



# 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

# KUMULACE A ŠÍŘENÍ RUŠIVÝCH JEVŮ V PŘENOSOVÉ SOUSTAVĚ

AGGREGATION AND PROPAGATION OF DISTURBANCES IN THE TRANSMISSION SYSTEM

## DIPLOMOVÁ PRÁCE

MASTER'S THESIS

## AUTOR PRÁCE

AUTHOR

Bc. Tomáš Šedivý

## VEDOUCÍ PRÁCE

SUPERVISOR

prof. Ing. Jiří Drápela, Ph.D.

BRNO 2024



# Diplomová práce

magisterský navazující studijní program **Elektroenergetika a komunikační technologie**

Ústav elektroenergetiky

**Student:** Bc. Tomáš Šedivý

**ID:** 220782

**Ročník:** 2

**Akademický rok:** 2023/24

**NÁZEV TÉMATU:**

## Kumulace a šíření rušivých jevů v přenosové soustavě

**POKYNY PRO VYPRACOVÁNÍ:**

1. Kvalita napětí a jevy způsobující její nekvalitu, Legislativa pro kvalitu napětí v ČR
2. Měření a hodnocení kvality napětí
3. Šíření a kumulace vybraných rušení (harmonické, kolísání a rychlé změny napětí, nesymetrie)
4. Modelování a simulace šíření a kumulace vybraných rušivých jevů
5. Validace modelu daty z měření

**DOPORUČENÁ LITERATURA:**

doporučená literatura podle pokynů vedoucího závěrečné práce

**Termín zadání:** 5.2.2024

**Termín odevzdání:** 20.5.2024

**Vedoucí práce:** prof. Ing. Jiří Drápela, Ph.D.

**doc. Ing. Jaroslava Orságová, Ph.D.**

předseda rady studijního programu

**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.

## **Abstrakt**

Tato diplomová práce se věnuje analýze a simulaci rušivých jevů v přenosové soustavě České republiky s důrazem na harmonické zkreslení napětí. Byl vyvinut simulační model v prostředí PSCAD, který umožňuje studovat šíření harmonických složek v zauzleném systému s více vzájemně propojenými rozvodnami při různých provozních scénářích. Výsledky simulací poskytují hlubší porozumění aspektů ovlivňujících šíření především harmonických v síti a vedou k návrhům, jak efektivně analyzovat šíření rušivých jevů v rozsáhlejší měřítku sítě.

## **Klíčová slova**

Přenosová soustava, kvalita napětí, šíření rušivých jevů, harmonické, impedanční charakteristika, přenosové koeficienty.

## **Abstract**

This thesis is devoted to the analysis and simulation of disturbance phenomena in the transmission system of the Czech Republic with emphasis on harmonic voltage distortion. A simulation model was developed in PSCAD environment, which allows to study the propagation of harmonic components in a congested system with multiple interconnected substations under different operating scenarios. The simulation results provide a deeper understanding of the aspects affecting the propagation of mainly harmonics in the network and lead to suggestions on how to effectively analyze the propagation of disturbances on a larger scale network.

## **Keywords**

Transmission system, voltage quality, interference propagation, harmonics, impedance characteristics, transmission coefficients.

## **Bibliografická citace**

ŠEDIVÝ, Tomáš. *Kumulace a šíření rušivých jevů v přenosové soustavě*. Brno, 2024. Dostupné také z: <https://www.vut.cz/studenti/zav-prace/detail/159575>. Diplomová práce. Vysoké učení technické v Brně, Fakulta elektrotechniky a komunikačních technologií, Ústav elektroenergetiky. Vedoucí práce Jiří Drápela.

# Prohlášení autora o původnosti díla

**Jméno a příjmení studenta:** *Tomáš Šedivý*

**VUT ID studenta:** *220782*

**Typ práce:** *Diplomová práce*

**Akademický rok:** *2023/24*

**Téma závěrečné práce:** *Kumulace a šíření rušivých jevů  
v přenosové soustavě*

Prohlašuji, že svou závěrečnou práci jsem vypracoval samostatně pod vedením vedoucí/ho závěrečné 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 závěrečné práce dále prohlašuji, že v souvislosti s vytvořením této závěrečné 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: 20. května 2024

-----  
podpis autora

## Poděkování

Děkuji vedoucímu diplomové práce prof. Ing. Jiřímu Drápelovi, Ph.D. za metodickou a odbornou pomoc a další cenné rady při zpracování této diplomové práce. Dále bych chtěl poděkovat společnosti ČEPS, která poskytla potřebná data k realizaci této práce a zároveň poskytla možnost konzultací s odborníky ve svém oboru.

V Brně dne: 20. května 2024

-----  
podpis autora

# Obsah

<b>SEZNAM OBRÁZKŮ</b> .....	<b>9</b>
<b>SEZNAM TABULEK</b> .....	<b>10</b>
<b>ÚVOD</b> .....	<b>11</b>
<b>1. KVALITA ELEKTRICKÉ ENERGIE V PŘENOSOVÉ SOUSTAVĚ ČR</b> .....	<b>12</b>
1.1 EN 50160 ED. 4 .....	12
1.2 KODEX PS .....	13
<b>2. ELEKTROMAGNETICKÁ KOMPATIBILITA</b> .....	<b>14</b>
2.1 KOORDINACE EMC .....	14
2.2 KUMULACE RUŠENÍ .....	16
2.3 PŘENOS RUŠENÍ .....	16
<b>3. RUŠIVÉ JEVY</b> .....	<b>17</b>
3.1 HARMONICKÉ ZKRESLENÍ NAPĚTÍ .....	17
3.1.1 <i>Měření a vyhodnocení harmonických</i> .....	18
3.1.2 <i>Rezonance obvodu</i> .....	18
3.2 NESYMETRIE NAPĚTÍ .....	19
3.3 FLIKR .....	20
3.4 NAPĚŤOVÉ UDÁLOSTI .....	21
3.4.1 <i>Měření poklesů/zvýšení napětí</i> .....	21
3.4.2 <i>Vyhodnocení poklesů/zvýšení napětí</i> .....	21
<b>4. METODIKA MĚŘENÍ</b> .....	<b>22</b>
4.1 PQ MONITOR MEG39.2 .....	23
4.2 PROSTŘEDÍ SOFTWARE MEGA EXPLORER .....	24
<b>5. CÍLE PRÁCE A ZPŮSOBY ŘEŠENÍ</b> .....	<b>25</b>
5.1 CÍLE PRÁCE .....	25
5.2 POSTUPY A METODY .....	26
<b>6. MODEL PŘENOSOVÉ SOUSTAVY</b> .....	<b>28</b>
6.1 TOPOLOGIE TESTOVACÍ PŘENOSOVÉ SOUSTAVY .....	28
6.2 EKVIVALENTNÍ MODEL VEDENÍ .....	29
6.3 EKVIVALENTNÍ MODEL NAPÁJEČE .....	31
6.4 EKVIVALENTNÍ AGREGOVANÝ MODEL ODBĚRU .....	34
6.5 TRANSFORMÁTORY .....	36
6.6 EKVIVALENTNÍ AGREGOVANÉ MODEL Y SÍTÍ 400, 110 A 22 kV .....	37
6.7 EKVIVALENTNÍ AGREGOVANÝ MODEL ELEKTRÁRNY .....	39
6.8 EKVIVALENTNÍ MODEL ZDROJE HARMONICKÝCH PROUDŮ .....	40
6.9 MODEL MĚŘICÍ APARATURY .....	41
<b>7. SESTAVENÍ A ROZBĚH MODELU PS</b> .....	<b>42</b>
7.1 SESTAVENÍ MODELU .....	42
7.2 ROZBĚH MODELU .....	42

7.3	FREKVENČNÍ CHARAKTERISTIKY SÍTĚ .....	43
<b>8.</b>	<b>ŠÍŘENÍ HARMONICKÉHO ZKRESLENÍ NAPĚTÍ.....</b>	<b>45</b>
8.1	METODIKA .....	45
8.2	ANALÝZA VÝSLEDKŮ ZE SIMULACE.....	48
8.3	POROVNÁNÍ VÝSTUPŮ S AKTUÁLNÍM STAVEM PS.....	52
	<b>ZÁVĚR .....</b>	<b>54</b>
	<b>LITERATURA.....</b>	<b>56</b>
	<b>SEZNAM SYMBOLŮ A ZKRATEK .....</b>	<b>57</b>
	<b>SEZNAM PŘÍLOH.....</b>	<b>60</b>



# SEZNAM OBRÁZKŮ

2.1: Model koordinace EMC (převzato z [14]).....	14
2.2: Koordinace EMC mezi napětovými hladinami (převzato z [14]) .....	15
2.3: Příklad kumulace v síti se zájmovými soustavami (převzato z [14]).....	16
3.1: Příklad součtu dvou signálů o rozdílné frekvenci .....	17
3.2: Průběh kolísání napětí (převzato z [9]).....	20
3.3: Časová agregace napětové události.....	21
4.1: Čelní pohled na PQ monitor MEg39.2(převzato z [16]).....	22
4.2 Schéma zapojení PQ monitoru MEg39.1(převzato z [16]) .....	23
4.3: Příklad průběhu napětí z SW MEG Explorer (převzato z [10]).....	24
6.1: Přehledové schéma modelu v prostředí PSCAD.....	28
6.2: Ekvivalentní model vedení .....	30
6.3: Zadávací menu ekvivalentního agregovaného modelu vedení .....	30
6.4: Rozložení vedení na tři $\pi$ -články .....	31
6.5: PI regulátory pro řízení dodávaných výkonů napáječem .....	33
6.6: Zadávací menu ekvivalentního napáječe .....	33
6.7: Schéma ekvivalentního agregovaného modelu zátěže .....	35
6.8: Zadávací menu odběru.....	36
6.9: Zadávací menu transformátoru .....	37
6.10:Ekvivalentní agregovaný model okrajové části sítě s připojením na hladině 400 kV, a obsahující agregované modely sítě 110 kV a 22 kV .....	38
6.11:Ekvivalentní agregovaný model okrajové části sítě s připojením na hladině 110 kV, a obsahující agregované modely sítě 22 kV .....	39
6.12: Ekvivalentní agregovaný model elektrárny s připojením na hladině 400 kV .....	40
6.13: Ekvivalentní agregovaný model zdroje harmonických proudů.....	40
6.14: Model měřicí aparatury pro měření harmonického zkreslení napětí.....	41
7.1: Frekvenční charakteristika impedance v rozvodně R_A.....	43
8.1: Matice popisující šíření harmonického zkreslení.....	45
8.2: Matice popisující šíření velikosti napětí 3. harmonické složky .....	48
8.3: Matice popisující šíření velikosti napětí 5. harmonické složky .....	48
8.4: Matice popisující šíření velikosti napětí 11. harmonické složky .....	49
8.5: Matice popisující šíření velikosti napětí 17. harmonické složky .....	49
8.6: Matice popisující šíření velikosti napětí 21. harmonické složky .....	50
8.7: Frekvenční spektrum impedance v uzlu R_A.....	50
8.8: Měření napětí 11. harmonické v uzlu A400.....	52
8.9: Měření napětí 11. harmonické v uzlu B400.....	52

## SEZNAM TABULEK

6.1	Parametry AlFe lan napěťové hladiny 400 kV .....	29
6.2	Parametrizace transformátoru 400/110 kV .....	36
8.1	Šíření napětí 11. harmonické z uzlu A400 .....	51

# ÚVOD

Tato práce se zaměřuje na analýzu rušivých jevů v přenosové soustavě České republiky, což je téma stále zvyšujícího se významu v době rostoucího důrazu na efektivitu a stabilitu elektroenergetických systémů. V současné době je kvalita elektrické energie stále více ovlivněna integrací obnovitelných zdrojů energie a přecházením vybraných uživatelů distribučních soustav na uživatele přenosové soustavy, což přináší nové výzvy v řízení a optimalizaci provozu přenosových soustav. Hlavním cílem této práce je proto vyvinout simulační model, který by umožnil analýzu šíření rušivých jevů v přenosové soustavě za účelem jejich koordinace pro nastavení opatření.

První část práce je věnována teoretickému úvodu do problematiky kvality elektrické energie, základním pojmům a normám, které definují požadavky na její úroveň. Dále se práce zabývá elektromagnetickou kompatibilitou, její koordinací a rušivými jevy, které mohou významně ovlivnit provozní spolehlivost přenosové soustavy.

Ve druhé části je popsán návrh a vývoj simulačního modelu přenosové soustavy v prostředí PSCAD, který umožňuje modelovat různé provozní scénáře a identifikovat klíčové faktory ovlivňující kvalitu elektrické energie. Tento model je následně využit pro provádění simulací, jejichž cílem je analyzovat šíření harmonického zkreslení napětí v síti.

Výsledky těchto simulací jsou podrobně analyzovány v dalších kapitolách práce, kde jsou kvantifikovány jejich dopady na různé části přenosové soustavy. Získaná data jsou pak podrobena analýze, zda šíření rušení postupuje dle daných předpokladů, případně proč výsledky předpokladu neodpovídají. Výsledky budou rovněž použity pro úpravu alokace limitů harmonických normy PNE 333430-0 a nabízí se také možnost promítnutí do příslušných metodik společnosti ČEPS z hlediska plánování a provozu přenosové soustavy.

Celkově tato práce představuje komplexní přístup k řešení aktuálních problémů v oblasti kvality elektrické energie a nabízí fundamentální základ pro další výzkum a vývoj v této důležité oblasti. Díky této práci je nyní k dispozici robustní metodika pro analýzu šíření rušení v přenosové soustavě, která může pomoci inženýrům a provozovatelům sítí lépe analyzovat vliv rušení v rozsáhlé síti.

# 1. KVALITA ELEKTRICKÉ ENERGIE V PŘENOSOVÉ SOUSTAVĚ ČR

Nedílnou součástí elektrizační soustavy v České republice (ČR) je část zvaná přenosová soustava (PS). Přenosovou soustavu provozuje společnost ČEPS, a. s. a její funkcí je rozvést na napěťové hladině 400 a 220 kV elektrickou energii (EE) od výroben do předávacích bodů, odkud je elektrická energie uživateli sítě dále rozváděna přes distribuční soustavu (DS) k uživatelským zařízením.

Přenosová soustava je, co se týče její topologie, specifická tím, že je zapojená do okruhů, kde toky výkonů mohou být realizovány z více stran. S tím jsou spojeny specifické situace, jimiž jsou například poruchy, manipulace a další, které pak ovlivňují kvalitu napětí (VQ – Voltage Quality) v dalších uzlech PS a mají vliv na charakter napětí v předávacích místech.

Kvalitu napětí lze vyjádřit jako souhrn několika definovaných parametrů, které vyjadřují charakter napěťové vlny především z hlediska odchylek od ideálního průběhu harmonického průběhu napětí, ideálních nebo určených parametrů, kterými jsou velikost, frekvence a fáze. Detailním popisem a definicí VQ se zabývá evropská norma ČSN EN 50160 ed. 4 [1].

## 1.1 EN 50160 ed. 4

Tato norma [1] definuje základní charakteristiky napětí v předávacích místech uživatelů v sítích nízkého (NN), vysokého (VN) a velmi vysokého napětí (VVN). Nově, když v roce 2022 vyšla edice č. 4 této normy, byly definovány parametry napětí i v předávacích místech v sítích zvláště vysokého napětí (ZVN), protože se předpokládá, že se budou do PS připojovat v budoucnu noví uživatelé sítě.

Norma stanovuje požadavky na kvalitu EE v distribučních a přenosových soustavách. Obsahuje specifikace pro jednotlivé napěťové úrovně, frekvenci, harmonické zkreslení a další parametry EE, které jsou důležité pro správné fungování elektrických zařízení a spotřebičů. Tyto specifikace se vztahují pouze na běžný provozní stav. Stav mimo provozní stav lze vnímat jako přírodní katastrofy, zásah vyšší moci nebo škoda způsobená cizím zaviněním.

V tomto dokumentu jsou také přesně stanoveny termíny a definice změn napětí, charakteristiky napájení jednotlivých napěťových hladin a také matematické definice parametrů, které vyjadřují míru nekvality způsobené daným specifickým rušivým jevem.

Míra nekvality na předávacích bodech mezi PS a uživatelem sítě je předepsána v dokumentu Kodex PS část V. Za vyhodnocení míry nekvality na předávacích bodech odpovídá provozovatel PS.

## 1.2 Kodex PS

Cílem tohoto dokumentu [15] je stanovit pro účastníky trhu pravidla pro minimální technické, konstrukční a provozní požadavky pro připojení a užívání PS a také podmínky pro poskytování služeb a řízení PS.

Je nutné uvést, že tyto podmínky úzce souvisí s mnoha technickými charakteristikami včetně pravidel v synchronně propojených soustavách. Společnost, která stanovuje a do budoucna může neustále modifikovat pravidla této spolupráce se nazývá Evropská síť provozovatelů přenosových soustav elektřiny (ENTSO-E).

Aby byla dodržena bezpečnost a kontinuita provozu PS, je nutné kromě plnění podmínek definovaných Kodexem PS brát v potaz i dokument zvaný provozní instrukce Dispečinku ČEPS. Celý tento soubor dokumentů poté definuje minimální soubor pravidel pro zajištění bezpečnosti a provozu PS.

Důležitou částí pro tuto práci je Kodex PS část V [15]. Tato část kodexu zahrnuje mimo jiné plán obrany a obnovy PS. Dále definuje prioritní rozběhy výroben v případě blackoutu a také stanovuje, jak docílit dlouhodobé bezpečnosti a spolehlivosti elektrizační soustavy (ES).

V této části je také zahrnuta kapitola týkající se kvality na úrovni PS, která je přejata z [1]. Jsou zde uvedeny závazné limitní hodnoty odchylek frekvence, velikost napětí jednotlivých hladin a také definuje hodnoty parametrů, které zhoršují VQ.

V rámci zajištění VQ, za kterou je zodpovědný ČEPS, je na předávacích bodech umístěno měření [6]. Z měření pak ČEPS dokládá že VQ byla dodržena. Z měření lze pak rovněž stanovit, kdo je za emise zodpovědný, případně jakou mírou daný uživatel přispívá. Je nutné si uvědomit, že VQ je ovlivňována jak uživateli, tak ČEPS.

Z hlediska dodržení parametrů kvality elektrické energie je energetickým zákonem č. 458/2000 Sb [17] definována dohoda, která předepisuje provozovateli v paragrafech:

- §11 ods.1) písmene h) dodržovat stanovené parametry kvality dodávek elektrické energie (EE)
- §24 ods.3) písmene c) bodu 9. omezit dodávku v případě nedodržení kvality EE
- §24 ods.3) písmene d) bodu 9. *omezit výrobu* v případě nedodržení kvality EE
- §24 ods.3) písmene c) bodu 9. přerušit dodávku v případě nedodržení kvality EE
- §24 ods.10) písmene r) je povinen dodržovat kvalitu EE a vykazovat ji ERÚ
- Vyhláška 540/2005Sb o kvalitě dodávek elektřiny a souvisejících služeb v elektroenergetice
  - předepisuje Standard kvality napětí v § 8, kde za kvalitu odpovídá provozovatel ...
  - v §9 a §10 stanovuje lhůty pro posouzení stížnosti a odstranění neplnění standardu kvality.

