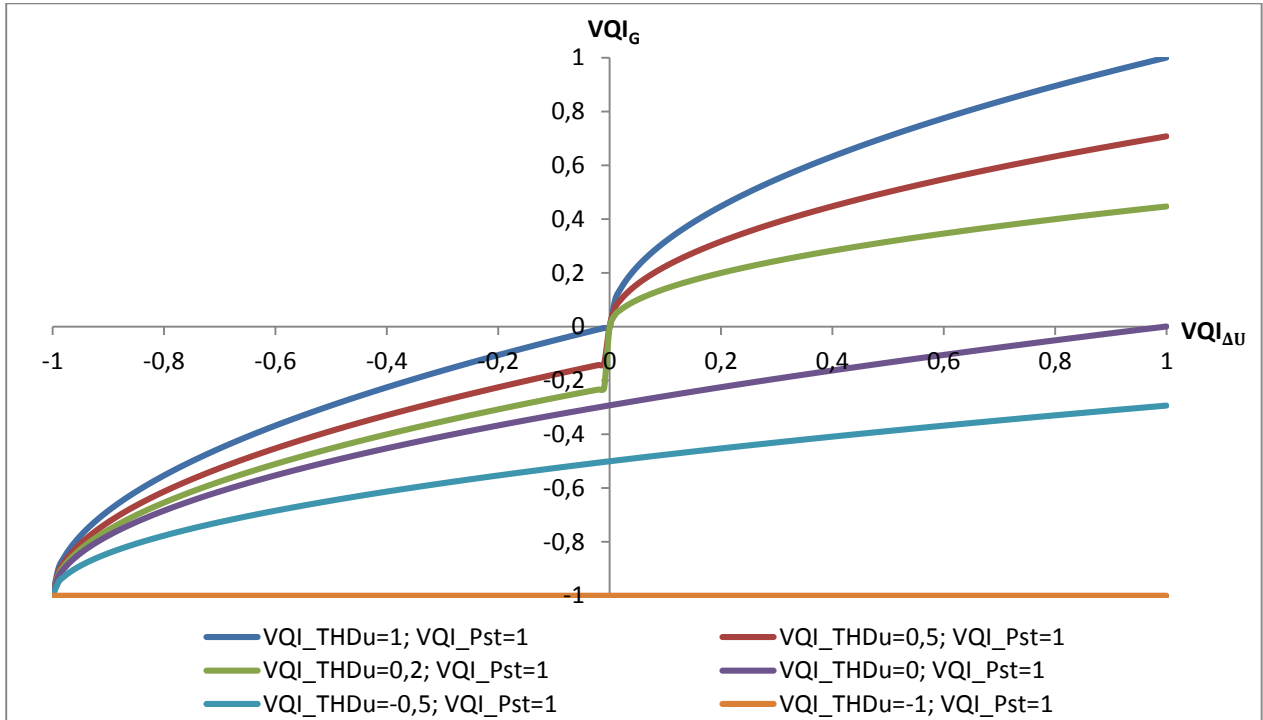
$$VQI_S = \begin{cases} \prod_s \left[\prod_{x_0}^{x_0} VQI_{x_0}^{(s)} \cdot \prod_n \left[\prod_{x_3}^{x_3} VQI_{x_3}^{(s,n)} \cdot \prod_l \left[\prod_{x_1}^{x_1} VQI_{x_1}^{(s,n,l)} \right] \right] \right]; \text{ jsou - li všechny } VQI_x \geq 0 \\ -1 + \prod_s \left[\prod_{x_0}^{x_0} (VQI_{x_0}^{-(s)} + 1) \cdot \prod_n \left[\prod_{x_3}^{x_3} (VQI_{x_3}^{-(s,n)} + 1) \cdot \prod_l \left[\prod_{x_1}^{x_1} (VQI_{x_1}^{-(s,n,l)} + 1) \right] \right] \right]; \text{ je - li alespoň } 1 VQI_x < 0 \end{cases} \quad (3.32)$$

3.2.3 Geometrický průměr

Další jednoduchou součinnou funkcí, kterou je možno použít je součinná funkce v podobě geometrického průměru.

$$a) \quad VQI_G = \sqrt[I]{\prod_{i=1}^I VQI_{x(i)}} \quad (3.33)$$

Použití geometrického průměru je stejně jako u prostého součinu vhodné pro VQI s definovaným oborem hodnot 0 až 1, a bez úpravy se nehodí pro hodnocení nekvality napětí. Geometrický průměr má podobné vlastnosti jako jednoduchý součin, například je-li jeden z dílčích indexů nulový, bude nulový i výsledný index.



Obr. 3.16 - Závislost celkového indexu jednofázových parametrů vypočítaného pomocí geometrického průměru podle vztahu (3.34) na indexu popisujícím velikost napětí, pro různé hodnoty dílčích indexů

Problém nastává, chceme-li hodnotit nekvalitu napětí a jeden z dílčích indexů je záporný. Aby byl geometrický průměr schopný hodnotit i kvalitativně nevyhovující napětí je možné vzorec upravit podle vzorce (3.34).

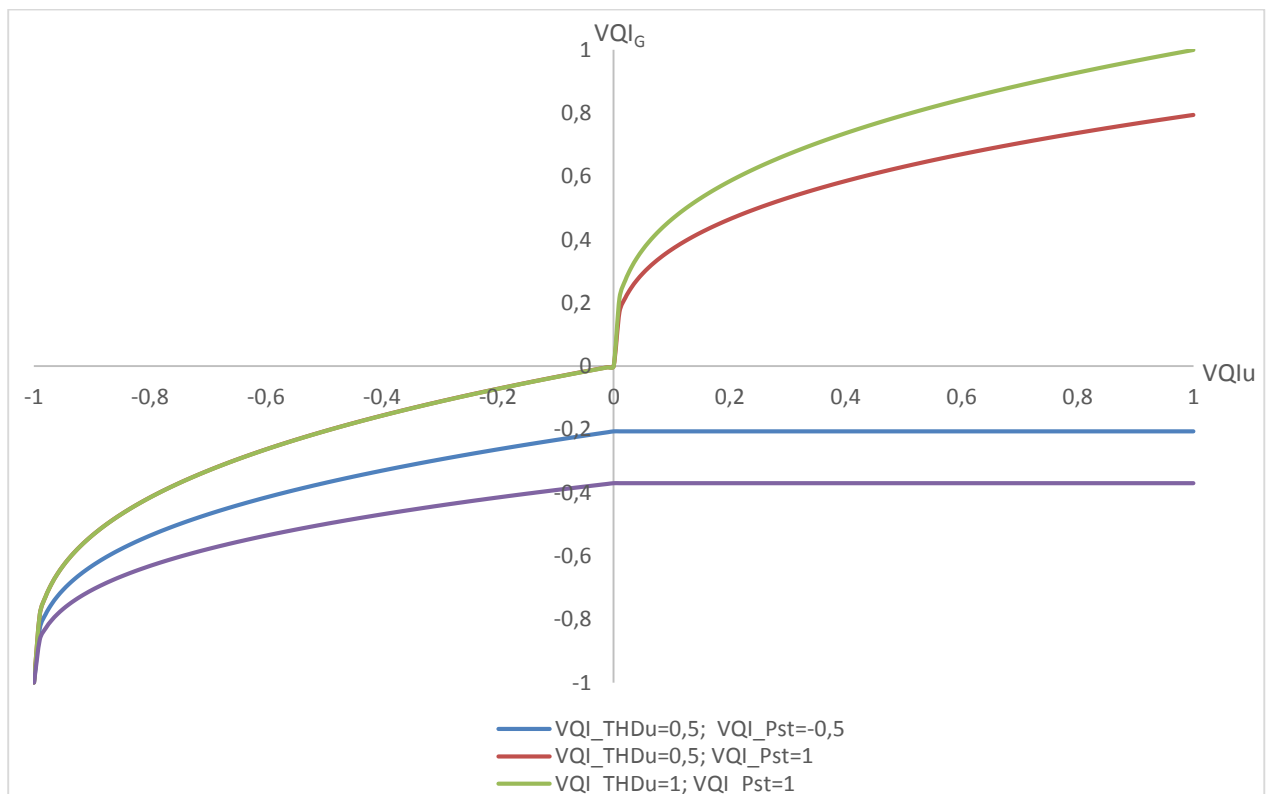
$$b) \quad VQI_G = \begin{cases} \sqrt[I]{\prod_{i=1}^I VQI_{x(i)}}; & \text{jsou – li všechny } VQI_x > 0 \\ \sqrt[I]{\frac{\prod_{i=1}^I (VQI_{x(i)}+1)}{2^{I-1}}} - 1; & \text{je – li alespon } 1 VQI_x \leq 0 \end{cases} \quad (3.34)$$

Funkce (3.34) vycházející z geometrického průměru nemá oproti funkci (3.30) lineární závislost, jak lze vidět na Obr. 3.16. Další rozdílem oproti součinu ze vztahu (3.30) je, že výsledný index může nabývat vyšších hodnot než nejnižší hodnota dílčího indexu. Upravený geometrický průměr také spolehlivě určí kvalitu napětí, zda vyhovuje standardu podobně jako upravený součin,

ale stejně jako součin má sníženou schopnost posoudit vývoj kvality napětí při nižších hodnotách dílčích indexů a nulovou schopnost, pokud je jeden z dílčích indexů roven hodnotě $VQI_x = -1$. Podobně jako u součinu podle vztahu (3.30), vzniká za určitých podmínek nespojitost ve funkci, která je viditelná na Obr. 3.16. Pro napravení této nespojitosti se může funkce ještě upravit podle vztahu (3.35).

$$b) \quad VQI_G = \begin{cases} \sqrt[I]{\prod_{i=1}^I VQI_{x(i)}}; & \text{jsou - li všechny } VQI_x \geq 0 \\ \sqrt[I]{\prod_{n=1}^N (VQI_{VQI_{x(n)}}^{-1} + 1)} - 1; & \text{je - li alespon 1 } VQI_x < 0 \end{cases} \quad (3.35)$$

kde $VQI_{VQI_x}^{-1}$ je záporný dílčí index, I je celkový počet dílčích indexů a N je celkový počet záporných indexů.