## 2. ELEKTROMAGNETICKÁ KOMPATIBILITA

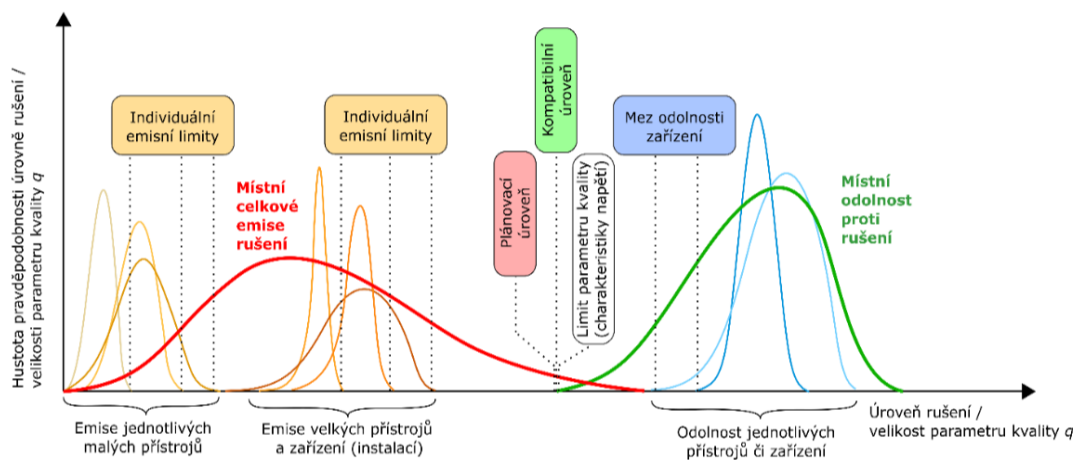
Přenosovou soustavu lze vyjádřit jako elektromagnetický systém, do kterého jsou napojeny ostatní sítě nebo také elektromagnetické podsystémy. Rušení, které se přenáší přes elektromagnetické vazby se nazývá elektromagnetické interference (EMI). Z hlediska dodržení elektromagnetické kompatibility (EMC) je nutné koordinovat míru rušení v každém systému do takové míry, aby nedošlo k interferenci. Podrobně se této problematice zabývá soubor norem a technických reportů IEC 61000-X-Y, jež dávají základ a blíže se věnují zařízením a soustavám hladiny NN případně VN. Norma PNE 33 3430-0-6 [14] problematiku popisuje napříč celou ES.

Tato práce se bude zaměřovat pouze na rušivé jevy, které jsou šířeny po silovém vedení a mají vliv na kvalitu EE, která je posuzována podle [1].

### 2.1 Koordinace EMC

Z celkového pohledu ES je výskyt rušení v systému čistě nahodilý a je nutné k tomu takto přistupovat. Z hlediska koordinace EMC je tedy vhodné vycházet z míry pravděpodobnosti výskytu rušení v dané části sítě a odolnosti zařízení.

Takovýto model koordinace EMC je zobrazen na Obrázku 2.1.



Obrázek 2.1: Model koordinace EMC (převzato z [14])

Cílem koordinace je rozdělit jednotlivé rušení, na základě emisních limitů, mezi jednotlivá zařízení či instalace. Zároveň nesmí při jejich kumulaci být překročena stanovená celková úroveň emisí. Tato úroveň se nazývá jako plánovací a může nabývat menších hodnot, než je stanoveno u úrovně kompatibilní. Průnik křivek odolnosti a rušení pak stanovuje míru EMI, která může být v daném systému způsobena [14].

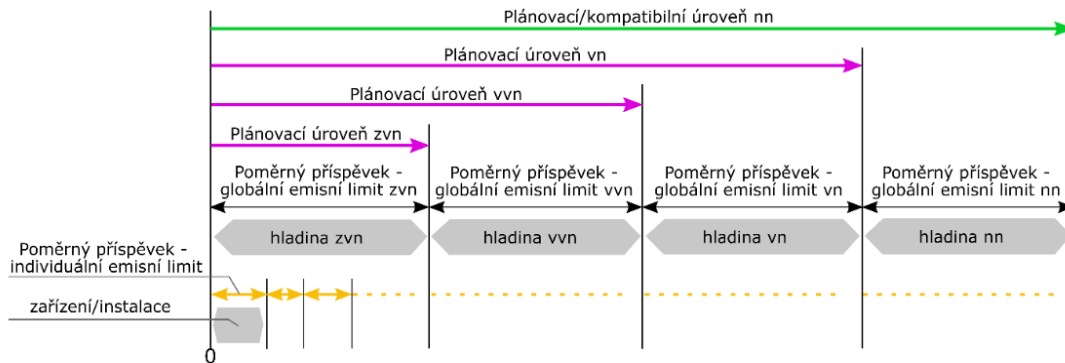
Uplatní-li se tento předpoklad na ES ČR, budou jednotlivé systémy vyjádřeny jako napěťové hladiny, kdy soustava s vyšším napětím bude reprezentovat nadřazený systém.

Do každého z těchto systémů pak jednotlivé zdroje přispívají svými emisemi a udávají tzv. poměrný globální emisní limit [14] daného systému (napěťové hladiny). Tento limit, který vyjadřuje zdroje přispívající emisemi, je potom základem pro systém nadřazený, na který se kumulují další příspěvky emisí v systému nadřazeném.

Jednotlivé příspěvky emisí nesmí teoreticky přesáhnout plánovací úroveň. Jedná se o plánování, tedy o předpokládanou kumulaci a šíření emisí v soustavě, kdy celkové úrovně nemají být překročeny. Lze pak zpětně odvodit příspěvky jednotlivých napěťových hladin, jednotlivých uživatelů sítě a jejich zařízení.

Můžete to být také chápáno tím způsobem, jaká míra emise bude v dané části sítě připuštěna. Tato variabilita by měla respektovat kolik je nebo bude rušivých uživatelů v této části sítě. Zároveň pak musí celá síť fungovat jako celek.

Obdobné vyjádření reprezentuje Obrázek 2.2.



Obrázek 2.2: Koordinace EMC mezi napěťovými hladinami (převzato z [14])

Plánovací úroveň rušení je pak pro hladinu ZVN vyjádřena rovnicí [14]:

$$L_{R,zvn}^{\alpha} = G_{R,zvn}^{\alpha}(i) + G_{R,zvn}^{\alpha}(j) \cdot T_{R,zvn}^{\alpha}(j-i) \quad (2.1)$$

$G_{R,zvn}^{\alpha}(i)$  je maximální globální příspěvek k rušení (globální emisní limit rušení) od všech zdrojů rušení, které mohou být připojeny do uvažované přípojnice systému zvn.

$G_{R,zvn}^{\alpha}(j)$  je ekvivalentní globální příspěvek k rušení (globální emisní limit rušení) od všech zdrojů rušení, které mohou být připojeny do okolních uzlů v zvn.

$T_{R,zvn}^{\alpha}(j-i)$  je přenosový koeficient rušení mezi j-tým a i-tým uzlem systému zvn.

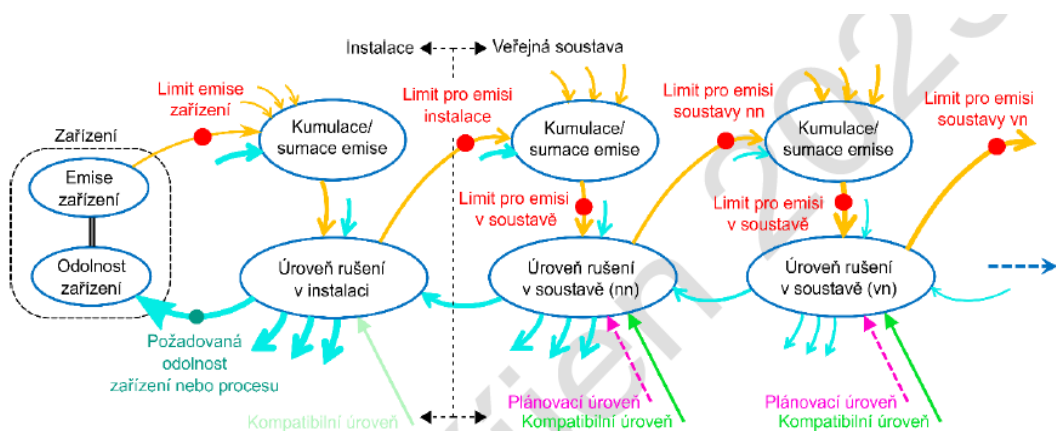
## 2.2 Kumulace rušení

Kumulace vyjadřuje nahodilou soudobost příspěvků emisí v daném místě od všech zdrojů v dané oblasti (uzlu, sběrnici, ...). Příklad takové kumulace rušení je zobrazen na Obrázku 2.3.

Je velmi obtížné ji stanovit, protože dané jevy a jejich časové agregace jsou čistě náhodné. Nejčastější aproximace kombinace či součtu příspěvků rušení s exponentem vzájemného charakteru je mocninná [14]. Výslednou velikost rušení lze popsat rovnicí:

$$R^\alpha = \sum_{y=1}^Y R_y^\alpha, \quad (2.2)$$

kde  $R_y$  je velikost rušení od  $y$ -tého zdroje přispívajícího do daného uzlu a  $\alpha$  je exponent sumačního pravidla.



Obrázek 2.3: Příklad kumulace v síti se zájmovými soustavami (převzato z [14])

## 2.3 Přenos rušení

Rušení neboli emise se šíří s útlumem v závislosti na jeho charakteru a jeho původu. Může jít například o šíření emisí ze soustavy NN do soustavy VN a naopak.

Šíření rušení je pak charakterizováno přenosovým koeficientem  $T$  mezi dvěma uzly nebo sběrnici. Lze to vyjádřit rovnicí (2.3) jako poměr emisí z  $j$  do  $i$  v uzlu  $i$  a  $j$  [14].

$$T_{R,j-i} = \frac{R_i}{R_j} \quad (2.3)$$



### 3. RUŠIVÉ JEVY

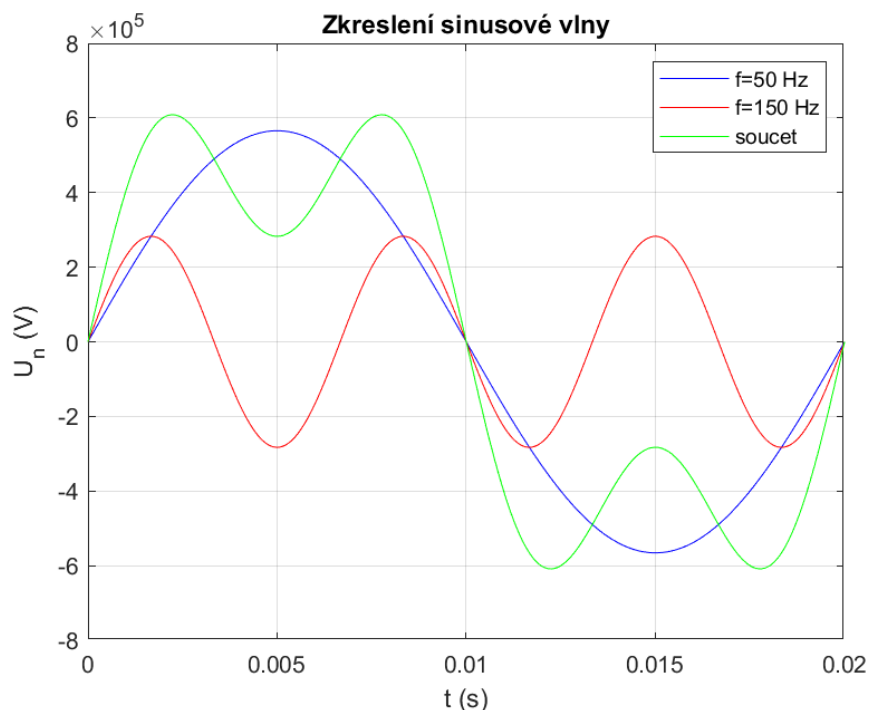
Tato kapitola pojednává o typizovaných rušivých jevech, které jsou z hlediska kvality EE posuzovány. Každý z rušivých jevů je svým způsobem specifický a je nutné k nim přistupovat individuálně.

#### 3.1 Harmonické zkreslení napětí

Harmonické zkreslení je pojem, který vyjadřuje zkreslení sinusové vlny napětí nebo proudu.

Harmonické vznikají důsledkem provozu zařízení s nelineárními vlastnostmi. Jedná se především o zařízení výkonové elektroniky, mezi které lze zařadit neřízené i řízené usměrňovače a obecně polovodičové měniče, ale také například výkonové transformátory. Harmonické složky obsažené ve frekvenčním spektru takového odběru nám způsobí na jednotlivých frekvencích frekvenčně závislé impedance úbytek napětí. Napětí v síti za touto impedancí pak bude mít nesinusový tvar. Záleží však na množství frekvenčních složek v odběru, jejich fázi a velikosti [9].

Pro příklad jsou dány dva sinusové signály napětí. Jedním z nich je signál o systémové frekvenci 50 Hz a druhý je řád 3. harmonické tedy s frekvencí 150 Hz. Pokud se tyto dva průběhy okamžitých hodnoty sečtou, vznikne výsledný signál, který by byl změřen. Tento součet je zobrazen na Obrázku 3.1.



Obrázek 3.1: Příklad součtu dvou signálů o rozdílné frekvenci

Okamžitá hodnota proudu  $i(t)$ , který obsahuje i vyšší frekvenční složky je dána rovnicí [9]:

$$i(t) = \sum_{h=1}^{\infty} I_h \sin(h\omega_1 t + \varphi_h), \quad (3.1)$$

kde  $h$  je řád harmonické,  $I_h$  je amplituda harmonického proudu,  $\omega_1$  je úhlová rychlost,  $t$  je čas a  $\varphi_h$  je fázový posun mezi napětím a proudem.

### 3.1.1 Měření a vyhodnocení harmonických

Základní měření harmonických napětí je definováno v ČSN EN 61000 - 4 -7 [4].

Měření se provádí v soustavách s nominální systémovou frekvencí 50 Hz v 10periodovém intervalu a musí se provést alespoň do řádu 50. Při měření je generováno velké množství dat, které lze redukovat. Redukce množství dat může být provedena na základě ukládání pouze průměrných a extrémních hodnot nebo v případě překročení limitů ukládání veškerých dat [3].

Tato redukce bývá zpravidla realizována výpočtem průměrné efektivní hodnoty podskupin harmonických jako druhá odmocnina součtu kvadrátu efektivních hodnot spektrálních složek [4].

Emise harmonických napětí pak nesmí v rámci vyhodnocování překročit v 95 % intervalu 10minutových průměrných hodnot měřených vzorků za jeden týden předepsané mezní hodnoty [1].

Pro určení spektra harmonických složek se používá diskrétní Fourierova transformace, kdy je nesinusový signál rozložen do frekvenčního spektra s amplitudami jednotlivých harmonických složek a jejich fází.

Poměrem efektivních hodnot součtu harmonických složek  $X_n$  do stanoveného řádu  $H$  a efektivní hodnoty první harmonické  $X_1$  lze vyjádřit tzv. celkové harmonické zkreslení, které je vyjádřené jako:

$$THD = \sqrt{\sum_{n=2}^H \left(\frac{X_n}{X_1}\right)^2}, \quad (3.2)$$

Parametr  $X$  reprezentuje efektivní hodnotu napětí nebo proudu. Celkové harmonické zkreslení  $THD$  je pak sledovaným parametrem, který reprezentuje poměr všech frekvenčních složek ku složce na systémové frekvenci [1].

### 3.1.2 Rezonance obvodu

Impedance sítí má, z hlediska frekvenční závislosti, vliv na šíření harmonických signálů. Je podstatně odlišná oproti impedanci při kmitočtu 50 Hz.

Je nutné brát při jejich určování zřetel na rezonanční jevy. V případě sítí může vlivem rezonance velikost napětí nabývat velkých hodnot.

Rezonančních frekvencí může mít obvod několik. Mohou se lišit dle zapojení a uspořádání sítě. S rostoucím kmitočtem roste téměř lineárně sériová impedance

(induktivní reaktance), která je přímo frekvenčně závislá. Naopak příčné kapacitní reaktance jsou nepřímo závislé na frekvenci [14].

### 3.2 Nesymetrie napětí

Nesymetrie v elektrických soustavách vzniká především důsledkem asymetrických odběrů a asymetrických stavů těchto odběrů. Důkladně tuto problematiku popisuje [9].

V čase se tyto odběry v PS mohou měnit z hlediska velikosti proudu v jednotlivých fázích třífázového systému. Může se jednat například o zařízení či soubor zařízení, které využívá pouze dvě fáze ze sítě. Takovýmto souborem zařízení jsou například jednofázové transformovny střídavé trakce síťového kmitočtu.

Jedním z hlavních ovlivňujících faktorů může být i nadzemní vedení. Vzhledem k různému uspořádání vodičů a různému vzájemnému vlivu se výsledné indukčnosti vodičů a kapacity mezi fázemi a zemí mohou lišit, čímž dochází k impedanční nesymetrii, přispívající do nesymetrie napětí.

Nesymetrie napětí je pak definována jako poměr velikostí zpětné složky napětí  $U^{(2)}$  na systémové frekvenci ku velikosti sousledné složky  $U^{(1)}$ . Lze to také napsat rovnicí:

$$k_U = \frac{U^{(1)}}{U^{(2)}}, \quad (3.3)$$

kde činitel nesymetrie  $k_U$  udává nesymetrii napětí v systému.

Za normálního provozního stavu v období jednoho týdne musí být 95 % 10minutových efektivních hodnot zpětné složky napětí v rozsahu 0-2 % sousledné složky. Vyhodnocuje se hlavně zpětná složka (2), protože právě tato složka má největší vliv na rušení zařízení, která jsou v síti připojená [1].

Sčítání příspěvků k nesymetrii napětí od každého ze zdrojů je dáno sumačním empirickým pravidlem [14] vyjádřeném rovnicí:

$$U_{1(2)} = \alpha_{u(2)} \sqrt{\sum_i U_{1(2)i}^{\alpha_{u(2)}}}, \quad (3.4)$$

kde  $U_{1(2)}$  je výsledná velikost zpětné složky napětí na systémové frekvenci v napájecím bodě,  $U_{1(2)i}$  je velikost zpětné složky napětí na systémové frekvenci  $i$ -tého příspěvku v napájecím bodě a  $\alpha_{u(2)}$  je sumační koeficient pro zpětnou složku napětí.

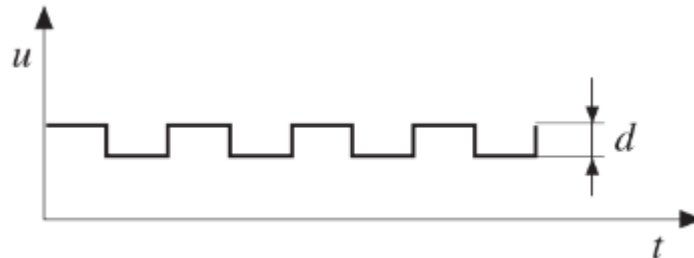
Nesymetrie se dělí na amplitudovou, kde v jednotlivých fázích může být rozdílná velikost proudu. Dále může být nesymetrie fázová, kdy vektory proudů jednotlivých fází mohou mít mezi sebou jiný úhel než je  $120^\circ$ . Zpravidla to bývá kombinace těchto dvou.

Šíření nesymetrie je závislé na příspěvku emise zařízení uživatele sítě, zkratovém výkonu v místě připojení a zkratovém výkonu ve společném napájecím bodě.

### 3.3 Flickr

Změna amplitudy napětí, která má dobu trvání delší, než perioda napětí se nazývá kolísání napětí. Takovéto kolísání se může vyskytnout jednou, pravidelně anebo náhodně [9].

Kolísání napětí formou skoku, náběžné rampy nebo kteréhokoli jiného průběhu je dáno relativní změnou napětí  $d$ . Příklad kolísání napětí je zobrazen na Obrázku 3.2 [9].



Obrázek 3.2: Průběh kolísání napětí (převzato z [9])

Pro flickr je podstatná míra závažnosti flickru udávající intenzitu rušivého vjemu, definovanou a měřenou flickrmetrem. Specifikaci flickrmetru popisuje ČSN EN 61000 - 4-15 [2]. Flickr je rozlišován podle krátkodobé míry vjemu  $P_{st}$  měřené po dobu 10 minut, a dlouhodobé míry vjemu  $P_{lt}$  měřené po dobu 2 hodin [14]. Dlouhodobá míra flickru je dána vztahem:

$$P_{lt} = \sqrt[3]{\sum_{n=1}^{12} \frac{P_{stn}^3}{12}}, \quad (3.5)$$

kde  $n$  označuje  $P_{st}$  hodnoty uvnitř 2hodinového intervalu.

Flickr je způsoben zařízeními, které nemají v průběhu časového intervalu konstantní odběr. Může se jednat o zařízení typu motory s proměnným zatížením, svářecí stroje, obloukové pece nebo se také může jednat o proměnné dodávky energie (například větrné zdroje VTE). Rušivá emise je způsobena pouze zařízením nebo uživatelem sítě, který ji způsobuje [14].

Pro stanovení emise flickru udává [14] empirické výpočty, kterými se dá stanovit superpozice několika zdrojů flickru a jejich příspěvek. Dále popisuje, jakým způsobem se tato emise šíří v síti.

Šíření této emise je hlavně dáno poměrem zkratových výkonů ve společném napájecím bodě a v bodě sledovaném. Záleží také na míře flickru, která je měřena ve společném napájecím bodě.

Hodnota flickru  $P_{st}$  je směrodatná pro normalizaci výrobků na základě zkravého vjemu blikání 60 W žárovky. Pro kvalitu napětí je podstatná hodnota dlouhodobého vjemu flickru  $P_{lt}$ .

### 3.4 Napět'ové události

Kvůli proměnlivosti zatížení a poruchám v distribučních a přenosových soustavách dochází k poklesům a zvýšení napětí.

Tyto jevy jsou nepředvídatelné až náhodné. Jejich výskyt závisí na typu napájecí soustavy a místě sledování. V průběhu roku se rozložení jejich výskytu může jevit nepravidelně.

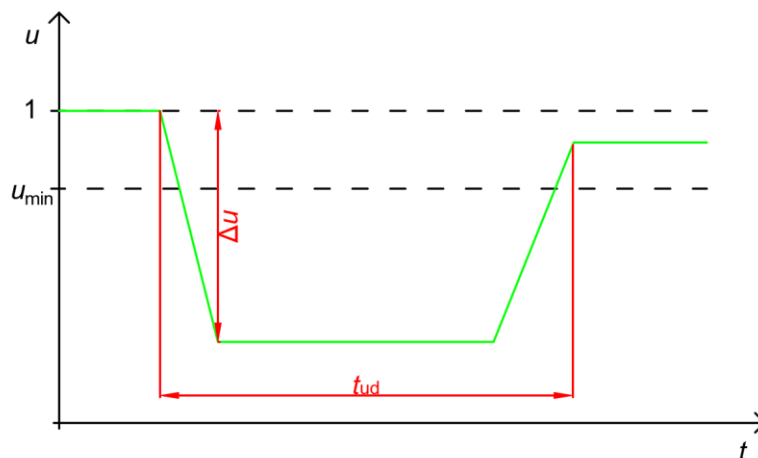
Klasifikace těchto dvou jevů zpravidla spočívá na velikosti zbytkového napětí při poklesu či zvýšení a jejich doby trvání. Je nutné poznamenat, že vzhledem k použité metodě měření dochází k ovlivnění výsledků nejistotou měření, která má významný vliv hlavně u událostí s kratší dobou trvání [1].

#### 3.4.1 Měření poklesů/zvýšení napětí

V případě dlouhodobých poklesů či zvýšení napětí se měří průměrná efektivní hodnota velikosti z 10 měřených period. Pro případ krátkodobých se 10 měřených period měří po půlperiodách [3].

#### 3.4.2 Vyhodnocení poklesů/zvýšení napětí

Na základě sledování takovýchto událostí v rozsáhlejší soustavě je nutné časově agregovat takovou událost, která bude vyjádřena několika proměnnými.



Obrázek 3.3: Časová agregace napět'ové události

Pro případ poklesu bude vyhodnocována hloubka poklesu  $\Delta U$  a doba trvání události  $t_{ud}$ . Záleží však také na tom, jaké hraniční velikosti napětí budou nastavené v SW PQ monitoru. Obdobně se bude vyhodnocovat událost v případě nárustu velikosti napětí.

Z hlediska doby trvání lze napět'ové události klasifikovat jako:

- dlouhodobé (změna zatížení)
- krátkodobé (porucha, přechodné jevy při spínání, ...).

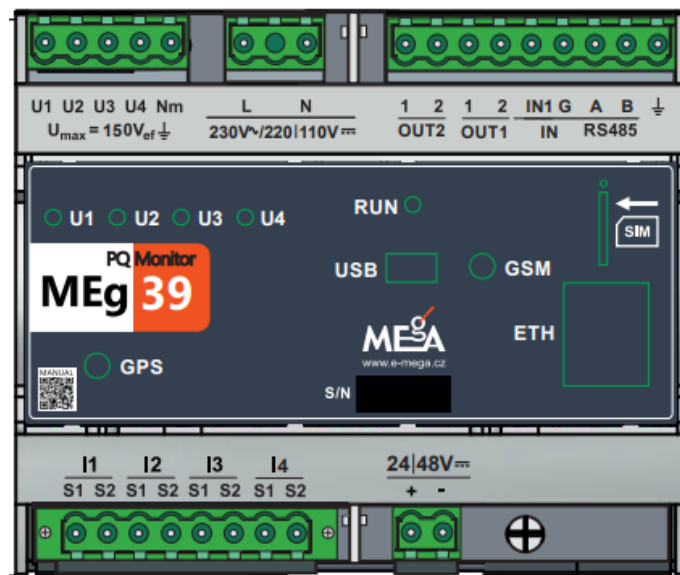
## 4. METODIKA MĚŘENÍ

Každý z rušivých jevů, mezi které lze zařadit například harmonické zkreslení a změny napětí, je z hlediska jeho charakteru specifický i pro metodu měření. Metody měření jsou definovány evropskou normou ČSN EN 61000-4-30 [3].

Pro každý měřený parametr jsou normou definovány třídy měření. Tyto třídy definují metody měření a příslušné požadavky na funkci.

Důležitou třídou měření pro tuto práci je třída A. Třída A je použita pro aplikace, kdy je nutné mít přesné měření. Může se to týkat například aplikací ve smluvních vztazích, ověřování shody s normami nebo odstranění pochybností. Budou-li se měřit stejné signály dvěma přístroji třídy A, musejí mít srovnatelné výsledky v mezích specifikované nejistoty pro tento parametr [7].

Firma ČEPS používá pro měření kvality napětí kvalitoměry od firmy MEG A - Měřicí energetické aparáty, a.s. Měření je rozděleno do dvou částí. První část měření je umístěna v rozváděčích AXM, které nesou toto označení pro obchodní měření v předávacích bodech mezi ČEPS a uživatel sítě nebo mezi provozovatelem DS a zahraničním provozovatelem PS. Druhá část se měří v rozváděčích AXR, které slouží pro regulaci a přenos EE přes vnitřní linky. Vnitřní linky jsou v majetku ČEPS a používají se pro přenos EE přes celou republiku. Vzhled používaného kvalitoměru je zobrazen na Obrázku 4.1.

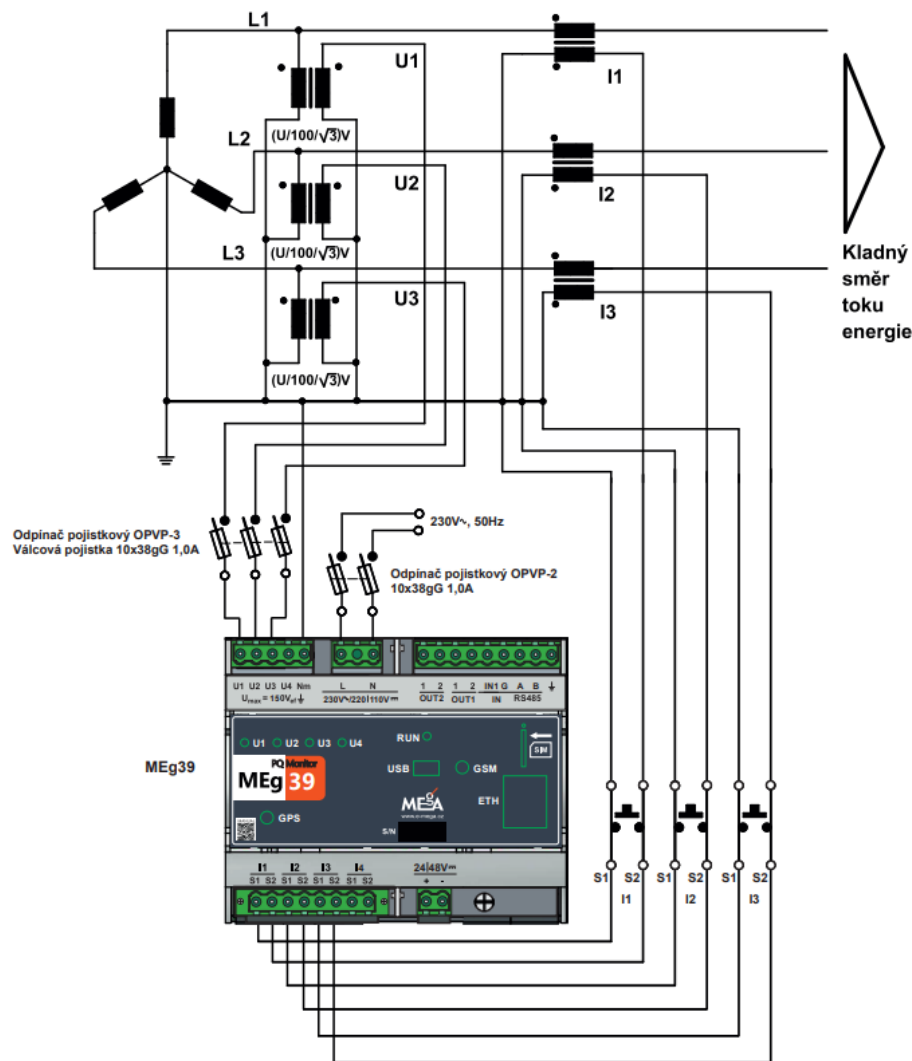


Obrázek 4.1: Čelní pohled na PQ monitor MEG39.2(převzato z [16])

## 4.1 PQ monitor MEg39.2

MEg39.1 je monitor od společnosti MEgA – Měřící Energetické Aparáty, a.s., který realizuje funkci elektroměru a také funkci analýzy kvality EE současně a slouží pro nepřímé měření čtyř napětí a proudů.

Ve funkci měřícího přístroje třídy A vyhodnocuje metodami třídy A. U tří měřených napětí a proudů pak dále vyhodnocuje všechny standardem stanovené parametry. Harmonické a podskupiny meziharmonických signálů vyhodnocuje do 125. řádu. Kromě záznamu události průběhu efektivních hodnot napětí a proudu zobrazuje rovněž oscilografický záznam [16]. Zapojení tohoto monitoru je zobrazeno na Obrázku 4.2.



Obrázek 4.2 Schéma zapojení PQ monitoru MEg39.1(převzato z [16])

## 4.2 Prostředí software MEGa Explorer

Tento software [10] (SW) zpracovává data z měření všech typů přístrojů společnosti MEGa a.s. a zobrazuje je ve formátu tabulek a grafů.

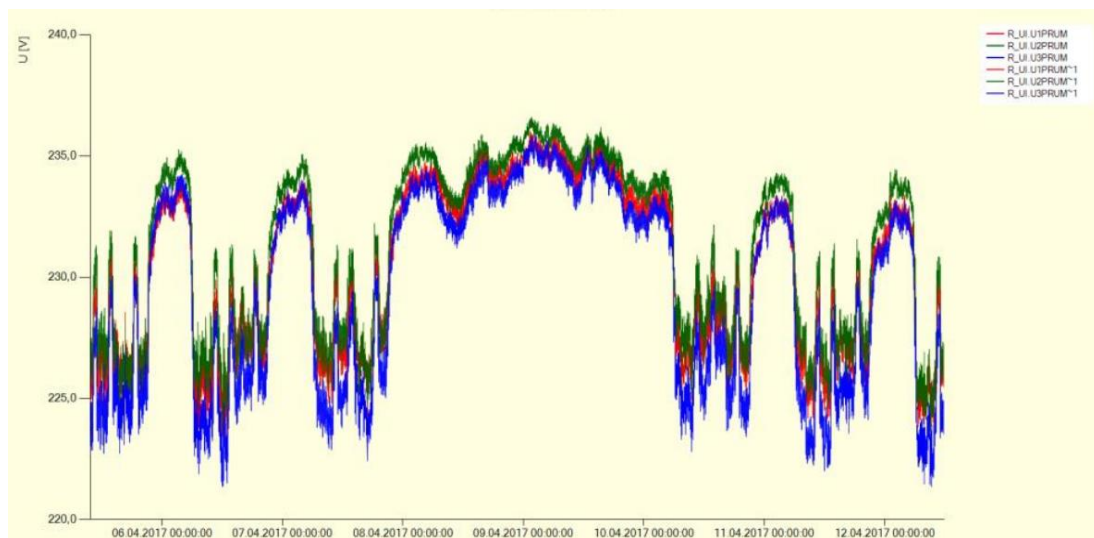
Nabízí volbu časového intervalu z každého souboru měření, což je velice výhodné, pokud je nutné sledovat úzkou časovou oblast v lokalitě, kde měření bylo provedeno, protože měření EE se provádí z hlediska kvartálních měření.

V SW je možné si graficky zobrazit neomezené množství veličin v jednom grafu, čímž se dá demonstrovat chování obvodu pro různé případy.

Zobrazené průběhy jsou z hlediska zobrazených měřených hodnot v grafech v souladu s metodikou měření.

Dále je zde možnost zobrazení harmonických a meziharmonických signálů. Řád, do kterého je měření provedeno závisí na měřícím přístroji. Pro účely této práce je vždy použit monitor MEG39.2 (Obrázek 4.1). Harmonické jsou zde zobrazeny jako jejich velikost a řád.

Příklad průběhu napětí z prostředí SW je zobrazen na Obrázku 4.3.



Obrázek 4.3: Příklad průběhu napětí z SW MEGa Explorer (převzato z [10])



## 5. CÍLE PRÁCE A ZPŮSOBY ŘEŠENÍ

V předchozích kapitolách byla shrnuta problematika kvality napětí, standardizace a rušivé jevy, které ji ovlivňují, včetně jejich fyzikálního základu, metod hodnocení a postupů měření. Tyto vstupní poznatky budou nyní aplikovány při tvorbě simulačního modelu vybrané části přenosové soustavy ČR, na kterém bude zkoumáno šíření harmonického zkreslení napětí.

### 5.1 Cíle práce

Cílem práce je vytvoření modelu, který bude odpovídat části PS. Na vytvořeném modelu pak bude testováno šíření vybraných rušivých jevů, konkrétně harmonického zkreslení napětí.

K vytvoření modelu, je nutné shromáždit potřebná data, které budou parametrizovat prvky obsažené v modelu. Jedná se o prvky jako jsou vedení, u kterých je nutné znát průřezy vodičů a jejich délku, štítkové parametry transformátorů a v první řadě detailní topologii vybrané části sítě. Cílem je vytvořit model způsobilý pro studium šíření harmonických ve frekvenčním rozsahu do 3 kHz, koncipovaný jako symetrický, ale s potenciálem dalšího rozvoje na plně nesymetrický. Předmětem je harmonické zkreslení v (kvazi)ustálených stavech, avšak záměrem je modelovat soustavu v prostředí pro simulaci elektromagnetických přechodových jevů tak, aby mohl být model nasazen i na zkoumání šíření kolísání a rychlých změn napětí v zauzlené síti PS.

Sestavený model bude následně nastaven dle měření výkonových toků poskytnutých firmou ČEPS. Tyto toky budou sloužit jako reference pro simulaci dodávky či odběru výkonu v síti. Je snahou vytvořit obdobné výkonové toky, které odpovídají reálnému časovému řezu, který byl poskytnut společností ČEPS. Ovšem v rámci simulací, kdy budou některé z prvků modelovány pomocí agregovaných ekvivalentních modelů, může nastat úplně jiný případ provozního stavu sítě.

Do nastaveného modelu síť pak budou v různých uzlech injektovány harmonické proudy, které způsobí na impedanci sítě zkreslení napěťové vlny. Jedná se o rušení projevující se v širším frekvenčním spektru a bude záležet jaké frekvenční složky budou z hlediska šíření sledovány a jakou frekvenční charakteristiku impedance bude mít daný uzel.