Obr. 3.17 - Závislost celkového indexu jednofázových parametrů vypočítaného pomocí geometrického průměru podle vztahu (3.35) na indexu popisujícím velikost napětí, pro různé hodnoty dílčích indexů

Na Obr. 3.17 lze vidět, že už nedochází k žádným skokovým změnám, ovšem obdobně jako v součinné funkci podle vztahu (3.31), došlo zde ke zhoršení vlastnosti popsat vývoj kvality napětí, tedy když se vyskytne jeden nebo více dílčích indexů záporných, tak kladné dílčí indexy nemají vliv na výsledný index. Celkový výsledný index by počítal při aplikaci vzorce (3.35) jako vztah (3.36).

$$VQI_S = \begin{cases} \sqrt[SNX]{\prod_s^S \left[\prod_{x_0}^{X_0} VQI_{x_0}^{(s)} \cdot \prod_n^N \left[\prod_{x_3}^{X_3} VQI_{x_3}^{(s,n)} \cdot \prod_l^L \left[\prod_{x_1}^{X_1} VQI_{x_1}^{(s,n,l)} \right] \right] \right]} ; \text{jsou - li všechny } VQI_x \geq 0 \\ -1 + \sqrt[SNX]{\prod_s^S \left[\prod_{x_0}^{X_0} (VQI_{x_0}^{-(s)} + 1) \cdot \prod_n^N \left[\prod_{x_3}^{X_3} (VQI_{x_3}^{-(s,n)} + 1) \cdot \prod_l^L \left[\prod_{x_1}^{X_1} (VQI_{x_1}^{-(s,n,l)} + 1) \right] \right] \right]} ; \text{je - li alespon 1 } VQI_x < 0 \end{cases} \quad (3.36)$$

4 OVĚŘENÍ NAVRŽENÝCH FUNKCÍ NA REÁLNÉM MĚŘENÍ

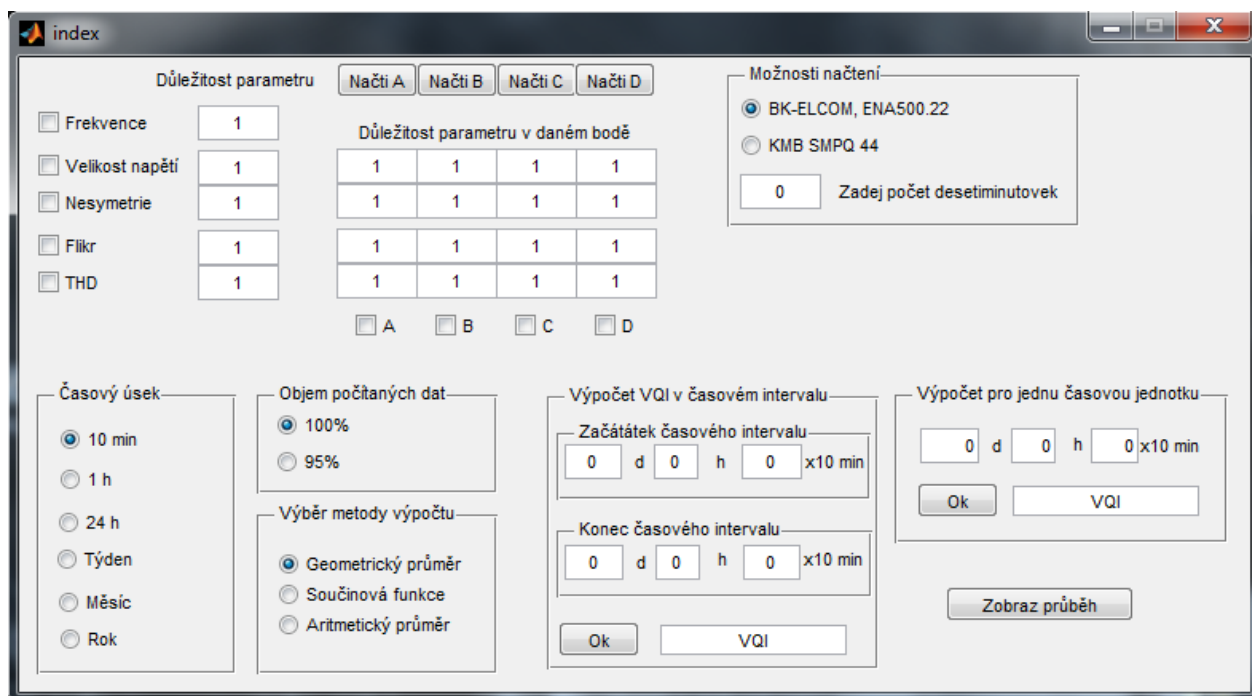
Pro tuto práci bylo provedeno měření kvality napětí, kdy se zaznamenávaly průměrné hodnoty 5 parametrů v desetiminutových měřicích intervalech. Mezi měřené parametry patří kmitočet sítě, velikost napětí, napěťová nesymetrie, hodnota krátkodobého flikru a velikost celkového harmonického zkreslení. Tyto měření proběhli na dvou místech, kdy první měření bylo provedeno síťovým analyzátozem BK-ELCOM ve školních laboratořích kvality elektrické energie, na adrese Technická 12, Brno a bylo naměřeno od každého parametru 1876 desetiminutových hodnot. Druhé měření proběhlo na adrese Lipňany 42, Tršice za použití analyzátoru KMB SMPQ-44, kdy bylo naměřeno od každého parametru 2237 desetiminutových hodnot.

4.1 Program pro porovnání výpočtu VQI

Pro vyhodnocování naměřených hodnot a porovnání jednotlivých funkcí byl napsán program v prostředí GUI Matlab, který umí v uživatelském rozhraní načíst výstupy z měřicích přístrojů pro 4 různá místa. Program spočítá dílčí indexy pomocí logaritmo-lineární funkce a pak podle předvoleb zadaných uživatelem, s naměřenými a vypočítanými daty následně pracuje. Tento program je součástí přílohy k diplomové práci.