Vytvořená síť se bude skládat z 45 uzlů. Jedná se o rozsáhlou síť, a proto je nutné zavést určité metodiky, jak efektivně analyzovat výsledky ze simulací. Pro tyto potřeby budou použity přenosové matice, ve kterých budou obsaženy veškeré uzly sítě a budou popisovat, jak se v případě injektáže rušení v daném uzlu projeví i v ostatních uzlech. Použitá metoda může iniciovat inovaci přístupu k analýze rušení v rozsáhlé síti. Výsledky uvedené v těchto maticích pak mohou být také použity k úpravě alokace limitů harmonických dle PNE 333430-0 [14].

Finálním výstupem této práce jsou přenosové matice, které umožní podrobnou analýzu šíření rušení v testované části PS. Již samotný model však představuje významný přínos, neboť umožní testování různých manipulačních stavů a jeho struktura bude otevřená pro další rozšiřování. Díky tomu, že je model založen na reálných parametrech, bude možné verifikovat vyváženost této části sítě pomocí výsledné frekvenčně závislé impedance v jednotlivých uzlech.

## 5.2 Postupy a metody

Hlavním cíle této práce je sestavit model části PS, který bude tvořen na základě reálných parametrů poskytnutých firmou ČEPS. Je samozřejmé, že simulační model nebude nikdy přímo odpovídat realitě, a to z několika důvodů.

Jako první je nutné si uvědomit, že venkovní vedení můžeme rozložit na nekonečně mnoho podélných a příčných parametrů. V této práci bude vedení modelováno jako tři po sobě jdoucí  $\pi$ -články, které budou mít stabilní parametry a nebudou se uvažovat vzájemné kapacity a indukčnosti, které v praxi mohou ovlivnit parametry vedení. Zároveň se veškeré podélné a příčné parametry vedení mohou v praxi v závislosti na teplotě, vlhkosti a terénu měnit.

Obdobné vyjádření platí i u transformátorů. V závislosti na zatížení se mohou v praxi měnit hysterezní ztráty transformátoru, ale v modelu budou všechny parametry transformátoru konstantní.

Dále jak už bylo zmíněno, PS je specifická tím, že toky výkonů mohou být realizovány z více stran. Jelikož se jedná pouze o část PS ČR, je pro vazbu na další rozvodny PS, respektování navazujících distribučních soustav a vnořených výroben a odběrných zařízení, nutné vytvořit agregované ekvivalentní modely s výrobními/napáječi a odběry. Pro účely modelu je nutné vytvořit ekvivalentní napáječe (zdroje nekonečného výkonu) a dle parametrizace velikosti a fáze napětí tohoto napáječe pak realizovat toky výkonů přes model pomocí PI regulátorů, které regulací velikosti a fázi napětí zajistí požadované výkony.

Odběry budou realizovány pomocí pasivních prvků (rezistence, indukčnost a kapacita), které na systémové frekvenci budou odebírat definovaný činný a jalový výkon, a které budou zajišťovat realistický příspěvek do frekvenční charakteristiky soustavy. Tyto odběry však nejsou odběry koncových zařízení, jedná se pouze o agregované ekvivalenty, kdy je pak EE přenášená dále přes vedení a transformátory až k uživatelským zařízením. Zároveň pokud se budou odběry modelovat pomocí pasivních prvků, tak se zpětně projeví frekvenčně závislou impedancí a pomocí měření pak bude možné zjistit, při jaké frekvenci bude model v určitém uzlu rezonovat. Hodnoty odběrů budou počítány na základě reálného manipulačního stavu z praxe, který poskytla firma ČEPS.

Po vytvoření simulačního modelu v prostředí PSCAD budou vytvořeny scénáře, kdy do modelu bude injektováno rušení (harmonické proudy) a bude se na vytvořeném modelu testovat, jak se z určitého uzlu rušení projeví v dalších uzlech modelu.

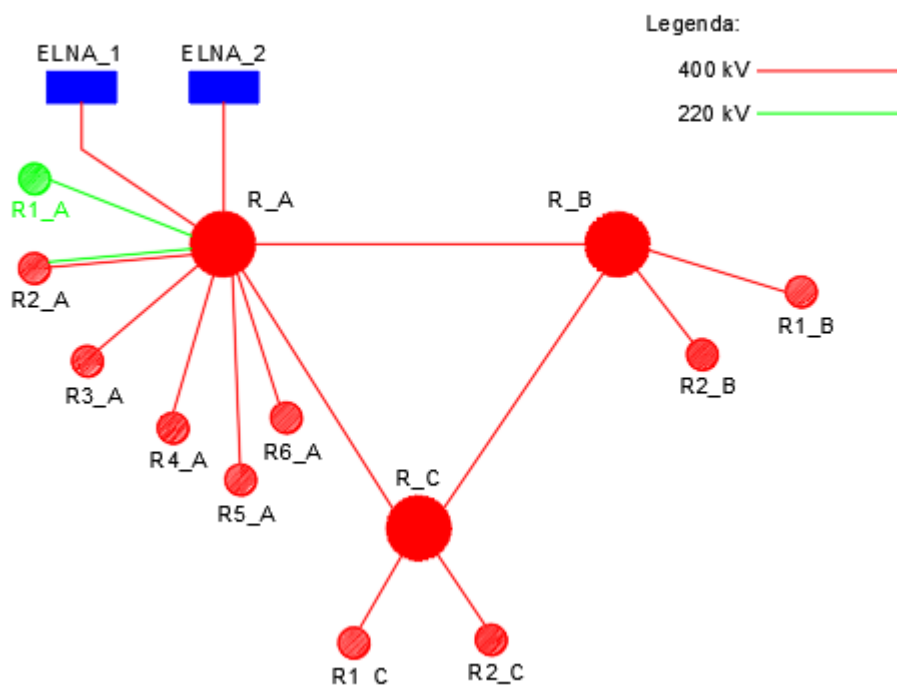
Aby bylo snadné a jednoznačné, jak se rušení projeví v dalších uzlech, bude použita přenosová matice, ve které budou obsaženy veškeré uzly modelu. Bude pak mnohem snadnější při analýze výsledků popisovat, jak se rušení projeví.

## 6. MODEL PŘENOSOVÉ SOUSTAVY

V simulačním prostředí PSCAD byl vytvořen model, který odpovídá části PS ČR. Model je sestavený na základě veřejně dostupných parametrů (délky vedení [11], [12]) a také byly pro sestavení použity parametry, které poskytla firma ČEPS (parametry transformátorů a zkratové výkony). Jedná se o model třífázový symetrický.

### 6.1 Topologie testovací přenosové soustavy

Topologie zkušebního modelu je primárně založena na třech vzájemně propojených rozvodnách, kdy součástí těchto rozvodů jsou také vývody z těchto tří rozvodů. Přehledové schéma topologie modelu je zobrazeno na Obrázku 6.1.



Obrázek 6.1: Přehledové schéma modelu v prostředí PSCAD

Pro sestavení modelu bylo nutné vytvořit ekvivalentní modely jednotlivých součástí PS, které budou nahrazovat vedení a koncové odběry v předávacích bodech. Jelikož se jedná pouze o část sítě PS jsou ekvivalentní modely odběrů reprezentovány na základě toho, zda se jedná o zakončení modelu za transformátorem nebo se jedná např. o napojení do další rozvodny, kde struktura sítě není přímo známá nebo se síť nebude dále mapovat. V takovýchto případech je nutné modelovat ekvivalentní model tak, aby v něm byly obsaženy všechny prvky, které nám reprezentují celou strukturu sítě. Jedná se o prvky jako ekvivalentní napáječ, pomocí kterého lze simulovat tok výkonů z určitého uzlu/rozvodny do dalšího uzlu. Dále je nutné počítat s odběry na jednotlivých napěťových

hladinách a transformátory, protože EE je od PS přenášena přes předávací body a transformátory dále k zařízením uživatelů sítě.

## 6.2 Ekvivalentní model vedení

Vedení je jednou z částí, kterou bylo nutné v prostředí PSCAD modelovat. Je nutné brát v potaz, že vedení je tvořeno podélnými parametry (impedance) a příčnými parametry (admittance).

Podniková norma PNE 33 3430-0 ed. 6 [14] popisuje, že pro vyjádření frekvenčního charakteru a chování vedení, je potřebné vedení modelovat jako řadu po sobě jdoucích  $\pi$  – článků, a v tomto ohledu formuluje doporučení. Pro tuto práci bude uvažováno, že vedení je modelováno třemi  $\pi$ -články.

Nutno si uvědomit, že každý  $\pi$ -článek charakterizuje vedení mezi dvěma závěsnými body. Tímto se do simulace zavádí určitá chyba, protože v realitě podpěrných bodů vedení je mnohonásobně více. Zároveň v aplikovaném ekvivalentním modelu vedení nejsou uvažovány vzájemné kapacity a indukčnosti mezi fázemi, což zavádí rovněž chybu do simulace oproti realitě, které se vztahují především na nesymetrické stavy. Metodiku pro stanovení vzájemných kapacit a indukčností popisuje dokument Distribuce elektrické energie [5]. V realitě se mohou tyto vzájemné parametry ovlivňovat a výsledkem pak jsou jiné parametry vedení než ty, které jsou založené na základních výpočtech parametrů vedení.

Pro výpočet parametrů jednotlivých vedení byly použity parametry AlFe lan z knihovny programu GLF [8], který využívá univerzita VUT. Parametry AlFe lan jsou uvedeny v Tabulce 6.1 a odpovídají pro frekvenci 50 Hz. Nutno dodat, že parametry AlFe lan se mohou lišit pro jednotlivé napěťové hladiny. Parametry uvedené v této tabulce odpovídají napěťové hladině 400 kV. Pro další napěťové hladiny musí být použity odpovídající parametry.

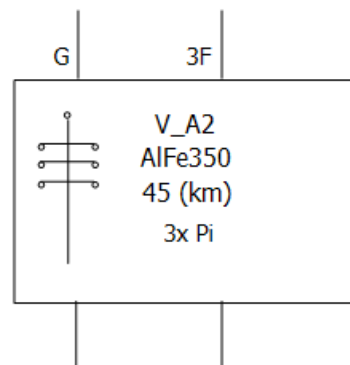
Tabulka 6.1 Parametry AlFe lan napěťové hladiny 400 kV

AlFe	$R_k$ ( $\Omega/\text{km}$ )	$X_k$ ( $\Omega/\text{km}$ )	$B_k$ ( $\mu\text{S}/\text{km}$ )	$I_{\text{dov}}$ (A)
95	0,319	0,428	2,69	310
120	0,225	0,411	2,75	362
150	0,201	0,403	2,85	420
185	0,156	0,406	2,91	455
210	0,13	0,4	2,9	500
240	0,125	0,403	2,869	530
350	0,085	0,394	3,05	680

Je dáno lano AlFe 350, které má délku  $l = 30$  km. Pokud toto vedení bude tvořeno třemi  $\pi$ -články je nutné si tuto délku rozdělit na tři části tedy po 10 km. Poté délkou vynásobíme jednotlivé parametry pro AlFe 350 v Tabulce 6.1. Tím se získá hodnota

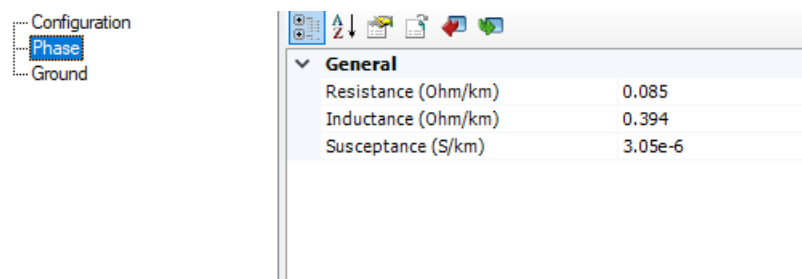
impedance a admitance pro délku vedení 10 km tedy pro jeden  $\pi$ -článek. Impedance je tvořena reálnou částí – rezistencí a imaginární částí – induktivní reaktancí. Pro příčnou admitanci je uvažována pouze kapacitní susceptance. Ještě je nutné výslednou admitanci rozdělit na polovinu, protože příčné parametry se pro  $\pi$ -článek rozdělují na polovinu na začátek a na polovinu na konec daného článku. Vedení modelované tímto způsobem se pak chová jako sérioparalelní rezonanční prvek, který při určité hodnotě frekvence může rezonovat. Záleží však na množství  $\pi$ -článků, délce vedení atd.

Vytvořený ekvivalentní model vedení v prostředí PSCAD je zobrazen na Obrázku 6.2.



Obrázek 6.2: Ekvivalentní model vedení

Do tohoto ekvivalentního modelu lze přes zadávací menu zadávat parametry jako délka vedení, typ fázového a zemnicího vodiče. Dále je zde možné zadat zemnění stožáru, které závisí na typu sítě. Pro tuto práci byly voleny typizované hodnoty v závislosti, o jaký typ sítě se jedná. Pro příklad se uzemnění stožárů pro síť VVN a ZVN pohybuje od jednotek do desítek ohmů. Uživatel, který by znal přesné hodnoty zemnění daných stožárů v určitém místě sítě, si tak může navolit tuto hodnotu, ale pro tuto práci jsou voleny hodnoty v řečeném intervalu. Pro síť VN se pak mohou zemniče pohybovat do 15  $\Omega$ . Příklad zadávacího menu je zobrazen na Obrázku 6.3.

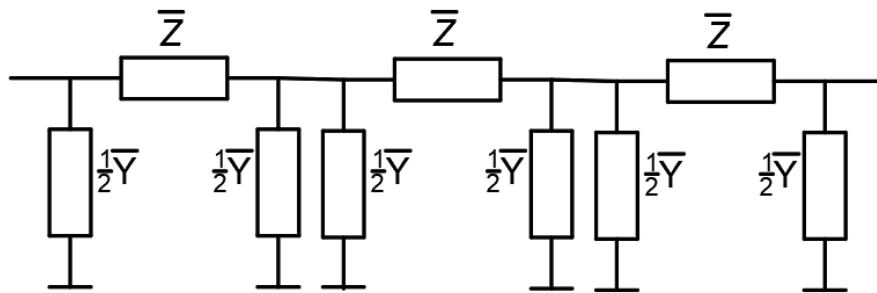


Obrázek 6.3: Zadávací menu ekvivalentního agregovaného modelu vedení

Přes zadávací menu tedy uživatel zvolí parametry pro vedení, kdy samotný model si pak na základě výpočtu dopočítá hodnoty rezistancí, indukčností a kapacit vedení.

Pro jednoduchost modelování jsou uvažovány veškeré vedení 400 kV s lanem AlFe 350. Pro síť 220 kV jsou modelovány vedení s lanem AlFe 240 a pro zemnicí vodič je použito lano AlFe 95. Detailní schéma tohoto modelu je dostupné v Příloze A.1.

Pro stanovení impedance/admittance vedení, které má délku 30 km, je použito lano AlFe 350. Vedení je modelováno třemi  $\pi$ -články a jeho celková délka bude rozdělena na třetiny tedy na 10 km. Rozložení vedení na jednotlivé články je zobrazeno na Obrázku 6.4.



Obrázek 6.4: Rozložení vedení na tři  $\pi$ -články

Celkovou admittanci vedení jednoho  $\pi$ -článku  $\bar{Y}_V$  lze vypočítat pomocí následující rovnice:

$$\bar{Y}_V = \frac{\bar{Y}}{2} + \frac{1}{\bar{Z}} + \frac{\bar{Y}}{2} + \frac{\bar{Y}}{2} + \frac{1}{\bar{Z}} + \frac{\bar{Y}}{2} + \frac{\bar{Y}}{2} + \frac{1}{\bar{Z}} + \frac{\bar{Y}}{2}, \quad (6.1)$$

kde  $\bar{Y}$  je admittance jedno  $\pi$ -článku,  $\bar{Z}$  je impedance jednoho  $\pi$ -článku.

Výsledná hodnota  $\bar{Y}_V$  je  $(0,157 - j0,727) \Omega$ . Následné přepočítání admittance  $\bar{Y}_V$  na impedanci  $\bar{Z}_V$  je provedeno pomocí následující rovnice:

$$\bar{Z}_V = \frac{1}{\bar{Y}_V}, \quad (6.2)$$

Výsledná hodnota impedance je  $(0,283 + j1,314) \Omega$

### 6.3 Ekvivalentní model napáječe

Model PS je modelován jako systém v ustáleném stavu. V jeden časový okamžik se tedy bude jevit jako systém s konstantními odběry a dodávkami výkonu. V praxi se však neustále dodávka a spotřeba v síti mění.

Aby bylo možné uvést model do ustáleného stavu, bylo nutné vytvořit model zdroje výkonů. Tento ekvivalentní napáječ je tvořen napětovým zdrojem a jeho vnitřní zkratovou impedancí, která je modelována jako sériově spojený rezistor s cívkou.

Zkratová impedance je určena na základě hodnoty zkratového příspěvku dané větve modelu. Hodnoty zkratových příspěvků ve formě zkratových výkonů poskytla pro modelovanou část sítě firma ČEPS. Tyto hodnoty jsou uvedeny v Příloha G. Firma poskytla minimální a maximální hodnoty zkratových výkonů za vybrané období.

Hodnoty zkratových výkonů použité pro vytvoření modelu PS jsou z poskytnutého intervalu dat.

Velikost zkratového příspěvku jednotlivých větví je dána impedancí všech prvků, které se za touto větví nachází. Názorným příkladem může být určení zkratové impedance napáječe, kdy je znám zkratový výkon  $S_k(3)$  3600 MVA větve mezi elektrárnou ELNA\_1 a rozvodnou R\_A (Obrázek 6.1). Pokud by se napáječ modeloval přímo do rozvodny R\_A, byla by hodnota napáječe určena na základě hodnoty zadaného zkratového výkonu. Hodnota zkratového výkonu však nebude stejná v uzlu elektrárny ELNA\_1.

Pro výpočet zkratové impedance je použit následující vzorec:

$$Z_k = \frac{c \cdot U_n^2}{S_k(3)}, \quad (6.3)$$

kde  $c$  je napěťový koeficient, nabývá hodnot 1 a 1,1 a vyjadřuje rozdílná vnitřní napětí zdrojů, pro tuto práci je uvažována hodnota 1,1.  $U_n$  je jmenovité sdružené napětí uzlu 400 kV,  $S_k(3)$  je třífázový zkratový výkon v uzlu A.