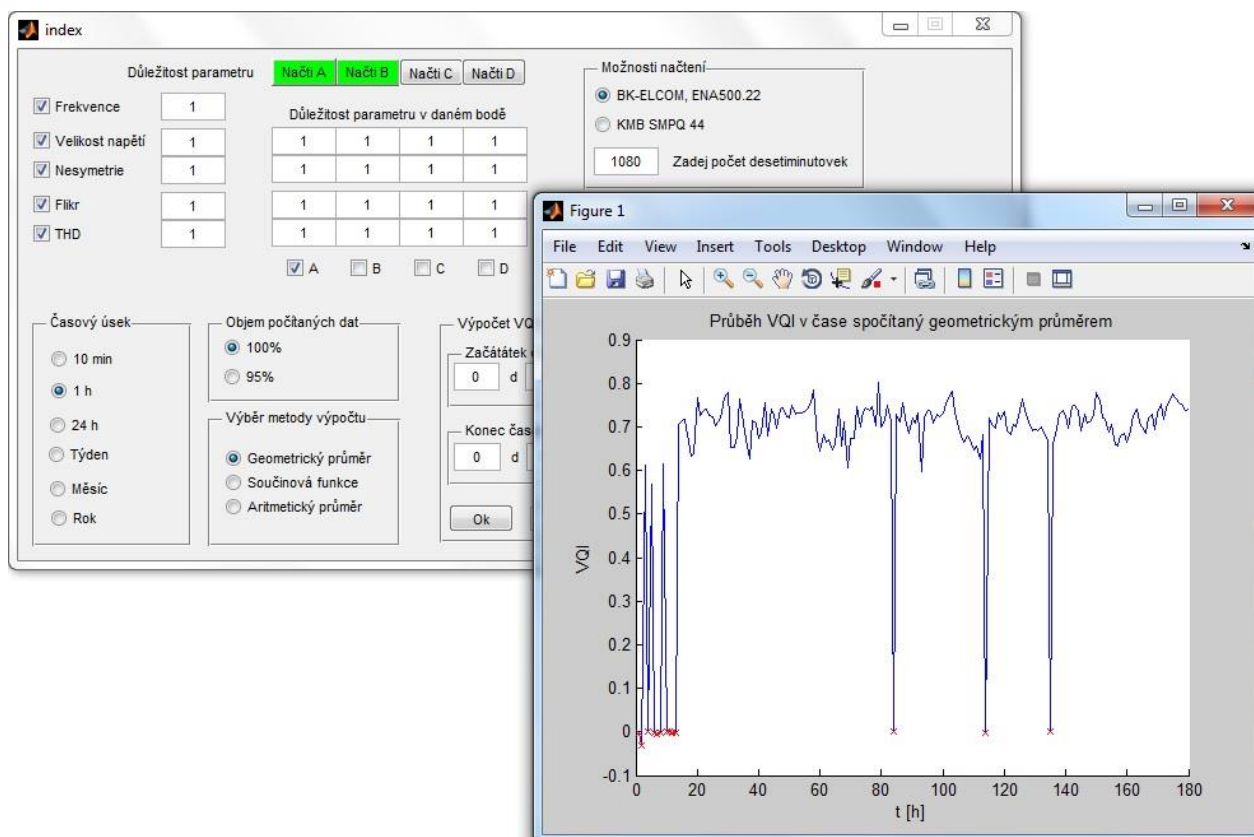
4.1.1 Ovládání navrženého programu

Program je nahráný v příloze a spouští se souborem *index.m*. Po spuštění programu se zobrazí uživatelské rozhraní, které je zobrazeno na Obr. 4.1. Nejprve je třeba načíst naměřená data, tedy v bloku „*Možnosti napájení*“ je třeba vybrat, ze kterého přístroje chceme data importovat do programu a do kolonky s nulou vybrat kolik desetiminutových hodnot chceme načíst (načítá se od nejnovějších hodnot). Pokud je blok „*Možnosti napájení*“ vyplněn, tak po kliknutí na tlačítko „*Načti A*“ se zobrazí okno s výběrem souboru, který chceme načíst. Po vybrání souboru a úspěšném načtení souboru tlačítko „*Načti A*“. Stejným způsobem se pak můžou načíst další body B, C a D, ale počet načtených desetiminutovek musí být vždy uveden stejný. Dále je k výpočtu potřeba, aby vždy byly načteny hodnoty v bodě A. Protože z bodu A program zjišťuje naměřené hodnoty globálního parametru, který by měl být pro všechny měřicí body shodný, tedy hodnoty kmitočtu sítě. Když jsou naměřená data načtená je potřeba zatrhnout parametry a body, které budou při výpočtu brány v úvahu a vyplnit důležitosti parametrů a důležitosti parametrů v daném bodě. Tyto důležitosti nabývají hodnot 0 až 1, které jsou přednastaveny na hodnotu 1 tedy maximální důležitost.



Obr. 4.1 - Uživatelské rozhraní programu

Posledním krokem v nastavení výpočtu je nastavení jedné z hodnot v blocích „Výběr metody výpočtu“, „Časový úsek“ a „Objem počítaných dat“. Blok „Výběr metody výpočtu“ umožňuje výběr slučovací funkce dílčích indexů, kdy při zvolení „Geometrický průměr“ využije program slučovací funkci podle vztahu (3.35), při zvolení „Součinná funkce“ využije program slučovací funkci podle vztahu (3.31), a při zvolení „Aritmetický průměr“ bude program slučovat dílčí indexy podle jednoduchého aritmetického průměru dle vztahu (3.20). V poli „Časový úsek“ se volí, v jakém časovém úseku bude *VQI* program počítat. Když je v poli „Objem počítaných dat“ zatrženo „100%“, program počítá se všemi naměřenými daty. Jestli je v poli zatrženo „95%“, program v časovém úseku, který byl zvolen, vybere nejméně 95% nejvyšších dílčích indexů z každého zvoleného parametru a každého zvoleného místa, se kterými program následně počítá. Aby se projevilo ve výpočtu zatržení položky „95%“, musí být počítaný časový úsek alespoň 200 minut, proto tedy při zatržení časového úseku „10 min“ nebo „1h“ program počítá vždy se 100 % zvolených dat.



Obr. 4.2 - Příklad nastavení programu s vykresleným průběhem VQI

Pokud je nastaven výpočet, můžeme zobrazit vývoj VQI v čase kliknutím na tlačítko „Zobraz průběh“. Po kliknutí na „Zobraz průběh“ se otevře nové okno s grafem, jak je vidět na Obr. 4.2, ve kterém bude zobrazen průběh v čase s krokem podle zvoleného časového úseku. Pokud některý bod VQI v grafu je záporný nebo roven nule, zvýrazní se červenou barvou jako nevyhovující.

Dále se může provést výpočet VQI v poli „Výpočet pro jednu časovou jednotku“, kdy se vyplní pole s časem, kdy „d“ znamená počet dnů, „h“ počet hodin a „x10 min“ počet desetiminutovek. Po zadání času a kliknutí na tlačítko „Ok“ se pak podle nastavení časového úseku spočítá VQI za posledních 10 minut, hodinu, den, týden, měsíc nebo rok od vyplněného času.

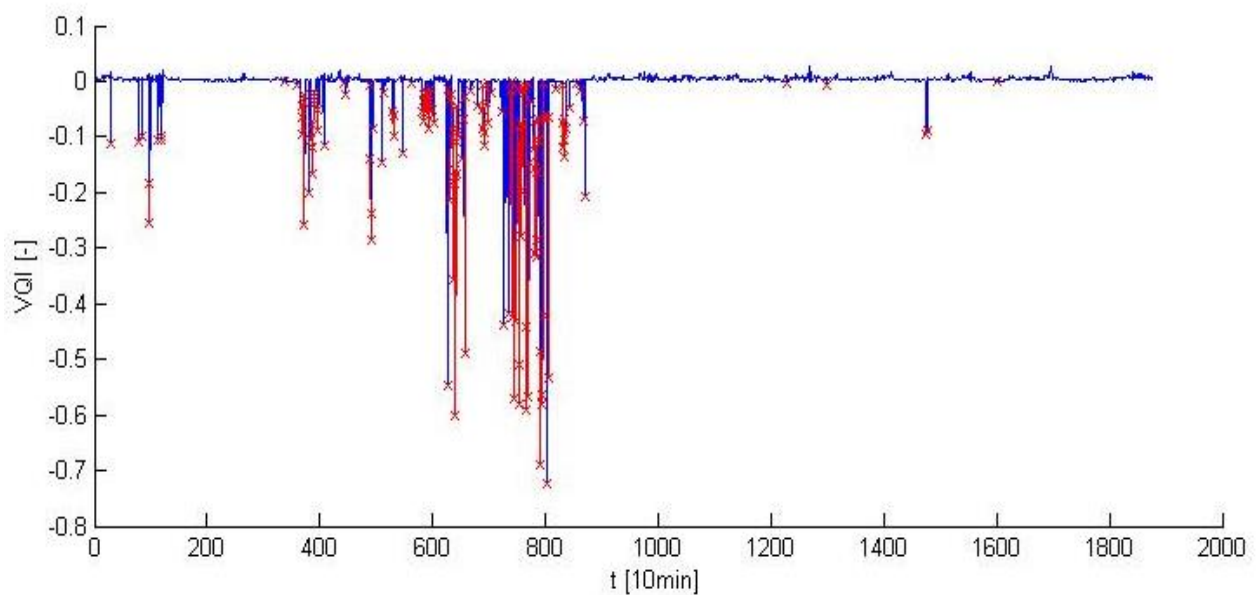
Posledním polem v programu je „Výpočet VQI v časovém intervalu“, jedná se o obdobné pole jako „Výpočet pro jednu časovou jednotku“, ovšem zde není omezení předdefinovaným časovým úsekem. Ale nastaví se zde přesně počáteční a konečný čas, a tímto intervalu proběhne výpočet hodnoty VQI . Toto pole není ovlivněno nastavením pole „Časový úsek“. Když je v poli „Objem počítaných dat“ zatržena hodnota „95%“ je touto volbou ovlivněn výpočet až od časového intervalu 200 minut nebo více, při menším časovém intervalu probíhá výpočet vždy se 100% dat.

4.2 Porovnání slučovacích funkcí na naměřených hodnotách

V práci byly vyzkoušeny celkem 3 slučovací funkce, které se jevily jako nejpoužitelnější pro výpočet VQI . Funkce byly vyzkoušeny na 1876 desetiminutových naměřených hodnotách ze dvou míst, kdy bylo vyzkoušeno několik možností, jako počet vyhodnocovacích parametrů, a časový úsek výsledného VQI .