Výsledná hodnota modulu zkratové impedance  $Z_k$  je 48,89  $\Omega$ . Aby bylo možné určit komplexní impedanci síťového napáječe, byl v této práci zaveden předpoklad, že podíl induktivní reaktance  $X_{L,nap}$  a rezistence  $R_{nap}$  je 10 ku 1. Na základě tohoto předpokladu lze pak spočítat velikost reálné a imaginární složky impedance  $\bar{Z}_k$ . Pro výpočet těchto parametrů při uvažování jejich poměru byly odvozeny následující vzorce:

$$R_{nap} = \frac{Z_k}{\sqrt{101}}, \quad (6.4)$$

$$X_{L,nap} = \frac{10 \cdot Z_k}{\sqrt{101}}, \quad (6.5)$$

Výsledná hodnota impedance napáječe  $\bar{Z}_k$  je po dosazení (4,86 + j48,65)  $\Omega$ . V uzlu A je tedy dána zkratovým výkonem 3600 MVA tato impedance. Zkratový příspěvek do tohoto uzlu předpokládá rovněž i impedanci vedení  $\bar{Z}_V$ . Předpokládejme hodnotu impedance vedení stejnou jako v příkladu uvedeném v kapitole 6.2. Aby bylo možné určit zkratový výkon v uzlu B je nutné od celkové zkratové impedance  $\bar{Z}_k$  odečíst impedanci vedení  $\bar{Z}_V$ . Výpočet zkratového výkonu v uzlu B je dán vztahem:

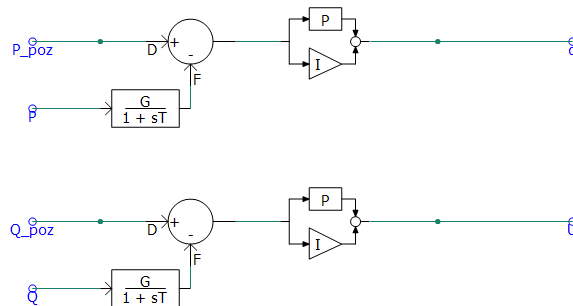
$$S_{k,B}(3) = \frac{c \cdot U_n^2}{|\bar{Z}_k - \bar{Z}_V|}, \quad (6.6)$$

Výsledná hodnota výkonu je 3701 MVA. V poměru se hodnota zvýšila o 2,73 %. V práci tedy bude uvažován zkratový výkon stejný v uzlu R\_A i v uzlu ELNA\_1, protože se hodnota zkratového výkonu změnila o malou hodnotu.



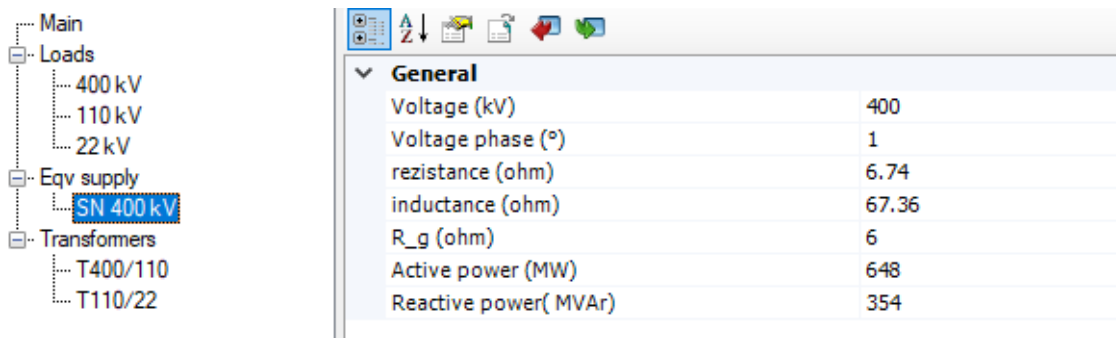
Přes zadávací menu může uživatel zadat požadovanou hodnotu výkonu. Pro udržení zadané dodávky výkonů takového napáječe jsou velikost a úhel vnitřního zdroje napětí řízeny pomocí PI regulátorů.

Tyto PI regulátory fungují tak, že uživatel zadá požadovaný výkon v zadávacím menu modelu a na základě odchylky od měřené hodnoty PI regulátor mění velikost a úhel napětí. Zpravidla platí, že pro změnu hodnoty činného výkonu je nutné měnit úhel napětí a pro změnu hodnoty jalového výkonu se mění velikost napětí. Modelované regulátory jsou zobrazeny na Obrázku 6.5.



Obrázek 6.5: PI regulátory pro řízení dodávaných výkonů napáječem

Přes zadávací menu může uživatel rovněž zadat hodnoty pro zkratovou impedanci napáječe. Uživatel zadá hodnotu rezistence a induktivní reaktance. Na základě matematického aparátu pak PSCAD automaticky spočítá velikost indukčnosti. Příklad zadávacího menu pro ekvivalentní napáječ je zobrazen na Obrázku 6.6.



Obrázek 6.6: Zadávací menu ekvivalentního napáječe

Aby bylo možné pokrýt veškeré ztráty se kterými se při základní výkonové bilanci systému nepočítalo, a které ve výsledku mohou ovlivnit výkonové toky v síti, byl vytvořen ekvivalentní napáječ, který plní funkci bilančního uzlu.

Tento napáječ není řízen PI regulátory, ale na základě fixně zadané velikosti napětí a úhlu napětí ve výsledku dodává/odebírá určitý výkon nezbytný pro udržení zadaného napětí. Bilanční uzel byl zvolen v rozvodně R\_A a jeho zkratová impedance byla

vypočítána ze zkratového výkonu 3500 MVA. Velikost napětí tohoto napáječe je 400 kV a úhel  $0,1^\circ$ .

## 6.4 Ekvivalentní agregovaný model odběru

Pro výpočet odběru je důležité uvažovat ustálený chod sítě. Je důležité, aby tento odběr byl modelován pomocí kapacity, indukčnosti a rezistence. V závislosti na velikosti těchto prvků je pak možné jednak modelovat v prostředí PSCAD odběr, který bude mít určitou velikost činného a jalového výkonu, ale také bude zároveň takovýto odběr vyjádřený vlastní rezonanční frekvencí.

Konkrétní stav výkonových toků v modelované části PS je dán z reálné situace, kterou poskytla firma ČEPS. Výkonové toky v modelu definuje Příloha C. Výkonové toky jsou převzaté, avšak velikosti výkonů jsou variovány tak, aby odpovídali jiné realistické situaci. Nejsou to tedy konkrétní hodnoty, které poskytla firma ČEPS.

Požadavky na tento ekvivalent odběru spočívají v jeho modelování. Ačkoli se může určitá rozvodna jevit jako zdroj výkonu, pravděpodobně bude také obsluhovat další vývod z této rozvodny, tedy další odběr, který odebírá určitý výkon s odpovídající hodnotou účinníku. Předpokládá se, že hodnoty odebíraného jalového výkonu odpovídají jalovému výkonu po kompenzaci kapacitními kondenzátory, přičemž hodnota účinníku pro tento předpoklad bude 0,98. Stav před kompenzací je uvažován pro hodnotu účinníku 0,95. Induktivní jalový výkon, který je reprezentován v ekvivalentním odběru indukčností, bude odpovídat hodnotě účinníku před kompenzací. Velikost kapacity je pak volena tak, aby tento ekvivalentní odběr odebíral jalový výkon s účinníkem 0,98.

Pokud by byl ekvivalent odběru modelován pouze jako odběr na systémové frekvenci, neprojevila by se jeho rezonanční frekvence, která je určena velikostí indukčnosti a kapacity. Ačkoli z dostupných dat není zcela zřejmé, že v rozvodně, která do testované části sítě dodává výkon, existuje další odběr, jeho frekvenční charakteristika impedance přispěje k výsledné frekvenčně závislé impedanci uzlu/rozvodny.

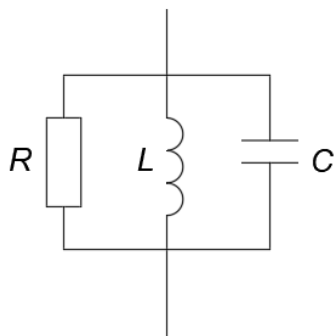
Z analýzy dat poskytnutých společností ČEPS byly identifikovány tři případy toků výkonu, na jejichž základě je třeba určit velikost ekvivalentního odběru.

Může nastat případ, kdy se větev jeví jako spotřebič činného a jalového výkonu. V tomto případě bude měřená hodnota jalového výkonu uvažována po kompenzaci s hodnotou účinníku 0,98.

Dalším možným případem je současná dodávka a odběr výkonu na dané větvi. Pro výpočet hodnot pasivních prvků odběru je zohledněn detekovaný odběr výkonu. V závislosti na tom, zda se jedná o odběr činného nebo jalového výkonu, se přistupuje k dalším výpočtům. V případě odběru činného výkonu se z této hodnoty dopočítá velikost jalového výkonu pro hodnoty účinníku 0,95 a 0,98. Pokud je odebírán jalový výkon, je zvažována hodnota účinníku 0,98. Na základě této hodnoty lze pak dopočítat činný výkon a rovněž jalový výkon odpovídající účinníku 0,95.

Posledním scénářem je dodávka činného i jalového výkonu na určité větvi. V tomto případě bude pro odběr uvažována stejná hodnota činného výkonu jako je hodnota dodávky. Na základě této hodnoty se pak vypočítají hodnoty jalového výkonu pro hodnotu účinníku 0,95 a 0,98.

Topologie obecné modelované zátěže je zobrazena na Obrázku 6.7.



Obrázek 6.7: Schéma ekvivalentního agregovaného modelu zátěže

Je dán odběr činného výkonu  $P_{\text{odb}}$  150 MW. Bude uvažována zátěž, která má topologii náhradního obvodu zobrazenou na Obrázku 6.7. Je tedy zaveden předpoklad, že výsledný účinník zátěže  $\cos\varphi$ , po kompenzaci kondenzátorem C, je 0,98. Před tím, než byla tato zátěž kompenzována kapacitou na tuto hodnotu účinníku se předpokládá, že velikost induktivního výkonu je určena hodnotou nekompenzovaného účinníku 0,95.

Pro výpočet jalového výkonu před a po kompenzaci jsou dány rovnice:

$$Q_{0,98} = P_{\text{odb}} \cdot \tan(\varphi_{0,98}), \quad (6.7)$$

$$Q_{0,95} = P_{\text{odb}} \cdot \tan(\varphi_{0,95}), \quad (6.8)$$

kde  $Q_{0,98}$  je hodnota jalového výkonu po kompenzaci účinníku na hodnotu 0,98,  $Q_{0,95}$  je hodnota jalového výkonu před kompenzací, tedy pro hodnotu účinníku 0,95 a  $\varphi$  je úhel odpovídající danému účinníku.

Výsledná hodnota jalového výkonu pro účinník 0,95, tedy před kompenzací, je pro uvedený příklad 49,3 MVar. Po kompenzaci kapacitou je hodnota jalového výkonu 30,46 MVar. Nyní je nutné z těchto hodnot dopočítat velikost rezistence odběru  $R_o$ , induktivní reaktance odběru  $X_{L,o}$  a kapacitní reaktance odběru  $X_{C,o}$  pro hladinu napětí 400 kV. Výpočet těchto parametrů je dán rovnicemi:

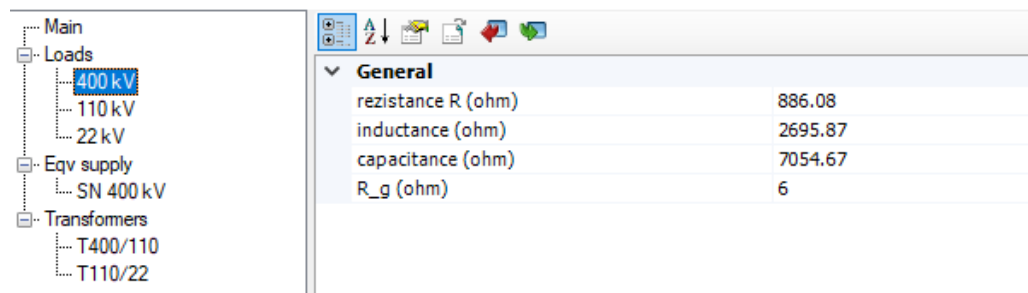
$$X_{L,o} = \frac{U_{L-L}^2}{Q_{0,95}}, \quad (6.9)$$

$$X_{C,o} = \frac{U_{L-L}^2}{Q_{0,95} - Q_{0,98}}, \quad (6.10)$$

$$R_o = \frac{U_{L-L}^2}{P_{odb}}, \quad (6.11)$$

kde  $U_{L-L}^2$  je efektivní hodnota sdruženého napětí 400 kV.

Výsledné hodnoty pak může uživatel zadat přes zadávací menu do sekce Loads. Program PSCAD pak automaticky dopočítá hodnotu indukčnosti a kapacity. Příklad zadávacího menu pro odběry je zobrazen na Obrázku 6.8.



Obrázek 6.8: Zadávací menu odběru

## 6.5 Transformátory

Součástí modelu PS jsou rovněž i transformátory pro transformaci 400/220 kV, 400/110 kV a 110/22 kV.

Firma ČEPS poskytla štítkové hodnoty autotransformátoru 400/110 kV. Parametry tohoto transformátoru jsou dostupné v Tabulce 6.2.

Tabulka 6.2 Parametrizace transformátoru 400/110 kV

Transformátor	$x_{H-L}$ (p.u.)	$x_{H-T}$ (p.u.)	$x_{L-T}$ (p.u.)
T400/110 (350 MVA)	0,14	0,35	0,2

Všechny autotransformátory obsažené v modelu obsahují terciární vinutí, ovšem je zatím bráno jako odpojené, tedy ve stavu naprázdno. Z tohoto důvodu budou reaktance spjaté s terciárním vinutím uvažovány stejné i v případě ekvivalentu několika transformátorů.

Parametrizace transformátorů 400/220 kV a 110/22 kV byla provedena dle dokumentu Parametry transformátorů ze Západočeské univerzity [13].

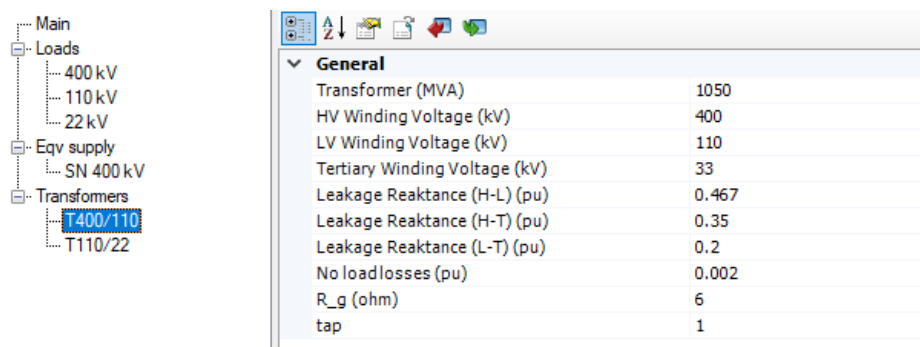
Pokud je v modelu mapováno, že se v dané rozvodně vyskytuje více stejných transformátorů, jsou brány v paralelním chodu. Hodnota podélné reaktance ekvivalentního transformátoru  $x_T$  je dána rovnicí:

$$\frac{1}{x_T} = \frac{1}{x_{T1}} + \dots + \frac{1}{x_{Tn}}, \quad (6.12)$$

kde  $x_{T1}$  je podélná reaktance prvního transformátoru, n může nabývat hodnot v závislosti na množství transformátorů v paralelním chodu.

Jedná se tedy o ekvivalentní transformátor, který bude mít jmenovitý výkon a další parametry závislé na počtu transformátorů.

Uživatel zadá potřebné hodnoty pro parametrizaci transformátoru přes zadávací menu. Příklad zadávacího menu pro transformátory je zobrazen na Obrázku 6.11.

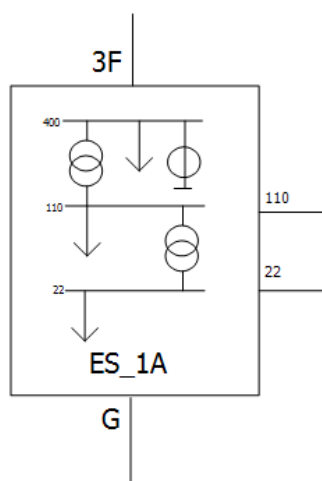


Obrázek 6.9: Zadávací menu transformátoru

## 6.6 Ekvivalentní agregované modely sítí 400, 110 a 22 kV

PS modelovaná v prostředí PSCAD je pouze částí z celé její struktury po republice. Bylo tedy nutné stanovit do jaké míry bude síť mapována. Na základě toho byly pro sestavení modelu PS vytvořeny ekvivalentní agregované modely sítí 400, 110 a 22 kV. V rámci této práce jsou uvažovány v ekvivalentních modelech pouze tyto napěťové hladiny, pokud by uživatel požadoval např. napěťovou hladinu 220 kV, lze tyto parametry konfigurovat v zadávacím menu.

Tyto ekvivalentní modely vyjadřují okrajové části modelu, kde nebude síť na hladině 400 kV nebo 110 kV dále mapována a bude nahrazena právě těmito modely. Modely jsou tvořeny třemi nebo dvěma napěťovými hladinami, a to z důvodu předpokládané struktury sítě v daném uzlu na hladině 400 kV nebo 110 kV. Závisí to na tom, zda byla síť PS mapována pouze na hladině 400 kV anebo zda je uvažován i transformátor 400/110 kV, případně 220/110 kV. Ekvivalentní agregovaný model, který navazuje na síť na hladině 400 kV je zobrazen na Obrázku 6.10.



Obrázek 6.10: Ekvivalentní agregovaný model okrajové části sítě s připojením na hladině 400 kV, a obsahující agregované modely sítí 110 kV a 22 kV

Model obsahuje odběry na napěťových hladinách 400, 110 a 22 kV, které jsou reprezentovány paralelně zapojenými pasivními prvky (viz kapitola 6.4). Tyto odběry nejsou ve skutečnosti koncové odběry uživatelských zařízení, ale jsou to právě ekvivalenty agregovaných toků výkonů, za kterými může být opět transformátor a zařízení uživatele sítě. Výkonový odběr přiřazený takovému ekvivalentu bude rozdělen na třetiny, tedy třetina na každou napěťovou úroveň.

Z toho důvodu jsou transformátory 400/110 kV v tomto modelu ekvivalenty tří paralelně zapojených transformátorů. Transformátory 110/22 kV jsou pak ekvivalentem pěti transformátorů.

Uživatel, který použije tento model může specifikovat v zadávacím menu velikosti jednotlivých odběrů. Do menu je nutné zadat hodnotu rezistence, induktivní reaktance a kapacitní reaktance (viz Obrázek 6.8). Díky tomu pak každý z odběrů bude tvořit prvek s určitou rezonanční frekvencí.

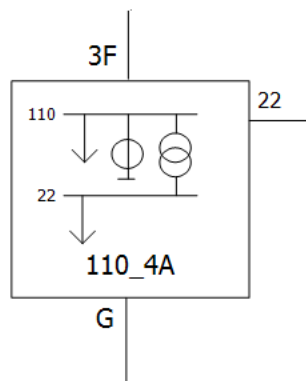
Další prvek obsažený v tomto agregovaném ekvivalentu je na hladině 400 kV ekvivalentní napáječ (viz kapitola 6.3).

Dále jsou v modelu vývody označené 110 a 22. Tyto vývody se použijí pro připojení modelu měřicí aparatury. Na základě toho pak uživatel nemusí umisťovat měřicí aparaturu do ekvivalentního modelu, ale může ji umístit v základní vrstvě modelu PS. Aplikace může být například pro situaci, kdy uživatel vloží zdroj rušení do ekvivalentního modelu a bude chtít zkoumat, jak se rušení šíří uvnitř tohoto ekvivalentu. Příklad zadávacího menu pro tento model je zobrazen na Obrázku 6.8. Detailní struktura tohoto modelu je zobrazena v Příloze A.2.

Pro ty části sítě, kde je mapován transformátor 400/110 kV nebo 220/110 kV, případně ekvivalent několika transformátorů, bylo nutné vytvořit agregovaný model pro připojení na hladině 110 kV, který bude reprezentovat síť 110 kV a 22 kV.

Tento model je zobrazený na Obrázku 6.11. Jeho funkce je stejná jako u ekvivalentního agregovaného modelu sítí 400, 110 a 22 kV (Obrázek 6.10). Jediný rozdíl je v tom, že neobsahuje napěťovou hladinu 400 kV. Z toho důvodu může uživatel v modelu zadávat parametry pro odběry, napáječ a transformátor pouze pro napěťové hladiny 110 a 22 kV.

Transformátor 110/22 kV neobsahuje přepínač odboček a je modelován jako ekvivalent pěti transformátorů pracujících v paralelním chodu. Detailní schéma tohoto modelu je zobrazeno Příloze A.3.



Obrázek 6.11: Ekvivalentní agregovaný model okrajové části sítě s připojením na hladině 110 kV, a obsahující agregované modely sítí 22 kV

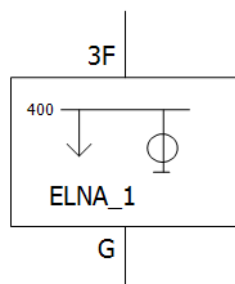
## 6.7 Ekvivalentní agregovaný model elektrárny

Z topologie sítě modelu (Obrázek 6.1) je zřejmé, že do rozvodny R\_A jsou připojeny dvě výrobní. Tyto výrobní dodávají výkon do soustavy, ale také mohou spotřebovávat jalový výkon. Dodávka nebo spotřeba jalového výkonu pak udává velikost napětí.

Elektrárna je proto modelována jako síťový napáječ (viz kapitola 6.3). Spolu s napáječem má také elektrárna modelovanou zátěž z pasivních prvků (viz kapitola 6.4).

Velikost činného výkonu odběru elektrárny je dána jako 10 % celkového instalovaného výkonu všech bloků dané elektrárny. Jalový výkon je pak dopočítán na základě předpokladu, že velikost indukčnosti je dána hodnotou účinníku 0,95 a velikost kapacity hodnotou účinníku po kompenzaci 0,98.

Vzhled tohoto modelu je zobrazen na Obrázku 6.12.



Obrázek 6.12: Ekvivalentní agregovaný model elektrárny s připojením na hladině 400 kV

Je zřejmé, že v modelu PS nejsou tyto ekvivalenty jediným zdrojem výkonu. Právě díky napáječům je možné v simulačním prostředí simulovat různé toky, a to i v případě, že by nebyl použit tento model elektrárny.

Detailní schéma tohoto modelu je zobrazeno v Příloze A.4.

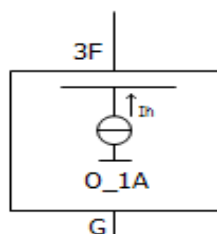
## 6.8 Ekvivalentní model zdroje harmonických proudů

Jedním z rušivých jevů, který bude zároveň sledován z hlediska jeho šíření v modelu je harmonické zkreslení napětí (viz kapitola 3.1).

Pro účely vytvoření harmonického zkreslení napětí v síti byl vytvořen ekvivalentní model zdroje harmonických proudů, které nám v modelu způsobí zkreslení napěťové vlny.

Model je tvořen pěti proudovými zdroji pro každou fázi. Každý z těchto zdrojů může být modifikován z hlediska frekvence a velikosti proudu. Počáteční úhel proudu bude vždy uvažován  $0^\circ$ , tudíž je tato hodnota fixně zadána v jednotlivých proudových zdrojích a nelze ji přes zadávací menu měnit. Uživatel tak může sledovat šíření jednotlivých frekvenčních složek proudu po pěti řádech dle jeho volby. V tomto modelu je uvažováno symetrické rušení, tudíž uživateli tohoto modelu stačí sledovat šíření rušení pouze v jedné fázi. V ostatních fázích pak uživatel může očekávat obdobné hodnoty rušení.

Vzhled tohoto modelu je zobrazen na Obrázku 6.13. Detailní schéma tohoto ekvivalentu je zobrazeno v Příloze A.5.



Obrázek 6.13: Ekvivalentní agregovaný model zdroje harmonických proudů



## 6.9 Model měřící aparatury

Měření jednotlivých rušivých jevů záleží na jeho fyzikálním opodstatnění. Z hlediska této práce bylo nutné vytvořit model měřící aparatury, které dokáže měřit napětí a proudy v širším frekvenčním spektru, protože se bude na testovacím modelu sítě zkoumat šíření harmonického zkreslení napětí.

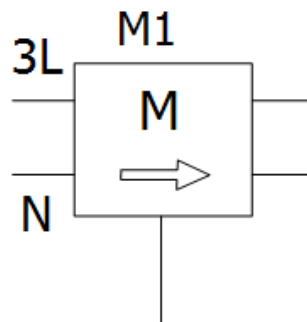
Pro tyto účely se používá diskrétní Fourierova transformace (viz kapitola 3). PSCAD má ve své knihovně přímo určený blok, který funguje na bázi této matematické operace. Z tohoto bloku pak lze zvlášť odlišit velikost jednotlivých harmonických složek a také jejich fáze.

Vzhledem k tomu, že se jedná o systém symetrický, tak je tento model měřící aparatury koncipován tak, že se měří pouze frekvenční složky napětí v první fázi. Uživatel může v ostatních fázích očekávat obdobné hodnoty rušení (viz kapitola 6.8).

Měření frekvenčního spektra proudu není v tomto modelu realizováno, a to z důvodu toho, že veškeré odběry se modelovaly pro systémovou frekvenci 50 Hz. Injektované harmonické proudy pak uživatel zadává on sám, tudíž není nutné je znovu měřit.

Co se týče zadávacího menu tohoto modelu tak zde uživatel může měnit pouze popisek měřícího ústrojí. Může si tak do testované sítě vložit více bloků pro měření a zkoumat například konkrétní cestu šíření harmonického zkreslení.

Vzhled tohoto modelu je zobrazen na Obrázku 6.14. Detailní schéma tohoto modelu je uvedeno v Příloze A.6.



Obrázek 6.14: Model měřící aparatury pro měření harmonického zkreslení napětí

Z obrázku je patrné, že vývody 3F a N slouží k propojení měřícího ústrojí se sítí. Neoznačený vývod je použit jako vývod z vnitřní vrstvy modelu odkud si uživatel přejímá měřené veličiny a může s nimi dále pracovat ve výchozí vrstvě modelu PS.

## 7. SESTAVENÍ A ROZBĚH MODELU PS

### 7.1 Sestavení modelu

Po vytvoření všech ekvivalentních modelů, byl sestaven kompletní model PS, na kterém se bude zkoumat přenos daného rušivého jevu.

Model byl poskládán z ekvivalentních modelů popsaných v kapitole 6. Detailní schéma tohoto modelu PS definuje Příloha B. Výkonové toky, ze kterých byly počítány odběry definuje Příloha C. Je nutné si uvědomit, že tyto výkonové toky poskytnuté firmou ČEPS sloužily jako reference. Parametrizaci odběrů definuje Příloha E. Parametrizaci síťových napáječů definuje Příloha G.

### 7.2 Rozběh modelu

Při parametrizaci modelu, který je navrhnout dle poskytnutých dat, nebyly brány v potaz veškeré činné a jalové ztráty na vedení a na transformátorech. Je tedy zřejmé, že výsledné výkonové toky (Příloha D) nejsou stejné jako ty, které poskytla firma ČEPS. Ačkoli se ve výsledku jedná o zcela odlišný stav sítě, tak ve svém aktuálním ustáleném stavu výsledky stále odpovídají realistickému provoznímu stavu.

Jelikož se jedná o virtuální síť postavenou z reálných dat, tak se i její rozběh odvíjel jako při propojování soustavy v praxi. Při rozběhu simulace byly v modelu postupně připojovány jednotlivé výrobní a spotřební větve. Zpravidla bylo postupováno tak, že se zároveň připojila větev s dodávkou výkonu a větev se spotřebou výkonu. Na základě měření na bilančním uzlu pak byly upravovány požadované hodnoty dodávaného výkonu. Snahou bylo, aby se výkon dodávaný nebo spotřebovávaný bilančním uzlem blížil co nejvíce k nulové hodnotě.

V další fázi pak byla připojena další větev a bylo sledováno, jak se změní chování virtuálního modelu. Takto se postupovalo až do připojení poslední větve. Ve finální fázi bylo nutné ověřit, zda není přetěžován některý z transformátorů nebo vedení. Zároveň také bylo nutné sledovat, zda je ve všech částech sítě hodnota napětí v dovolených mezích, které stanovuje ČSN 50160 ed. 4 [1]. Pokud bylo detekováno, že v některé z částí sítě je velikost napětí mimo dovolené meze, byla tato hodnota upravena pomocí odbočky na přilehlém transformátoru.

Po ověření všech těchto kritérií bylo také nutné sledovat, zda je systém opravdu ve stabilním ustáleném stavu, tj. bez kmitání. Jedná se o systém tvořený z nelineárních prvků a důsledkem toho může být, že některý z regulátorů nemusí nalézt stabilní stav. V modelu jsou tři větve, které v průběhu času simulace oscilují z hlediska hodnot výkonů. Tato oscilace je však v řádu tisíciny MW nebo MVAr a osciluje kolem jedné střední hodnoty, takže lze tento systém považovat za systém v ustáleném stavu.

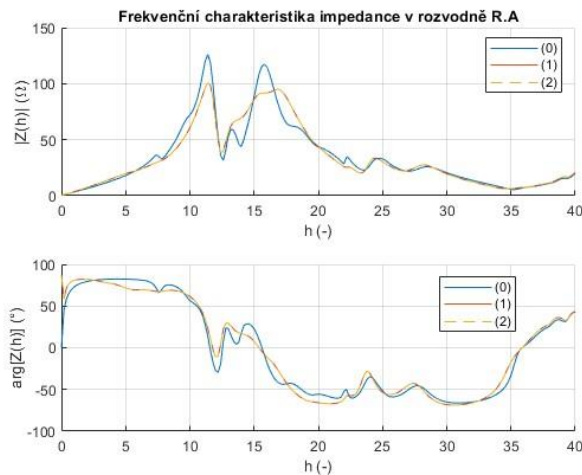
### 7.3 Frekvenční charakteristiky sítě

Další fází postupu je určení frekvenčních charakteristik v jednotlivých uzlech modelované sítě.

Tyto charakteristiky jsou důležité pro stanovování velikostí proudů na určitém řádu frekvence, tak aby tento injektovaný proud způsobil požadovaný úbytek napětí a projevil se v dalších částech sítě. Zároveň tyto charakteristiky udávají nevyváženost impedance sítě. Nevyváženost impedance sítě vyjadřuje poměr netočivé složky (0) impedance ku sousledné složce (1). V rámci této práce jsou zobrazeny frekvenční charakteristiky (Příloha F) impedance všech uzlů na hladině 400 kV. Součástí této přílohy jsou také vybrané uzly na hladině 110 kV a 22 kV.

Na Obrázku 7.1 je zobrazena frekvenční charakteristika impedance v rozvodně R\_A. Z obrázku je patrná nevyváženost tohoto uzlu, představovaná nulovou složkou impedance a jejím rozdílem vůči sousledné složce. Navržený systém je pro tuto práci uvažován jako souměrný, a proto je zpětná složka impedance stejná jako složka sousledná.

Z hlediska frekvenční závislosti velikosti impedance jsou jednotlivé nárůsty impedance způsobeny vlivem přítomných paralelních rezonančních obvodů, které jsou tlumeny činnými zátěžemi a ztrátami v síti. Pokud velikost impedance poklesne, tak se jedná o sériovou rezonanci obvodu. Tyto rezonanční body pak udávají, při jaké frekvenci může z pohledu konkrétního uzlu dojít k paralelní či sériové rezonanci, s dopadem na šíření frekvenčních složek proudu a změnu frekvenčních složek napětí. Rezonanční body mají ve svém vrcholu zaoblený tvar. Je to způsobeno tím, že jsou odběry modelované pomocí pasivních prvků, což reprezentuje realistickou kvalitu jednotlivých rezonančních obvodů. Rezistence daného odběru pak tlumí rezonanci daného uzlu. Pokud by v odběru rezistence nebyla, je dost pravděpodobné, že by rezonanční body byly více ostrého tvaru.



Obrázek 7.1: Frekvenční charakteristika impedance v rozvodně R\_A

Porovná-li se tato charakteristika například s charakteristikou v rozvodně R\_B (Příloha F.1), jsou zde vidět evidentně odlišné průběhy. Každý uzel je ve své podstatě originální, a to z důvodu toho, že jsou do uzlu připojeny prvky s odlišnými parametry, přes odlišnou část sítě.

Pro rušivé jevy, které se projevují na systémové frekvenci je rovněž důležité znát hodnoty impedance na systémové frekvenci. Hodnoty impedance na systémové frekvenci jsou definuje Příloha H.

## 8. ŠÍŘENÍ HARMONICKÉHO ZKRESLENÍ NAPĚTÍ

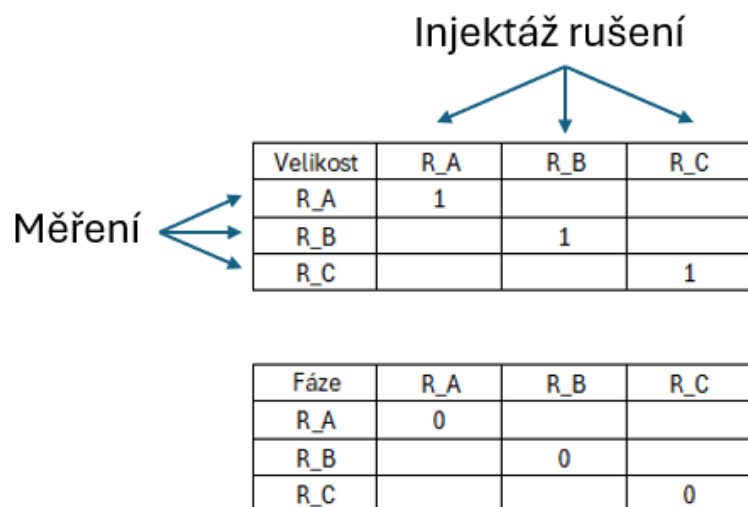
Pro zkoumání šíření rušivých jevů v modelované PS byl vybrán jev harmonické zkreslení (viz kapitola 3.1).

Pro injektáž harmonických proudů, které na impedanci způsobí úbytek napětí na daném řádu frekvence, byl použit vytvořený model popsáný v kapitole 6.8. Pro měření harmonického zkreslení byla použita vytvořená měřicí aparatura popsaná v kapitole 6.9.

### 8.1 Metodika

Z frekvenčních charakteristik impedance daného uzlu, do kterého se bude připojovat zdroj harmonických proudů, se stanoví velikost proudu, která nám způsobí úbytek napětí na dané harmonické frekvenci o velikost 1 % základní harmonické napětí v místě připojení. Z hlediska fází jednotlivých harmonických bude uvažováno, že veškeré harmonické proudy budou mít počáteční úhel  $0^\circ$ .

Aby bylo možné efektivně sledovat, jak se z vybraného uzlu projeví tento rušivý jev dále v síti, bude použita matice, která je zobrazena na Obrázku 8.1.



Obrázek 8.1: Matice popisující šíření harmonického zkreslení

V principu se jedná o to, že budou vyhodnocovány poměry velikostí napětí na určitém řádu frekvence. Velikost napětí bude vyhodnocována jako poměrná hodnota napětí v měřeném uzlu ku poměrné hodnotě napětí v referenčním uzlu, tedy v uzlu, kde je vložen zdroj rušení. Tento přenosový koeficient mezi referenčním uzlem  $i$  a měřeným uzlem  $j$  lze vyjádřit vztahem:

$$T_{hxm,i-j} = \frac{\frac{U_{hx,j}}{U_{h1,j}}}{\frac{U_{hx,i}}{U_{h1,i}}}, \quad (8.1)$$

kde  $T_{hxm,i-j}$  je přenosový koeficient harmonického napětí z uzlu  $i$  do uzlu  $j$ ,  $U_{hx}$  je efektivní fázová velikost napětí daného harmonické složky,  $x$  vyjadřuje číselnou hodnotu řádu harmonické  $h$  a  $U_{h1}$  je efektivní fázová velikost napětí pro frekvenci 50 Hz.

Úhly budou vyhodnocovány jako absolutní odchylka mezi měřeným úhlem v místě  $j$  dané harmonické  $\delta_{hx,j}$  a úhlem dané harmonické v referenčním uzlu  $i$   $\delta_{hx,i}$ . Přenosový koeficient fáze lze vyjádřit vztahem:

$$T_{hxp,i-j} = \delta_{hx,j} - \delta_{hx,i}, \quad (8.2)$$

Matice je koncipována s ohledem na konkrétní princip, kde uzly vodorovné (viz Obrázek 8.1) jsou vyhrazeny jako zdroje rušení. Tyto uzly tak slouží jako body, do nichž je vložen příslušný rušivý zdroj. Naproti tomu uzly svislé představují místa měření, kde se očekává projevení rušení.

Pokud je tedy zvolen jako zdroj rušení uzel rozvodny R\_A, bude relativní hodnota napětí vůči referenčnímu uzlu R\_A vždy rovna 1. Z tohoto důvodu jsou na hlavní diagonále matice hodnoty 1, zatímco z hlediska úhlového vyhodnocení jsou v této diagonále hodnoty 0. To je způsobeno tím, že je sledována vzájemná odchylka mezi úhlem v měřeném uzlu a referenčním uzlu.

Při vložení zdroje do uzlu R\_A je podrobně zkoumáno, jak se projeví rušení v ostatních uzlech uvedených v matici. Nicméně, umístění zdroje do jiného uzlu než R\_A nezaručuje nutně analogické projevení rušení v ostatních uzlech, jak je patrné ze struktury matice.