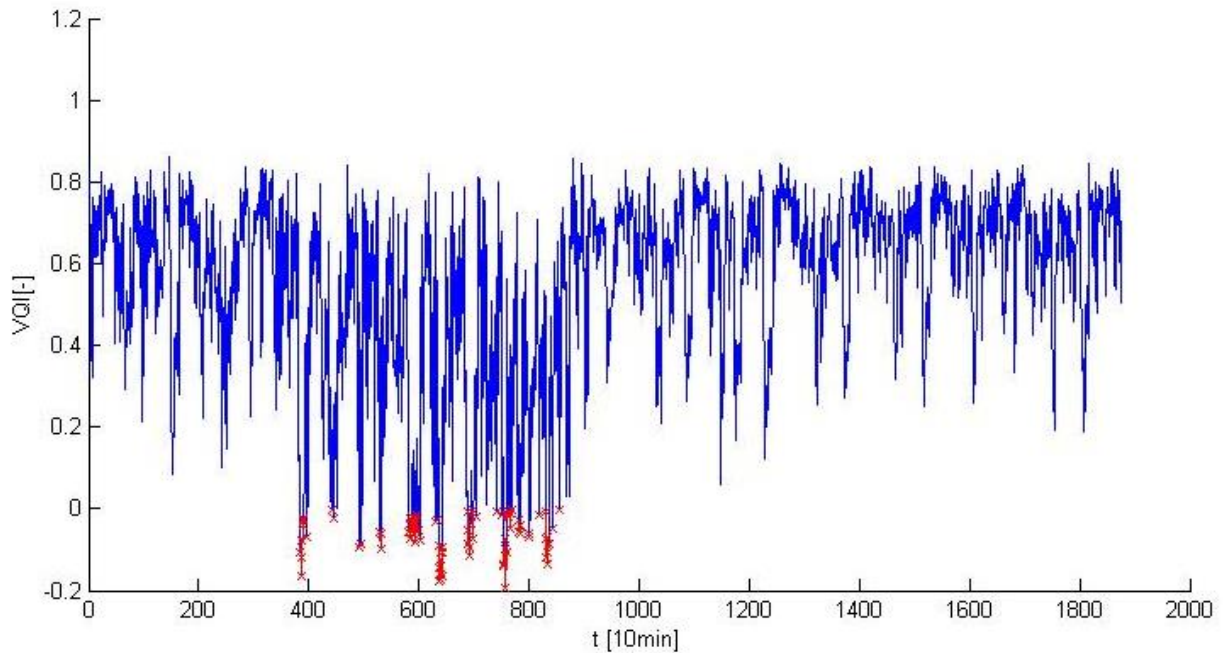
4.2.1 Součinnová funkce

Prvně byla vyzkoušena funkce součinnová, která počítala se všemi parametry ze dvou míst a vyhodnocovala jednotlivé desetiminutové stavy. Průběh spočítaných hodnot je zobrazen na Obr. 4.3, na kterém lze vidět, že kladné hodnoty spočítané pomocí součinu se pohybují těsně nad nulou a rozdíly mezi kladnými indexy se pohybují řádově v tisícinách. Pokud by bylo načteno více měřících míst, kladné hodnoty by byly ještě nižší. Mezi zápornými hodnotami je naopak rozdíl znatelný a můžeme lépe porovnat jednotlivé stavy. To je ovšem způsobeno tím, že nevyhovuje pouze několik málo parametrů v jednom čase. Pokud by bylo načteno více měřících míst a nevyhovovalo by více parametru v jednom časovém bodě, výsledné indexy by se opět pohybovaly těsně nad hodnotou -1.



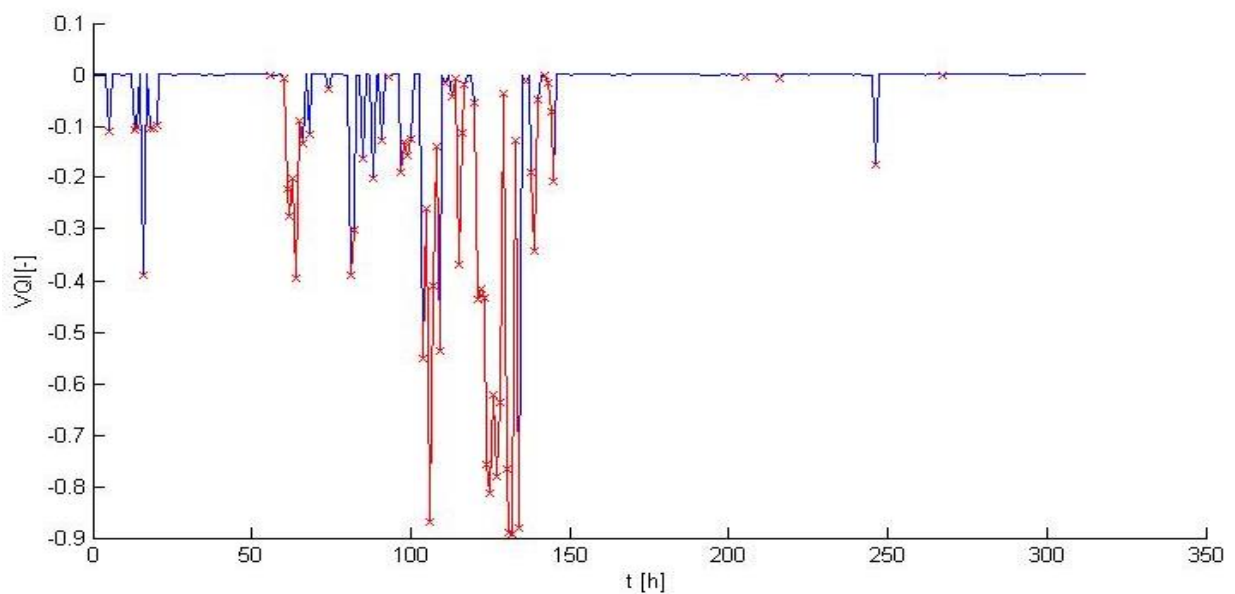
Obr. 4.3 - Průběh desetiminutových hodnot VQI spočítaný součinnovou funkcí

Na Obr. 4.4 je zobrazen průběh hodnot spočítaných opět součinnovou funkcí, ovšem vyhodnocoje pouze 2 parametry pro 2 měřící body, konkrétně odchylku frekvence a nesymetrií.



Obr. 4.4 - Průběh desetiminutových hodnot VQI spočítaný součinnou funkcí pouze pro 2 parametry

Zde je vidět, že na výsledek spočítaný pomocí součinu má velký vliv počet parametrů, protože v tomto případě kladné hodnoty pokryjí mnohem větší rozmezí a rozdíly mezi jednotlivými stavy jsou už řádově v jednotkách desetin indexu

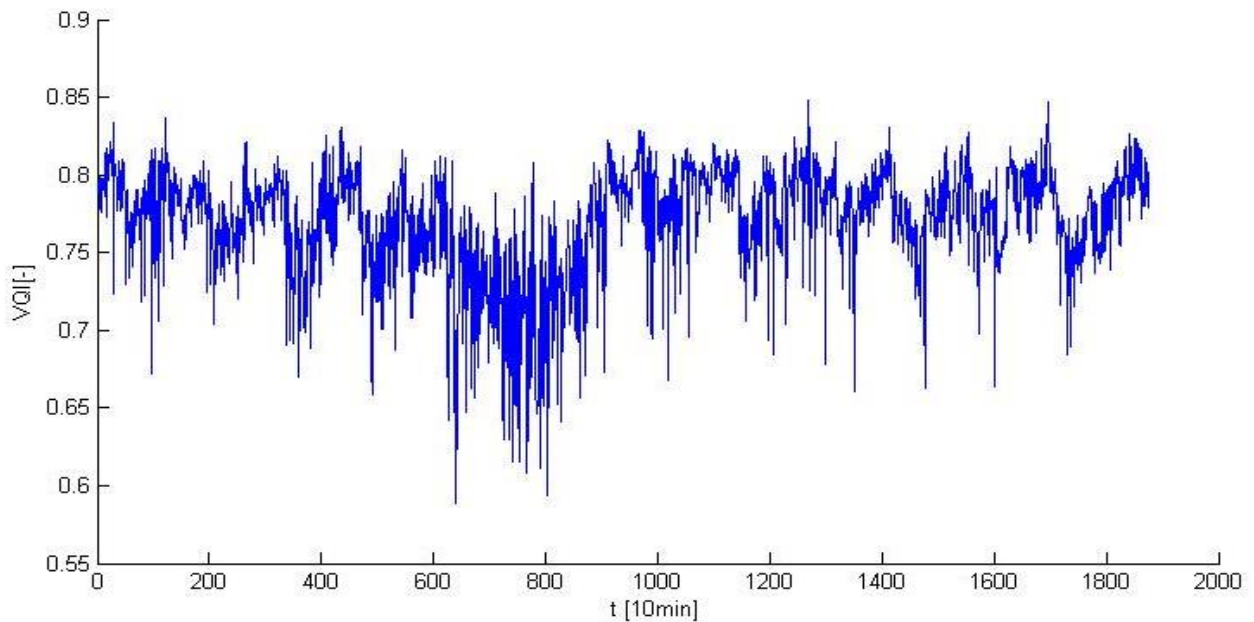


Obr. 4.5 - Průběh hodinový hodnot VQI spočítaný součinnou funkcí

Na Obr. 4.5 lze vidět průběh indexů spočítaných v intervalu jedné hodiny pomocí součinu. Kvůli více stavům, které musí program sloučit do jednoho indexu, se kladné hodnoty výsledného indexu pohybují v řádech 10^{-13} až 10^{-19} a záporné hodnoty se oproti desetiminutovým hodnotám z Obr. 4.3 také snížili.

Na základě posledních tří grafů můžeme říci, že součinná funkce je použitelná pouze pro malý počet vyhodnocovaných parametrů a malé časové úseky. Se zvyšujícím se počtem vyhodnocovaných parametrů a stavů do jednoho výsledného indexu, hodnota výsledného indexu rapidně klesá a pro hodnocení více míst tuto funkci nelze použít.

4.2.2 Aritmetický průměr



Obr. 4.6 - Průběh desetiminutových hodnot VQI spočítaný aritmetickým průměrem

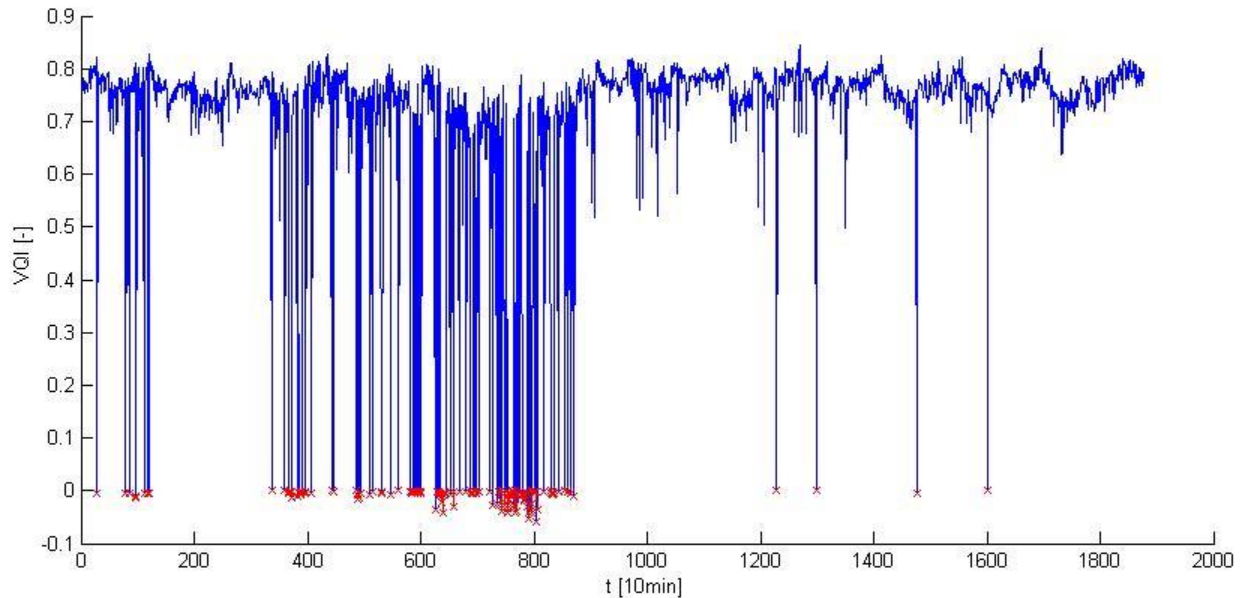
Na Obr. 4.6 je zobrazen průběh spočítaných desetiminutových hodnot. Ve výsledku jsou zobrazeny čisté průměrné hodnoty, takže v tomto případě z výsledného grafu nejsou rozpoznány nevyhovující hodnoty a dá se říci, že hodnoty spočítané aritmetickým průměrem jsou pouze orientační a aritmetický průměr nelze použít pro slučování výsledného indexu.

4.2.3 Geometrický průměr

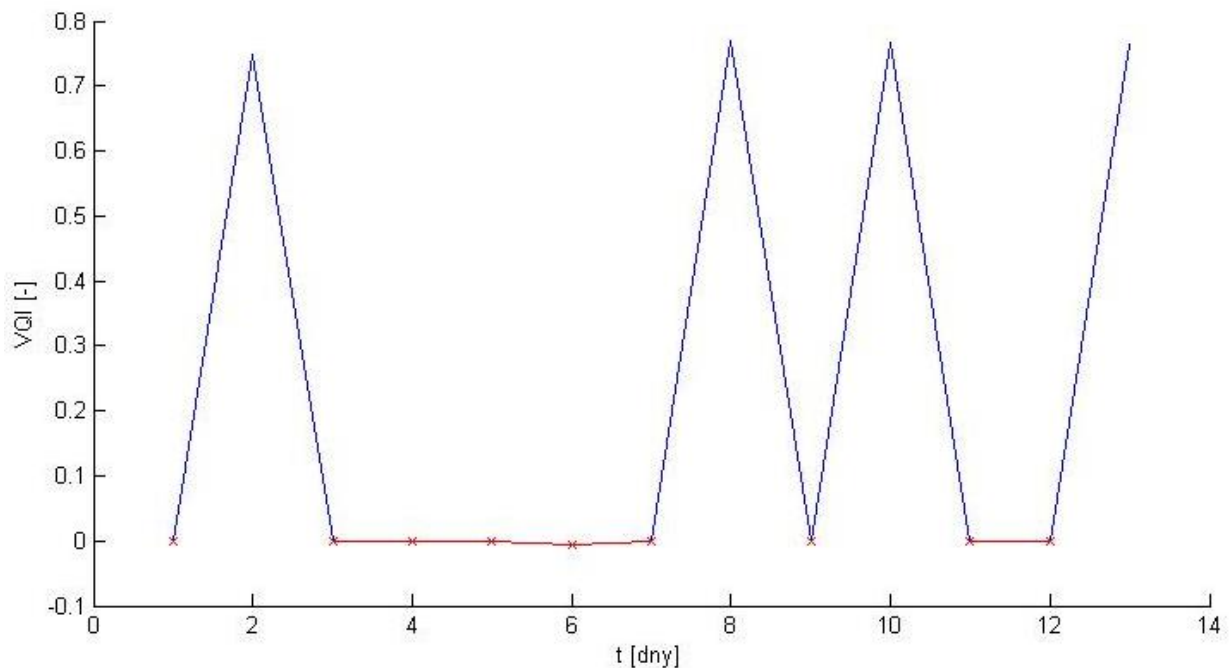
Nejprve byl vyzkoušen výpočet pomocí geometrického průměru na desetiminutových hodnotách, s vyhodnocováním všech parametrů. Tento průběh je zobrazen na Obr. 4.7. Zde je vidět, že se dosahuje poměrně vyšších hodnot výsledného indexu než u součinu jak u hodnot vyhovujících tak nevyhovujících. Nevyhovující hodnoty se pak pohybují v mnohem menším rozsahu než u součinu a je zde méně viditelný rozdíl mezi jednotlivými nevyhovujícími stavy. Naopak mezi vyhovujícími indexy je rozdíl dobře viditelný, ale lze zde pozorovat určitou podobnost s aritmetickým průměrem. U průběhu se zdají být velké skoky mezi kladnými a zápornými hodnotami, ty jsou způsobeny nelineárním průběhem geometrického průměru, který je zobrazen na Obr. 3.17.

Na Obr. 4.8 je zaznamenán průběh jednodenních hodnot indexů. Zde je vidět několik nevyhovujících hodnot, kde jsou hodnoty od 3. do 7. dne a v 1., 9., 11. a 12. dni brány jako nevyhovující, protože se v každém z těchto dní objevila alespoň jedna hodnota z některých

parametrů jako nevyhovující. Všechny nevyhovující hodnoty se pohybují těsně pod nulou, kvůli většímu množství vyhodnocovaných stavů v jednom indexu, konkrétně 144 desetiminutových hodnot v jednom denním indexu. Ze stejného důvodu se snížili i rozdíly u kladných hodnot, jejichž hodnoty se pohybují v rozmezí 0,74 a 0,78.

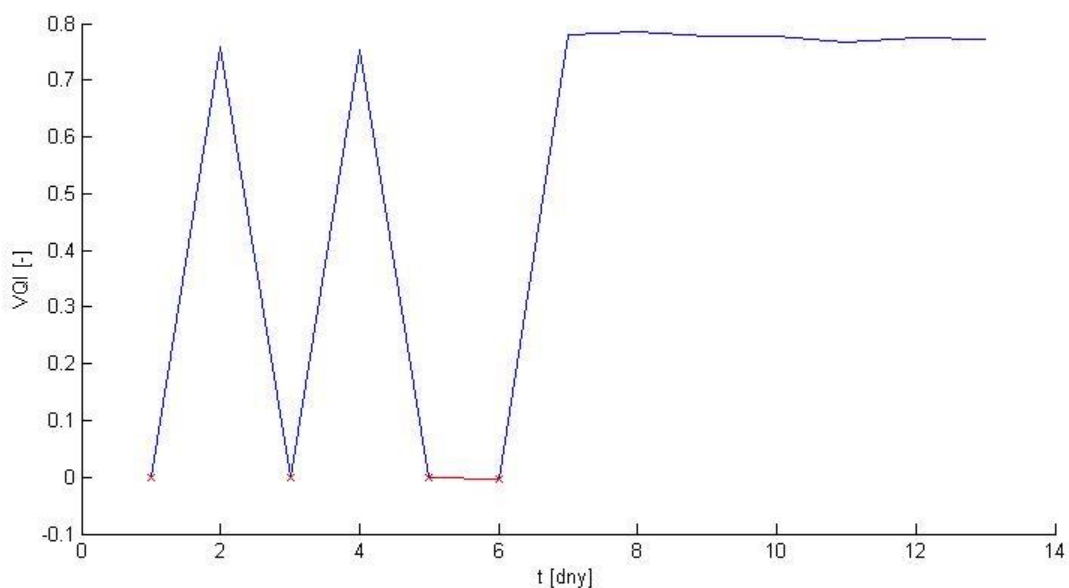


Obr. 4.7 - Průběh desetiminutových hodnot VQI spočítaný geometrickým průměrem



Obr. 4.8 - Průběh denních hodnot VQI spočítaný geometrickým průměrem

Na Obr. 4.9 je zaznamenán průběh jednodenních hodnot indexů, ovšem při výpočtu se uvažovalo pouze s 95% nejvyšších dílčích indexů za každých 24 hodin, jeden index je zde tedy počítán nikoliv ze 144 desetiminutových hodnot jako na Obr. 4.8 ale pouze ze 137 nejvyšších dílčích indexů z každého parametru. Oproti Obr. 4.8 je zde více dnů vyhodnoceno jako vyhovujících. Nevyhovující zůstal pouze 1., 3., 5. a 6. den.