Pro lepší vizuální identifikaci změn ve velikosti napětí a úhlu vůči referenci byla zavedena metoda barevného zobrazení na základě vypočtených hodnot v matici. Základní hodnoty, tj. 1 nebo 0, jsou reprezentovány bílou barvou.

Pro vytvoření matice obsahující všechny uzly modelované sítě bylo nezbytné přiřadit jednotlivým uzlům vhodná označení. Tato označení jsou odvozena z identifikace jednotlivých rozvodných bodů v modelu sítě. Současně bylo nezbytné tyto uzly označit tak, aby bylo jasně patrné, zda se jedná o uzly odpovídající napět'ovým hladinám 400 kV, 220 kV, 110 kV nebo 22 kV. Pro tyto účely jsou v označeních uzlů využívány popisky jako 400, 220 a podobně.

V detailním schématu, kde je uvedeno, že konkrétní rozvodna zahrnuje ekvivalentní model sítí 400, 110 a 22 kV (viz Obrázek 6.10), nebo kde je zobrazen transformátor společně s ekvivalentem 110 a 22 kV (viz Obrázek 6.11), jsou uzly každého ekvivalentního systému označeny odpovídající rozvodnou a příslušnou napět'ovou hladinou. Například v detailním schématu modelu (Příloha B) je uvedeno, že rozvodna R3\_A zahrnuje ekvivalentní model sítí 400, 110 a 22 kV. Označení jednotlivých uzlů v

tomto ekvivalentu bude následovat označení, jako například R3A400, R3A110 a R3A22. Tento postup označení uzlů je následně aplikován i na ostatní ekvivalenty.

V případě existence transformátoru v některé z hlavních rozveden (R\_A, R\_B, R\_C) jsou uzly na úrovni 400 kV označeny jako A400. V souladu s provedenou transformací jsou pak uzly za transformátorem identifikovány, například jako A220. V situaci, kdy dochází k transformaci na 110 kV, je uzel označen jako A110. V rámci této práce byly důkladně mapovány všechny uzly na úrovni 400 kV a vybrané uzly na úrovni 110 kV. To znamená, že bylo nezbytné do všech těchto uzlů vložit zdroje harmonických proudů a současně výsledné rušení měřit ve všech vybraných uzlech.

Pro získání výsledných dat, která jsou následně zaznamenávána do sledovací matice, bylo nejprve nezbytné vypočítat velikost proudu, která způsobí úbytek napětí o 1 % v daném uzlu, na základě hodnoty impedance pro konkrétní frekvenci. Pro tuto analýzu jsou vyhodnocovány frekvenční složky řádu 3, 5, 11, 17 a 21.

Před spuštěním simulace byly nastaveny příslušné hodnoty proudů na vybraných frekvenčních řádech v příslušném uzlu, do kterého se injektuje rušení. Poté byla spuštěna simulace.

Simulace je nezbytné provozovat po dobu alespoň 30 sekund simulačního času. Pro tuto práci byla délka simulace stanovena na 45 sekund. Tento časový interval je zapotřebí k zajištění, aby se simulační model dostal do stabilního stavu. Pokud by byla délka simulace například jen dvě sekundy, existuje vysoká pravděpodobnost, že regulátory v některém z ekvivalentních modelů nebudou ustálené. V důsledku toho by mohlo docházet k oscilacím a fluktuacím určitých hodnot výkonů a napětí.

Po dokončení simulace byly z grafů odečteny efektivní fázové hodnoty napětí pro jednotlivé harmonické složky, spolu s jejich fázovými úhly. Tyto naměřené hodnoty byly následně zaznamenány do tabulky, avšak tato tabulka není součástí této práce. Namísto toho jsou zde prezentovány výsledky, které byly z těchto tabulek získány pomocí softwaru MATLAB a následně importovány do výsledných matic pro další analýzu.

Výsledné matice (Příloha I) obsahují informace o šíření jednotlivých vybraných harmonických složek a jejich fázových posunů. Pro provedení této analýzy bylo nutné vytvořit celkem 10 sledovacích matic, z nichž každá poskytuje data o konkrétních harmonických složkách a jejich fázových úhlech z hlediska přenosu velikosti a fází.

## 8.2 Analýza výsledků ze simulace

Výsledky prezentované v tabulkách reflektují proporcionální vyjádření, jaká velikost napětí s daným úhlem harmonického charakteru se manifestuje v měřeném uzlu.

Z hlediska frekvenční charakteristiky konkrétního uzlu je předpokládáno, že určitá amplituda proudu vyvolá na daném frekvenčním řádu úbytek napětí. Nicméně způsob, jakým se tento úbytek napětí projeví v ostatních částech sítě, není z frekvenční analýzy daného uzlu přímo patrný. K tomuto účelu slouží uvedené matice (Příloha I). Výsledná matice pro uzly napěťové hladiny 400 kV z hlediska šíření velikosti napětí 3. harmonické složky je zobrazena na Obrázku 8.2.

$T_{h3m, ij} (-)$	A400	B400	C400	ELNA1	R2A400	R3A400	R4A400	ELNA2	R5A400	R6A400	R1B400	R2B400	R1C400	R2C400
A400	1.00	0.05	0.08	0.74	0.16	0.06	0.74	0.56	0.09	0.53	0.02	0.01	0.02	0.05
B400	0.18	1.00	0.23	0.14	0.03	0.01	0.14	0.11	0.02	0.10	0.27	0.16	0.05	0.13
C400	0.14	0.11	1.00	0.11	0.02	0.01	0.11	0.08	0.01	0.08	0.03	0.02	0.20	0.56
ELNA1	0.93	0.05	0.08	1.00	0.15	0.06	0.73	0.55	0.09	0.52	0.01	0.01	0.02	0.05
R2A400	0.79	0.04	0.07	0.61	1.00	0.05	0.61	0.46	0.08	0.43	0.01	0.01	0.02	0.04
R3A400	0.39	0.02	0.04	0.31	0.06	1.00	0.30	0.23	0.04	0.21	0.01	0.00	0.01	0.02
R4A400	0.64	0.03	0.05	0.50	0.10	0.04	1.00	0.37	0.06	0.35	0.01	0.01	0.01	0.03
ELNA2	0.93	0.05	0.08	0.72	0.15	0.06	0.72	1.00	0.09	0.51	0.01	0.01	0.02	0.05
R5A400	0.39	0.02	0.03	0.30	0.06	0.03	0.30	0.22	1.00	0.21	0.01	0.00	0.01	0.02
R6A400	0.88	0.05	0.07	0.68	0.14	0.05	0.68	0.51	0.08	1.00	0.01	0.01	0.02	0.04
R1B400	0.13	0.64	0.16	0.10	0.02	0.01	0.10	0.07	0.01	0.07	1.00	0.12	0.04	0.10
R2B400	0.09	0.53	0.11	0.07	0.02	0.01	0.07	0.06	0.01	0.05	0.14	1.00	0.02	0.06
R1C400	0.08	0.07	0.51	0.06	0.01	0.01	0.06	0.05	0.01	0.04	0.02	0.01	1.00	0.29
R2C400	0.11	0.09	0.74	0.08	0.02	0.01	0.08	0.06	0.01	0.06	0.02	0.01	0.15	1.00

Obrázek 8.2: Matice popisující šíření velikosti napětí 3. harmonické složky

Z obrázku je patrné, že šíření 3. harmonické složky napětí se ve všech uzlech projeví se značným tlumením. Harmonická složka 3. řádu přispívá do netočivé složky napětí (0). Z výsledků je patrné, že testovaná síť tlumí ve veškerých uzlech signály na tomto frekvenčním řádu.

$T_{h5m, ij} (-)$	A400	B400	C400	ELNA1	R2A400	R3A400	R4A400	ELNA2	R5A400	R6A400	R1B400	R2B400	R1C400	R2C400
A400	1.00	0.06	0.10	0.81	0.17	0.07	0.80	0.63	0.11	0.57	0.02	0.01	0.03	0.06
B400	0.27	1.00	0.31	0.23	0.05	0.02	0.22	0.17	0.03	0.16	0.34	0.21	0.08	0.19
C400	0.18	0.13	1.00	0.15	0.03	0.01	0.14	0.11	0.02	0.10	0.04	0.03	0.24	0.62
ELNA1	0.96	0.06	0.10	1.00	0.17	0.07	0.79	0.62	0.11	0.56	0.02	0.01	0.03	0.06
R2A400	0.81	0.05	0.08	0.69	1.00	0.06	0.67	0.53	0.09	0.48	0.02	0.01	0.02	0.05
R3A400	0.46	0.03	0.05	0.38	0.08	1.00	0.37	0.29	0.05	0.26	0.01	0.01	0.01	0.03
R4A400	0.67	0.04	0.07	0.56	0.12	0.05	1.00	0.43	0.07	0.39	0.01	0.01	0.02	0.04
ELNA2	0.95	0.06	0.09	0.80	0.17	0.07	0.78	1.00	0.11	0.55	0.02	0.01	0.03	0.06
R5A400	0.42	0.03	0.03	0.36	0.07	0.03	0.35	0.28	1.00	0.26	0.01	0.01	0.02	0.02
R6A400	0.91	0.06	0.09	0.76	0.16	0.06	0.75	0.59	0.10	1.00	0.02	0.01	0.02	0.05
R1B400	0.22	0.80	0.25	0.18	0.04	0.02	0.18	0.14	0.02	0.13	1.00	0.17	0.05	0.15
R2B400	0.18	0.65	0.20	0.15	0.03	0.01	0.14	0.11	0.02	0.10	0.22	1.00	0.06	0.12
R1C400	0.11	0.08	0.61	0.09	0.02	0.01	0.09	0.07	0.01	0.07	0.03	0.02	1.00	0.38
R2C400	0.13	0.10	0.78	0.11	0.02	0.01	0.11	0.08	0.01	0.07	0.03	0.02	0.17	1.00

Obrázek 8.3: Matice popisující šíření velikosti napětí 5. harmonické složky

Pro šíření velikosti napětí 5. harmonické složky (Obrázek 8.3), která přispívá do zpětné složky napětí (2) lze stanovit obdobnou hypotézu jako pro šíření napětí 3. harmonické. Testovaná síť opět tlumí ve všech uzlech napěťové signály 5. harmonické, které se šíří z daného uzlu dále do sítě.



$T_{h11m, ij} (-)$	A400	B400	C400	ELNA1	R2A400	R3A400	R4A400	ELNA2	R5A400	R6A400	R1B400	R2B400	R1C400	R2C400
A400	1.00	0.68	0.29	0.95	0.43	0.25	1.17	0.86	0.32	0.82	0.29	0.12	0.21	0.40
B400	0.34	1.00	0.24	0.33	0.15	0.09	0.40	0.30	0.11	0.28	0.41	0.17	0.17	0.33
C400	0.19	0.31	1.00	0.18	0.08	0.05	0.22	0.16	0.06	0.16	0.13	0.05	0.71	1.37
ELNA1	0.98	0.67	0.28	1.00	0.42	0.25	1.16	0.86	0.32	0.82	0.28	0.12	0.20	0.40
R2A400	0.92	0.63	0.27	0.88	1.00	0.24	1.09	0.80	0.30	0.77	0.27	0.11	0.19	0.37
R3A400	1.36	0.93	0.39	1.30	0.59	1.00	1.61	1.18	0.44	1.13	0.39	0.16	0.28	0.55
R4A400	0.69	0.48	0.20	0.67	0.30	0.18	1.00	0.61	0.23	0.58	0.20	0.08	0.15	0.28
ELNA2	0.99	0.68	0.29	0.95	0.43	0.26	1.18	1.00	0.33	0.83	0.29	0.12	0.21	0.40
R5A400	0.55	0.38	0.16	0.53	0.24	0.14	0.65	0.48	1.00	0.46	0.16	0.07	0.12	0.22
R6A400	1.01	0.69	0.29	0.96	0.43	0.26	1.19	0.87	0.33	1.00	0.29	0.12	0.21	0.40
R1B400	1.74	4.95	1.20	1.67	0.75	0.45	2.06	1.52	0.57	1.45	1.00	0.85	0.87	1.68
R2B400	0.73	2.07	0.50	0.70	0.31	0.19	0.86	0.64	0.24	0.61	0.87	1.00	0.36	0.70
R1C400	0.55	0.91	2.88	0.53	0.24	0.14	0.66	0.48	0.18	0.46	0.38	0.16	1.00	4.02
R2C400	0.17	0.28	0.90	0.16	0.07	0.04	0.20	0.15	0.06	0.14	0.12	0.05	0.65	1.00

Obrázek 8.4: Matice popisující šíření velikosti napětí 11. harmonické složky

V případě šíření 11. harmonické složky napětí, lze z Obrázku 8.4 pozorovat, že ve většině uzlů se tento signál opět tlumí. Jsou zde ale vidět i případy nárůstu velikosti tohoto signálu až několikanásobně. Je možné, že použitou metodikou analýzy šíření rušení byly objeveny kritické uzly testované sítě, ve kterých se tato harmonická složka zesiluje. Pro stanovení důsledku, proč tomu tak nastalo, bude nutné analyzovat kompletní cestu mezi zdrojem rušení a měřeným uzlem.

$T_{h17m, ij} (-)$	A400	B400	C400	ELNA1	R2A400	R3A400	R4A400	ELNA2	R5A400	R6A400	R1B400	R2B400	R1C400	R2C400
A400	1.00	0.52	0.66	1.03	0.32	0.24	1.80	1.15	0.23	1.17	0.16	0.19	0.62	0.33
B400	0.85	1.00	1.46	0.88	0.27	0.21	1.54	0.99	0.19	1.00	0.31	0.37	1.37	0.72
C400	0.69	0.94	1.00	0.72	0.22	0.17	1.26	0.81	0.16	0.82	0.30	0.35	0.92	0.49
ELNA1	0.99	0.52	0.66	1.00	0.32	0.24	1.80	1.15	0.23	1.17	0.16	0.19	0.62	0.33
R2A400	1.17	0.61	0.77	1.20	1.00	0.28	2.11	1.35	0.27	1.37	0.19	0.23	0.73	0.38
R3A400	1.34	0.70	0.89	1.38	0.43	1.00	2.42	1.55	0.31	1.58	0.22	0.26	0.83	0.44
R4A400	0.74	0.39	0.49	0.76	0.24	0.18	1.00	0.85	0.17	0.87	0.12	0.14	0.46	0.24
ELNA2	1.06	0.56	0.70	1.09	0.34	0.26	1.92	1.00	0.24	1.25	0.18	0.21	0.66	0.35
R5A400	1.12	0.59	0.75	1.16	0.36	0.27	2.03	1.30	1.00	1.32	0.19	0.22	0.70	0.37
R6A400	1.21	0.64	0.80	1.25	0.39	0.29	2.19	1.40	0.28	1.00	0.20	0.24	0.75	0.40
R1B400	0.67	0.77	1.14	0.69	0.21	0.16	1.21	0.77	0.15	0.79	1.00	0.29	1.07	0.57
R2B400	1.29	1.49	2.20	1.33	0.41	0.31	2.33	1.49	0.29	1.51	0.47	1.00	2.06	1.09
R1C400	0.79	1.07	1.11	0.82	0.25	0.19	1.43	0.92	0.18	0.93	0.34	0.40	1.00	0.55
R2C400	0.94	1.28	1.32	0.98	0.30	0.23	1.71	1.09	0.22	1.11	0.40	0.47	1.25	1.00

Obrázek 8.5: Matice popisující šíření velikosti napětí 17. harmonické složky

Signál řádu 17. harmonické, který přispívá do zpětné složky (2), jsou patrné z Obrázku 8.5 jak zesílení tohoto signálu, tak i útlumy. Opět pro stanovení konkrétního důsledku je nutné analyzovat kompletní cestu v testované síti. Zde je patrné například to, že pokud byl v uzlu R4A400 vložen zdroj rušení, jeho výsledné projevení v ostatních uzlech bylo až několikanásobné.

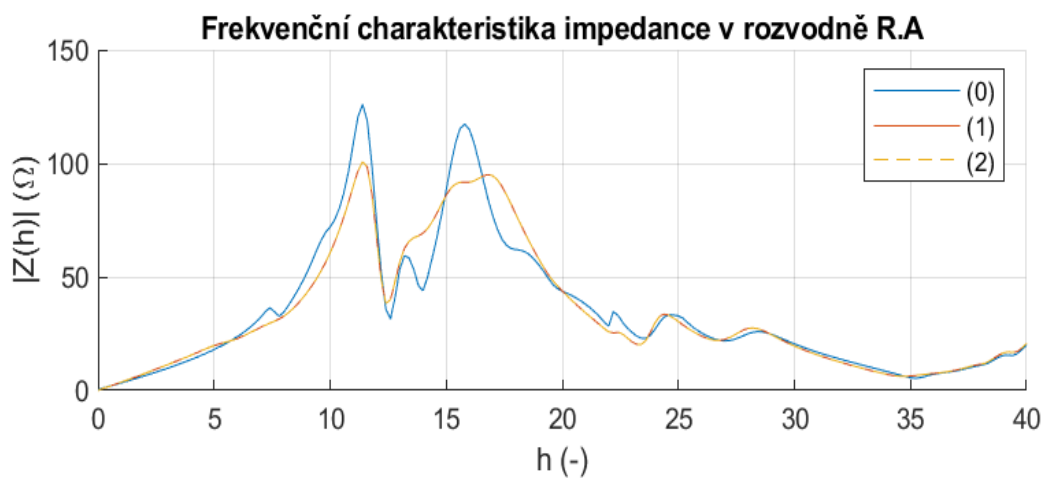
$T_{h21m, ij} (-)$	A400	B400	C400	ELNA1	R2A400	R3A400	R4A400	ELNA2	R5A400	R6A400	R1B400	R2B400	R1C400	R2C400
A400	1.00	0.09	0.33	1.15	0.08	0.81	0.85	0.98	0.09	0.77	0.09	0.07	0.29	0.66
B400	0.80	1.00	0.85	0.94	0.07	0.66	0.70	0.80	0.07	0.63	0.99	0.84	0.76	1.70
C400	0.64	0.18	1.00	0.74	0.05	0.52	0.55	0.63	0.06	0.50	0.18	0.15	0.87	1.94
ELNA1	0.99	0.09	0.33	1.00	0.08	0.81	0.86	0.99	0.09	0.77	0.09	0.07	0.30	0.66
R2A400	1.51	0.13	0.50	1.76	1.00	1.24	1.31	1.50	0.14	1.18	0.13	0.11	0.45	1.00
R3A400	1.04	0.09	0.35	1.21	0.09	1.00	0.90	1.03	0.10	0.81	0.09	0.08	0.31	0.69
R4A400	0.77	0.07	0.26	0.90	0.07	0.64	1.00	0.77	0.07	0.60	0.07	0.06	0.23	0.51
ELNA2	1.11	0.10	0.37	1.30	0.10	0.92	0.97	1.00	0.10	0.87	0.10	0.08	0.33	0.74
R5A400	3.59	0.32	1.19	4.21	0.31	2.96	3.13	3.59	1.00	2.81	0.32	0.27	1.08	2.40
R6A400	1.47	0.13	0.49	1.72	0.13	1.21	1.28	1.46	0.14	1.00	0.13	0.11	0.44	0.98
R1B400	0.42	0.52	0.15	0.49	0.04	0.35	0.37	0.42	0.04	0.33	1.00	0.44	0.40	0.89
R2B400	0.96	1.18	1.01	1.12	0.08	0.78	0.83	0.95	0.09	0.75	1.18	1.00	0.91	2.02
R1C400	0.67	0.19	1.02	0.79	0.06	0.55	0.58	0.67	0.06	0.52	0.19	0.16	1.00	2.05
R2C400	1.40	0.39	2.14	1.64	0.12	1.15	1.22	1.40	0.13	1.10	0.39	0.33	1.92	1.00

Obrázek 8.6: Matice popisující šíření velikosti napětí 21. harmonické složky

Obdobné vyjádření platí i pro šíření signálu 21. harmonické. Signály na tomto řádu se uzavírají v netočivé složce (0). Z Obrázku 8.6 jsou opět patrné, díky použité metodice, kritické body. Pokud je například vložen zdroj do uzlu R6A400, tak ve většině zbylých uzlů se rušení projevilo se značným útlumem. Pro uzly R2A400, R5A400 a R2C400 se naopak rušení projevilo ve větší míře.