Obr. 4.9 - Průběh denních hodnot VQI spočítaný geometrickým průměrem s vynecháním 5% nejnižších dílčích indexů

Po vyzkoušení všech tří slučovacích funkcí, se jeví jako nejvhodnější funkce na základě geometrického průměru, protože ve všech zkouškách dokázala popsat kvalitu napětí v daném místě či místech. Výsledky zásadně neovlivňoval počet parametrů či počet zahrnutých stavů v jenom indexu.

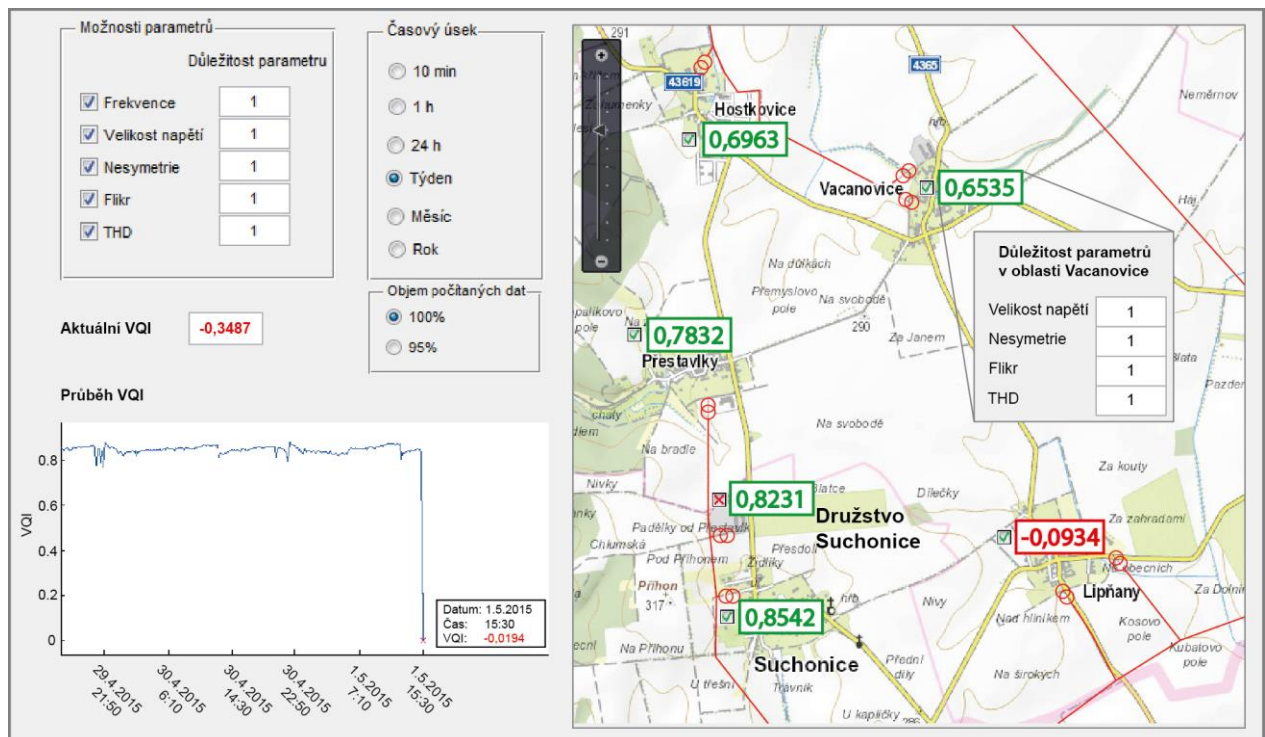
5 IMPLEMENTACE INDEXU DO SYSTÉMU MONITORINGU SÍTÍ

Aby bylo možné využívat VQI je potřeba změřit a zaznamenat hlídané parametry a poslat informace na datovou centrálu, kde proběhne výpočet VQI a předá informaci o kvalitě napětí prostřednictvím VQI dispečerovi. Pro vyhodnocování hlídaných parametrů a generování vstupů pro výpočet VQI se jeví jako nejvhodnější řešení využití programovatelných statických elektroměrů s vyšší monitorovací funkcionalitou, využívané pro smart metering. Tyto elektroměry by byly instalovány v předávacích místech v síti. Naměřená data by se odeslala na dispečink, kde by se provedl výpočet VQI podle zadaných potřeb dispečera.

Dispečer by měl mít přehled o kvalitě napětí v jednotlivých oblastech či konkrétních předávacích místech. Nástrojem dispečera by měl být program s přehledovou mapou, který zpracuje data z jednotlivých elektroměrů a přiřadí je k jednotlivým oblastem a pak podle zvolených předvoleb vypočítá podle algoritmu z předchozích kapitol VQI pro celou oblast, jednotlivé dílčí oblasti nebo jednotlivá měřící místa v aktuálním či jiném požadovaném čase nebo časovém intervalu.

5.1 Návrh grafiky možného uživatelského rozhraní

Základem programu by měla být přehledová interaktivní mapa s přehledem VQI pro jednotlivé oblasti. U každé oblasti by pak měla být možnost nastavení důležitosti jednotlivých parametrů a možnost zařazení či vyřazení dílčí oblasti z výpočtu celkového VQI .



Obr. 5.1 – Příklad uživatelského rozhraní pro monitorovací program [15]

Na Obr. 5.1 je zobrazen příklad, jak by mohlo takové rozhraní vypadat. V pravé části je mapa určité oblasti převzatá z GIS portálu HZS ČR [15]. Tato mapa je doplněna červenými linkami,

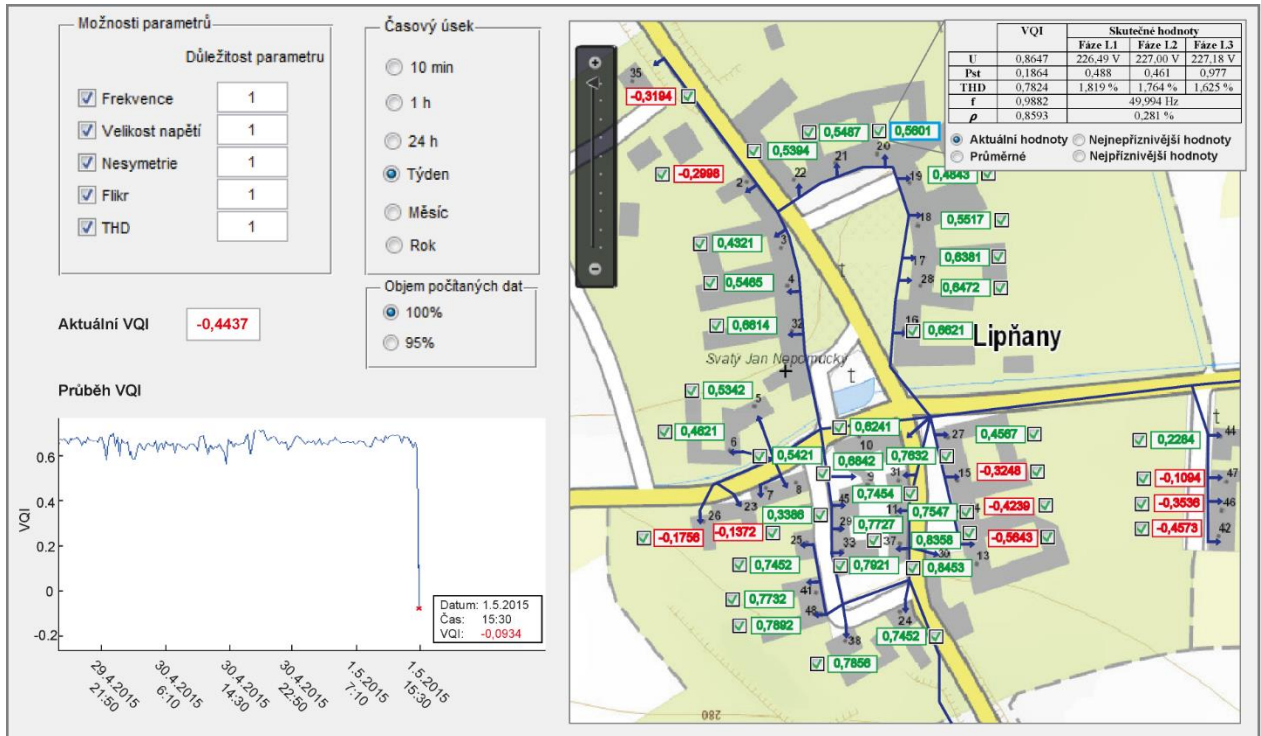
kteřé představují vedení o napěťové úrovni 22 kV zakončené distribučními transformátory u jednotlivých obcí nebo odběratelů. Jednotlivé dílčí oblasti zde představují obce, u kterých je uveden *VQI* spočítaný jako celkový index všech odběratelů v dané obci. Vyhovující a nevyhovující indexy jsou pak odlišeny zelenou a červenou barvou. Jednotlivé „obecní“ *VQI* je pak třeba označit či odznačit pro výpočet celkového *VQI*, z toho důvodu je vedle každého *VQI* v mapce umístěn checkbox, kde zelený symbol „✓“ označuje index, který je ve výpočtu celkového *VQI* zohledněn a červený křížek označuje dílčí index, který není brán v potaz při výpočtu. Dále je na mapce viditelné zobrazení nastavení jednotlivých parametrů pro dílčí oblasti, zde konkrétně pro obec Vacanovice.

V levé horní části obrázku je umístěno globální nastavení parametrů v bloku „*Možnosti parametrů*“. Pomocí checkboxů lze zatrhnout parametry, které se při výpočtu *VQI* berou v úvahu a dále je zde nastavení celkové důležitosti parametrů. Vedle bloku „*Možnosti parametrů*“ je blok „*Časový úsek*“, ve kterém se volí časový interval z jakého je *VQI* počítáno. V tomto konkrétním případě je zvolen jeden týden, to znamená, že veškeré hodnoty *VQI* z mapy a z průběhu jsou vypočítány za poslední týden od poslední naměřené desetiminutové hodnoty. Jelikož by měli být parametry měřeny po deseti minutách, při zatržení týdenního intervalu bude *VQI* počítáno z posledních 1008 hodnot z každého hlídaného parametru a zvoleného místa. Pokud ovšem nebude v bloku objem počítaných dat zatržena hodnota 95 %, pak by výsledná hodnota byla počítána z 958 neoptimálnějších naměřených dat z posledních 1008 z každého hlídaného parametru a zvoleného místa.

Dále je zde kolonka s aktuální hodnotou *VQI*, zde by se zobrazovala hodnota spočítaného indexu pouze z poslední zaznamenané desetiminutové hodnoty. Výsledek zde tedy není závislý na blocích „*Časový úsek*“ a „*Objem počítaných dat*“. Toto pole je spíše orientační, aby dispečer měl přehled o „okamžité“ hodnotě *VQI*.

Posledním prvkem na Obr. 5.1 je průběh spočítaného *VQI* podle předvoleb. Zde by se mělo postupně po 10 minutách v aktuálním čase vykreslovat výsledné *VQI*. V pravém dolním rohu grafu jsou v rámečku zobrazena data o posledním, tedy nejaktuálnějším bodě v grafu, konkrétně datum čas a velikost *VQI*. Jednotlivé body v grafu jsou počítány vždy podle nastavených předvoleb, podle příkladu na obrázku je tedy nejaktuálnější hodnota z času 15:30 a data 1.5.2015. Tato hodnota je spočítána ze všech hlídaných parametrů s nejvyšší důležitostí parametrů velikosti 1 a z oblastí Hostkovice, Vacanovice, Přestavlky, Lipňany a Suchonice, a tento index je počítán z celého týdne, tedy využije všechny naměřené parametry v rozmezí 15:40 24.4. 2015 až 15:30 1.5.2015. Předposlední hodnota z průběhu na časové ose označena jako z 15:20 1.5.2015, je opět ze všech předvolených parametrů ovšem z časového rozmezí 15:30 24.4. 2015 až 15:20 1.5.2015 atd.

V mapce by měla být možnost zobrazit jednu konkrétní oblast. Tedy označení jedné oblasti by se změnilo měřítko mapy a v dostatečném přiblížení by u každého odběratele byla viditelná hodnota indexu, jako je vidět na Obr. 5.2, kde je označena obec Lipňany. Podobně jako u Obr. 5.1 je i na detailnější mapce možnost označit či odznačit konkrétní odběratele pro výpočet celkového *VQI*, a dílčí indexy u odběratelů by měly opět být barevně odlišeny jako vyhovující a nevyhovující. Pro přehlednost by v mapě nemělo chybět naznačené vedení nízkého napětí, zde je to provedeno modrými linkami.



Obr. 5.2- Příklad uživatelského rozhraní monitorovacího programu s mapou ve větším měřítku [15]

Podobně jako na předchozím obrázku s více oblastmi i zde je v levé části základní nastavení výběru a zvolení důležitosti hlídaných parametrů, výběr časového úseku a možnost zohlednění 5 % nejnepříznivějších hodnot ze zadaného časového úseku. Výsledky, tedy kolonka „Aktuální VQI“ a „Průběh VQI“ se týkají pouze vybrané oblasti konkrétně obce Lipňany.

Z úrovně mapy jako je na Obr. 5.2 by mělo být zjistitelné hodnoty konkrétních parametrů, ty by se zobrazily po kliknutí na daný odběr, v přehledové tabulce. V uvedeném příkladu je tato tabulka zobrazená pro dům s popisným číslem 20. Tabulce jsou uvedeny hodnoty indexu pro jednotlivé parametry a konkrétní hodnoty daných parametrů. Pod tabulkou je umístěna možnost výběru hodnot, které chce dispečer zobrazit. Na příkladu je zatržena položka „Aktuální hodnoty“, v tabulce jsou tedy zobrazeny poslední změřené hodnoty parametrů a vypočítané jejich indexy. Při zatržení položky „Průměrné hodnoty“ se zobrazí hodnoty parametrů a jejich indexy spočítané pomocí aritmetického průměru za poslední období, které je zvoleno v bloku „Časový úsek“. Poslední 2 volby „Nejpriznivější hodnoty“ a „Nejpriznivější stav“ slouží k zobrazení obou extrémů z každého parametru a jeho indexu opět za období, které je vybráno v bloku „Časový úsek“.

6 ZÁVĚR

V první části této práce je probráno několik základních ukazatelů kvality napětí a závazných parametrů, jako je frekvence sítě, velikost napětí, napěťová nesymetrie, rychlé změny napětí, přítomnost harmonických napětí a velikost signálů v napájecí síti. U každého parametru jsou popsány meze dané standardem ČSN EN 50160.

V druhé části se práce zaměřuje na definici VQI a rozebírá způsoby, jak dosáhnout konečného výsledku. V kapitole 3 je definován index kvality napětí jako určitá sumarizace odchylek jednotlivých parametrů probraných v kapitole 2.

Pro výpočet jednotlivých odchylek je navrženo několik typů funkcí, např. lineární, exponenciální, mocninná a logaritmická. Lineární funkce jsou pak rozděleny pro jednostranné parametry, jako je funkce (3.6) a pro oboustranné parametry funkce (3.7). Další možností jsou funkce (3.8) a (3.9) u kterých je doplněná určitá necitlivost v rozmezí plánovací úrovně. Dále je navržena exponenciální funkce (3.10), která je citlivější při menších odchylkách a se zvyšující odchylkou její citlivost klesá. Opakem exponenciální funkce je mocninná funkce (3.11), která je při menších odchylkách méně citlivá a s rostoucí odchylkou se zvyšuje její citlivost. Jelikož exponenciální funkce není příliš vodná pro hodnocení kvality uvnitř kompatibilní úrovně a naopak mocninná funkce se nehodí pro hodnocení mimo kompatibilní úroveň, jde obě funkce sloučit do jedné, jak je uvedeno ve vztahu (3.12) a (3.13).

Veškeré uvedené funkce kromě konstanty a binární funkce jsou nastaveny tak, aby dokázaly určit, zda je kvalita napětí dostačující či nikoliv. Pokud je hodnota parametru rovna hodnotě kompatibilní úrovně $x = x_{CL}$, tak hodnota hodnotící funkce odchylky VQD_x musí být rovna 1 a index kvality daného parametru VQI_x je tedy roven 0. Všechny hodnotící funkce jsou pak graficky porovnány na obrázcích 3.3, 3.4 pro příklad oboustranného parametru velikosti napětí a na obrázcích 3.5 a 3.6 pro příklad jednostranného parametru velikosti celkového harmonického zkreslení napětí. Pro hodnocení kvality napětí je vhodné zvolit lineární funkce (3.6) a (3.7), u kterých je citlivost pro všechny odchylky stejná a má nejobektivnější hodnocení, ovšem pro hodnocení mimo kompatibilní úroveň by tato lineární funkce měla malou citlivost, proto byla vytvořena kombinovaná funkce lineárně-logaritmická podle vztahu (3.14) a (3.17) která je graficky znázorněna na Obr. 3.10 a Obr. 3.8 a tyto 2 funkce jsou zvoleny jako neoptimálnější funkce pro hodnocení odchylek jednotlivých parametrů.

Dalším krokem v této práci bylo navrhnout určitou slučovací funkci, která by sloučila dílčí indexy v jeden. Opět bylo navrženo několik možností. První a nejjednodušší možností bylo použití jednoduchého aritmetického průměru, který dokáže posoudit vývoj kvality napětí, ale nedokáže vždy správně posoudit, zda je napětí nekvalitní a neodpovídá standardu. Proto slučování pomocí jednoduchého aritmetického průměru není vhodné pro online hodnocení. Použití jednoduchého aritmetického průměru by bylo vhodné pro offline hodnocení, např. pro hodnocení určitých nápravných opatření v síti, popřípadě jiné porovnávání různých stavů sítě. Z aritmetického průměru vychází i funkce (3.27), u které se hodnotí zvlášť situace při jednom z nevyhovujících parametrů a zvlášť situace, kdy jsou všechny parametry v normě. Tato upravená funkce dokáže tedy rozpoznat

kvalitu napětí, zda vyhovuje či nikoliv, její nevýhodou je však složitost vzorce a pak nespojitost této funkce.

Další použitelná funkce pro sloučení dílčích indexů je součinná funkce (3.31), která využívá součinu dílčích indexů. Obdobně jako funkce (3.27) hodnotí zvlášť stav, kdy jsou všechny dílčí indexy dostačující a zvlášť stav, kdy jeden nebo více dílčích indexů vyjadřuje nekvalitní napětí. Výhodou této funkce je, že hodnota výsledného indexu bude vždy menší nebo rovna nejmenšímu dílčímu indexu. Díky tomu je vhodná pro online hodnocení, neboť spolehlivě určí nekvalitní napětí. Nevýhodou této součinné funkce je její snížená citlivost při nízkých hodnotách dílčích indexů a dále necitlivost vůči kladným dílčím indexům v přítomnosti záporného dílčího indexu.

Další použitelnou slučovací součinnou funkcí navrženou na základě geometrického součinu je funkce (3.35), která má obdobné vlastnosti jako funkce (3.31), ovšem výsledný index spočítaný touto funkcí je obvykle vyšší než u součinu podle (3.31) dále tvar závislosti této funkce není lineární ale i přesto dokáže správně určit kvalitu napětí a ve většině případů dokáže popsat vývoj kvality napětí. Každá z navržených funkcí je graficky zobrazena na obrázcích 3.11 až 3.17.

V rámci diplomové práce bylo provedeno dvoje měření charakteristik napětí pro ověření výpočtu VQI z nichž jedno bylo provedeno ve školních laboratořích kvality elektrické energie a druhé v rodinném domě v obci Lipňany. Dále byl napsán program v uživatelském rozhraní GUI matlab, který toto měření zpracovává. Tento program vypočítá dílčí VQI pomocí lineárně logaritmické funkce (3.14) a (3.17) a dále sloučí dílčí indexy pomocí třech možných slučovacích funkcí a to aritmetického průměru, funkce na základě součinu podle (3.31) a funkce na základě geometrického průměru podle (3.35).

Zpracování měření vytvořeným programem ukázalo, že použití slučovací funkce na základě jednoduchého součinu je nepoužitelné pro větší množství vyhodnocovacích stavů a hodnocených parametrů. Protože výsledné indexy dosahují příliš nízkých hodnot. Ověření výpočtu na souboru měření ukázalo, že nejvhodnější z navržených slučovacích funkcí pro výpočet VQI je funkce na základě geometrického průměru podle (3.35), která dokáže spolehlivě popsat kvalitu napětí i při vyhodnocování většího množství hodnocených stavů.

V poslední části práce je nastíněno, jak by mohlo vypadat využití indexu kvality napětí pro monitoring sítě. Základem návrhu tohoto systému jsou pevně instalované měřicí body, které předají informace o změřených ukazatelích kvality napětí na dispečink, kde se provede výpočet. Výstupem systému by byla přehledová mapa s konkrétními vypočtenými hodnotami VQI a s přehledem naměřených ukazatelů sítě.

POUŽITÁ LITERATURA

- [1] ČSN 50160. *Charakteristiky napětí elektrické energie dodávané z veřejných distribučních sítí*. ed. 3. Praha: Úřad pro technickou normalizaci, metrologii a státní zkušebnictví, 2011.
- [2] 61000-2-12. *Elektromagnetická kompatibilita (EMC): Část 2-2: Prostředí - Kompatibilní úroveň pro nízkofrekvenční rušení šířené vedením a signály ve veřejných rozvodných sítích nízkého napětí*. Praha: ČESKÝ NORMALIZAČNÍ INSTITUT, 2004.
- [3] Yong-June Shin; Powers, E.J.; Grady, M.; Arapostathis, A., "Power quality indices for transient disturbances," *Power Delivery, IEEE Transactions on* , vol.21, no.1, pp.253,261, Jan. 2006
doi: 10.1109/TPWRD.2005.855444
- [4] POLYCARPOU, Alexis. 2011. Power Quality and Voltage Sag Indices in Electrical Power Systems. *Electrical Generation and Distribution Systems and Power Quality Disturbances*. InTech. DOI: 10.5772/18181. ISBN 978-953-307-329-3. Dostupné také z:
<http://www.intechopen.com/books/electrical-generation-and-distribution-systems-and-power-quality-disturbances/power-quality-and-voltage-sag-indices-in-electrical-power-systems>
- [5] Montano, J.-C.; Bravo, J.-C.; Borrás, D.; Castilla, M.; López, A.; Gutierrez, J., "Voltage quality index," *Power Electronics, Electrical Drives, Automation and Motion, 2006. SPEEDAM 2006. International Symposium on* , vol., no., pp.814,817, 23-26 May 2006
doi: 10.1109/SPEEDAM.2006.1649881
- [6] DRÁPELA, J.; KOPIČKA, M.; KUNC, D. Index kvality napětí v síti pro kontinuální rušení a jeho využití. In *Sborník přízkěvků konference ČK CIRED 2013*. České Budějovice: EGC České Budějovice, 2013. s. 1-14. ISBN: 978-80-905014-2- 3.
- [7] KOPIČKA, Marek, Jiri DRÁPELA a David TOPOLANEK. 2014. Voltage regulation optimization in low voltage network based on Voltage Quality Index. *Proceedings of the 2014 15th International Scientific Conference on Electric Power Engineering (EPE)*. IEEE. DOI: 10.1109/EPE.2014.6839541. ISBN 978-1-4799-3807-0.
- [8] NOUROLLAH, Sara a Mehdi MOALLEM. 2011. A data mining method for obtaining global power quality index. *2011 2nd International Conference on Electric Power and Energy Conversion Systems (EPECS)*. IEEE, : 1-7. DOI: 10.1109/EPECS.2011.6126811. ISBN 978-1-4577-0806-0. Dostupné také z:
<http://ieeexplore.ieee.org/lpdocs/epic03/wrapper.htm?arnumber=6126811>
- [9] GOSBELL, V.J., B.S.P. PERERA a H.M.S.C. HERATH. 2002. Unified power quality index (UPQI) for continuous disturbances. *10th International Conference on Harmonics and Quality of Power. Proceedings (Cat. No.02EX630)*. IEEE, : 316-321. DOI: 10.1109/ICHQP.2002.1221452. ISBN 0-7803-7671-4. Dostupné také z:
<http://ieeexplore.ieee.org/lpdocs/epic03/wrapper.htm?arnumber=1221452>
- [10] DUARTE, Silvio Xavier a Nelson KAGAN. A Power-Quality Index to Assess the Impact of Voltage Harmonic Distortions and Unbalance to Three-Phase Induction Motors. *IEEE Transactions on Power Delivery*. 2010, **25**(3): 1846-1854. DOI:

- 10.1109/TPWRD.2010.2044665. ISSN 0885-8977. Dostupné také z:
<http://ieeexplore.ieee.org/lpdocs/epic03/wrapper.htm?arnumber=5446315>
- [11] *Vyhláška 540/2005 Sb. Vyhláška o kvalitě dodávek elektřiny a souvisejících služeb v elektroenergetice.* 2005.
- [12] *ČSN EN 61000-4-30. Elektromagnetická kompatibilita (EMC): Část 4-30: Zkušební a měřicí technika- Metody měření kvality energie.* 2009. Ed.2. Praha: Úřad pro technickou normalizaci, metrologii a státní zkušebnictví.
- [13] *ČSN EN 62052-11. Vybavení pro měření elektroické energie (AC) - Všeobecné požadavky, zkoušky a zkušební podmínky: Část 11: Elektroměry.* Praha: Český normalizační institut, 2003.
- [14] ZAPLATÍLEK, Karel a Bohuslav DOŇAR. *MATLAB: tvorba uživatelských aplikací.* 1. vyd. Praha: BEN, 2004, 215 s. : il. ISBN 80-7300-133-0.
- [15] *GIS portál HZS ČR* [online]. 2015. [cit. 2015-05-12]. Dostupné z: <http://gis.izscr.cz/map/>