V modelu nebyly reflektovány žádné záměrné prostředky pro omezení harmonických. Jedná se o filtry jakéhokoli typu, které mohou ovlivnit výsledné impedanční charakteristiky a šíření harmonických v/přes přenosovou soustavu. Pro úplnost by bylo potřebné zmapovat a zahrnout ať už pasivní nebo aktivní filtry připojené do přenosové soustavy (pokud by nějaké existovali) a všechny významné filtry připojené do sítě 110 kV na úrovni jednotlivých ekvivalentních agregovaných modelů okrajových sítí.

Pokud je harmonický zdroj lokalizován v uzlu R\_A (A400), na základě frekvenční charakteristiky (viz Obrázek 8.7) lze pozorovat, že impedance na 11. řádu vykazuje blízkost k bodu paralelní rezonance. Paralelní rezonance naznačuje, že proud s touto specifickou frekvencí, vyskytující se v dané části sítě, povede k vyšší úrovni zkreslení napětí na této frekvenci.



Obrázek 8.7: Frekvenční spektrum impedance v uzlu R\_A

Tabulka 8.1 Šíření napětí 11. harmonické z uzlu A400

Uzel	$T_{\text{hxm}, i-j} (-)$	$T_{\text{hxp}, i-j} (^\circ)$
A400	1.00	0.0
B400	0.34	-122.0
C400	0.19	-149.9
ELNA1	0.98	0.2
R2A400	0.92	0.1
R3A400	1.36	-21.1
R4A400	0.69	1.3
ELNA2	0.99	-0.3
R5A400	0.55	-1.7
R6A400	1.01	-1.9
R1B400	1.74	-166.2
R2B400	0.73	71.8
R1C400	0.55	-175.5
R2C400	0.17	-158.1

Z výsledků matice je patrné, že předpoklad paralelní rezonance, tedy zesílení signálu, se potvrzuje v uzlech R3A400 a R1B400. V ostatních uzlech naopak dochází k útlumu zkreslení napětí. Tento jev může být způsoben především strukturou propojení mezi uzlem R\_A a rozvodnami R3A400 a R1B400, která se skládá převážně z příčných admitancí. Naopak cesty vedoucí k uzlům, kde dochází k tlumení signálu, jsou pravděpodobně tvořeny především podélnými impedancemi, jako jsou rezistory a indukčnosti, které mají za následek útlum signálu.

Stejně tak lze systematicky analyzovat výsledky injektáže rušení v ostatních uzlech. Tyto výsledné matice pak umožňují celkové sledování šíření rušivých jevů v rozsáhlé síti.

V případech, kde rušení neprojevovalo žádný významný efekt nebo jeho hodnota je zanedbatelná, existují dva možné vysvětlující scénáře. Za prvé, to může naznačovat, že míra tlumení signálu je natolik vysoká, že signál není v měřeném uzlu vůbec detekovatelný. Nicméně v rámci simulace mohou nastat i situace, kdy je poměrná hodnota harmonického napětí tak malá, že se jedná pouze o matematický šum v simulaci.

Matematický šum ve simulaci se projevuje jako výsledná hodnota poměrné velikosti harmonického napětí vzhledem k signálu na systémové frekvenci. Pokud tato hodnota dosahuje velmi nízkých hodnot, řádově 0,01 %, může to naznačovat, že se harmonický signál projevil velmi malou hodnotou nebo že se jedná pouze o šum, který není měřicími přístroji detekovatelný. V takovém případě mohou i úhly fluktuovat, neboť velikost daného harmonického signálu se může jevit jako náhodná.

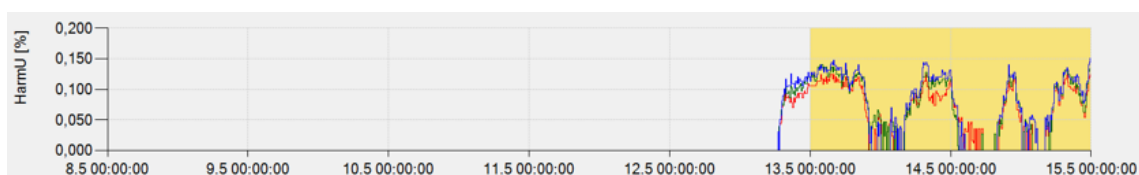
Aby bylo ověřeno, zda se projevilo injektované rušení ve vybraném uzlu, kam byl vložen zdroj, byly vytvořeny histogramy (Příloha J), které vyjadřují, jaký poměrný příspěvek harmonické v referenčním uzlu je. Pokud by výsledná hodnota byla menší než

0,01 %, může to sloužit jako indikace, že byla zvolena příliš malá hodnota harmonického proudu.

Z vytvořených histogramů je patrné, že žádná ze zvolených velikostí harmonických proudů nebyla natolik nízká, že by tato situace nastala. Pro složku frekvenčního řádu 11 a 21 se v uzlu R1B100 projevil poměr harmonické složky 20 % a 43 %. Tento fakt může sloužit jako indikace toho, že byl zvolený příliš velký proud na daném řádu harmonické.

### 8.3 Porovnání výstupů s aktuálním stavem PS

Tato kapitola se zaměřuje na porovnání výsledků ze simulací použitím dané metodiky s měřením z praxe, které poskytla společnost ČEPS. Jako příklad byly vybrány profily agregovaných 10minutových velikostí 11. harmonické napětí změřené ve dvou uzlech PS za stejné období (Obrázek 8.8, Obrázek 8.9).



Obrázek 8.8: Měření napětí 11. harmonické v uzlu A400



Obrázek 8.9: Měření napětí 11. harmonické v uzlu B400

Z poskytnutých dat měření od společností ČEPS jsou patrné změny velikosti napětí 11. harmonické v čase. Tyto průběhy však neposkytují dostatečné množství informace pro porovnání s metodikou použitou při simulacích.

Použitá metodika porovnáva poměrnou změnu napětí dané harmonické mezi uzlem, kde byl vložen zdroj a uzlem, kde bylo rušení měřeno. Jedná se tedy o metodiku, kde se analyzovalo šíření rušení od jednoho zdroje.

Z výše uvedených měření není patrné, zda se jedná pouze o jeden zdroj 11. harmonické nebo o více zdrojů, které se vzájemně ovlivňují, a přispívají tak k výsledné velikosti dané harmonické napětí v daném uzlu. Z poskytnutých dat tedy není možné porovnat, zda použitá metodika odpovídá reálnému šíření harmonických napětí. Zároveň společnost ČEPS měří frekvenční složky napětí pouze z hlediska velikosti napětí nikoli fáze, takže z poskytnutých dat chybí patřičná část informace.

Aby bylo možné výsledky porovnat, bylo by nutné provést stavovou estimaci zdrojů 11. harmonické v celé testované soustavě. Tyto zdroje pak od sebe separovat a poté

aplikovat obdobnou metodiku, která byla použita v rámci simulací. Stavová estimace je uvažována z toho důvodu, že kvalitoměry nejsou v současné době osazeny ve všech uzlech sítě (Příloha B). Dále, stavovou estimací by mohli být estimovány příspěvky z jednoho uzlu do druhého uzlu a tím by se dosáhlo srovnatelnosti s výstupy provedených simulací zaměřených na šíření, tedy přenos harmonických složek napětí v PS.

## ZÁVĚR

Tato diplomová práce se zabývá kvalitou elektrické energie v přenosové soustavě České republiky, elektromagnetickou kompatibilitou a rušivými jevy, včetně metodik měření specifických rušivých jevů. V kapitolách 1 až 4 je popsána aktuální situace v oblasti standardů pro kvalitu elektrické energie, specifikace pro elektromagnetickou kompatibilitu a metodiky pro měření rušivých jevů. Důvodem je, že kvalita elektrické energie je zásadní pro spolehlivé a bezpečné fungování elektrických zařízení a celé přenosové soustavy.

V kapitolách 5 až 8 práce přechází k praktické části, kde je hlavním cílem sestavit model přenosové soustavy a analyzovat jeho chování v reakci na různé rušivé jevy. Modelování zahrnuje detailní simulace chování soustavy, zejména šíření harmonického zkreslení, které může významně ovlivnit provoz sítě a zařízení.

Přenosová matice, které jsou prezentovány jako klíčový výstup této práce (Příloha I), hrají zásadní roli v analýze šíření rušivých jevů v přenosové soustavě. Tyto matice umožňují systematicky sledovat a dokumentovat, jak se harmonické zkreslení napětí a případné další rušivé jevy, jimiž může být nesymetrie, flickr a napěťové události projevují v různých uzlech rozsáhlé sítě. Jedná se o efektivní nástroj pro vizualizaci a kvantifikaci vlivu těchto jevů na celou síť, což umožňuje lepší pochopení dynamiky systému a identifikaci potenciálních rizikových oblastí. Může se jednat i o případnou novou metodiku díky které lze efektivněji odhalit zdroj rušení, čímž by bylo možné i minimalizovat negativní dopady a zvýšit celkovou robustnost a efektivitu přenosové soustavy.

Součástí sledovacích matic, které jsou klíčovým výstupem práce, je výstupem i model vytvořený v prostředí PSCAD (Příloha K), umožňující detailní simulace na části přenosové soustavy. Modely, ze kterých se celkový model PS konstruoval (viz kapitola 6), jsou navrženy tak, aby byly otevřené úpravám uživatele. Díky této flexibilitě mohou uživatelé přizpůsobit modely konkrétním potřebám nebo specifickým scénářům simulace. Tato adaptabilita je zásadní pro rozsáhlé a cílené analýzy.

V kapitole 7 je popsán detailní proces rozběhu simulačního modelu přenosové soustavy v prostředí PSCAD, zahrnující inicializaci s přesně definovanými parametry a komponenty, kontrolu vzájemné komunikace mezi součástmi modelu a ověření správné funkce modelu prostřednictvím testovacích simulací na základních provozních scénářích. Důležitým krokem je validace modelu porovnáním výsledků simulací s očekávanými hodnotami nebo reálnými daty, což potvrzuje, že model adekvátně reprezentuje skutečný systém a je připraven na následné analýzy a výzkum v oblasti šíření rušivých jevů v přenosové soustavě.

Kapitola 8.1 se věnuje scénářům šíření harmonického zkreslení napětí v simulačním modelu přenosové soustavy. Zde jsou zkoumány různé scénáře, jak mohou harmonické

proudy ovlivňovat napět'ové profily v různých částech modelované sítě. Detailní analýza těchto scénářů umožňuje identifikovat kritické body v síti.

Kapitola 8.2 poté přináší analýzu výsledků z přenosových matic získaných ze simulací. Zde je vyhodnocen specifický dopad šíření harmonického zkreslení na kvalitu elektrické energie v dalších uzlech modelu. Na základě zjištěných dat jsou v této kapitole popsány možné příčiny získaných výsledků, které nedopadly dle očekávání.

Tato diplomová práce položila solidní základ pro nové inovativní metodiky analýzy kvality elektrické energie a rušivých jevů v přenosové soustavě. Díky komplexnímu přístupu k modelování a simulaci, který byl v práci využit, je možné tuto platformu dále rozvíjet a využít pro pokročilé studie v oblasti elektroenergetiky. Výsledky mohou být dále použity k alokaci limitů harmonických dle PNE 333430-0.

## LITERATURA

- [1] ČSN EN 50160. Charakteristiky napětí elektrické energie dodávané z veřejných elektrických sítí
- [2] ČSN EN 61000-4-15 ed.2:2011. Elektromagnetická kompatibilita (EMC) - Část 4-15: Zkušební a měřicí technika - Flickmetr - Specifikace funkce a dimenzování
- [3] ČSN EN 61000-4-30. Elektromagnetická kompatibilita (EMC) – Část 4-30: Zkušební a měřicí technika – Metody měření kvality elektrické energie
- [4] ČSN EN 61000-4-7. Elektromagnetická kompatibilita (EMC) – Část 4-7: Zkušební a měřicí technika – Všeobecná směrnice o měření a měřících přístrojích harmonických a meziharmonických pro rozvodné sítě a zařízení připojovaná do nich
- [5] Doc. Ing. Vladimír Blažek, CSc. *Distribuce elektrické energie*. Ing. Petr Skala. Fakulta elektrotechniky a komunikačních technologií, VUT Brno.
- [6] F.Rajský - Nová norma Kvality a její dopad na Přenosovou soustavu ČR; Mezinárodní konference ERU Brno 2022.IBSN 978-
- [7] F.Rajský; M. Šerks – Implementace normy EN 50160 do přenosové soustavy ČR, Mezinárodní konference CIRED, Tábor 2022
- [8] *GLF/AES Katalog*. 2003.
- [9] Johns, A.T. *Voltage Quality in Electrical Power Systems*. The Institution of Engineering and Technology, 2001. ISBN 978-0-85296-975-5.
- [10] *MEGA\_EXPLORER*. 2018. Dostupné také z: <http://e-mega.cz/DL/>.
- [11] *OENERGETICE.cz*. Online. OENERGETICE.cz. 2019. Dostupné z: <https://oenergetice.cz/prenos-elektriny/ceska-prenosova-a-distribucni-soustava-3-dil-vedeni-400-kv>. [cit. 2024-05-01].
- [12] *OENERGETICE.cz*. Online. OENERGETICE.cz. 2019. Dostupné z: <https://oenergetice.cz/prenos-elektriny/ceska-prenosova-a-distribucni-soustava-3-dil-vedeni-ochranna-pasma-vedeni-110-kv-a-220-kv>. [cit. 2024-05-01].
- [13] *Parametry transformátorů*. Online. In: Domovské stránky uživatelů. <https://home.zcu.cz/>. Dostupné z: <https://home.zcu.cz/~hejtman/PEC/Cviceni/Tab-trafa.pdf>. [cit. 2024-04-30].
- [14] PNE 33 3430-0. Výpočetní hodnocení zpětných vlivů odběratelů a zdrojů distribučních a přenosové soustavy
- [15] Pravidla provozování přenosové soustavy: *KODEX PŘENOSOVÉ SOUSTAVY – ČÁST V*. ČEPS, 2023.
- [16] *Uživatelský návod MEg39*. 2023. Dostupné také z: <http://www.e-mega.cz/?pg=meg-39>.
- [17] Zákon č. 458/2000 Sb., *Energetický zákon* ze dne 29. prosince 2000



# SEZNAM SYMBOLŮ A ZKRATEK

## Zkratky:

3F	třífázový systém
ČEPS	Česká energetická přenosová soustava
ČR	Česká republika
ČSN	České technické normy
DS	Distribuční soustava
EE	Elektrická energie
EMC	Elektromagnetická kompatibilita
EMI	Elektromagnetická interference
EN	Evropské normy
ENTSO-E	Evropská síť provozovatelů přenosových soustav elektřiny
ES	Elektrizační soustava
MEgA	Měřicí energetické aparáty
N	připojení středního vodiče
NN	Nízké napětí
PNE	Podniková norma
PS	Přenosová soustava
SW	software
VN	Vysoké napětí
VQ	Voltage Quaility
VUT	Vysoké učení technické v Brně
VVN	Velmi vysoké napětí
ZVN	Zvlášť vysoké napětí

## Symboly:

$\vec{Z}_k$	vektor impedance síťového napáječe	$\Omega$
$\vec{Z}_V$	vektor celkové impedance vedení	$\Omega$
$\vec{Z}$	vektor impedance jednoho $\pi$ -článku	$\Omega$
$B_k$	kapacitní susceptance na jednotku délky	S/km
$c$	napěťový koeficient	-
$G_{R,zvn(i)}$	max. globální příspěvek zdrojů k rušení v uzlu	-
$G_{R,zvn(j)}$	max. globální příspěvek od okolních uzlů k rušení	-
$h$	řád harmonické	-
$I$	efektivní hodnota proudu	A
$i$	i-tý uzel	-
$I$	proud	A
$i(t)$	okamžitá hodnota proudu	A
$I_{dov}$	dovolené zatížení ALFe lana	A

$j$	j-tý uzel	-
$k_U$	činitel nesymetrie napětí	-
$L_{R,zvn}$	plánovací úroveň rušení pro hladinu ZVN	-
$n$	hodnota $P_{st}$ uvnitř 2hodinového intervalu	-
$P_{lt}$	dlouhodobá míra vjemu flikru	-
$P_{odb}$	odebíraný činný výkon	W
$P_{st}$	krátkodobá míra vjemu flikru	-
$Q_{0,95}$	jalový výkon pro hodnotu účinníku 0,95	VA
$Q_{0,98}$	jalový výkon pro hodnotu účinníku 0,98	VA
$R_i$	emise v uzlu $i$	-
$R_j$	emise v uzlu $j$	-
$R_k$	rezistence na jednotku délky	$\Omega/\text{km}$
$R_{nap}$	rezistence ekvivalentního napáječe	$\Omega$
$R_o$	rezistence odběru	$\Omega$
$R_x$	velikost rušení $x$ -tého zdroje přispívajícího do uzlu	-
$S_k(3)$	zkratový výkon	VA
$S_{k,B}(3)$	zkratový výkon v uzlu B	VA
$t$	čas	s
$THD$	harmonické zkreslení	-
$T_{hxm, i-j}$	přenosový koeficient harmonického zkreslení napětí	-
$T_{hxp, i-j}$	přenosový koeficient úhlu napětí mezi uzly $i$ a $j$	-
$T_{R,j-i}$	přenosový koeficient poměru emisí z $j$ do $i$ uzlu	-
$T_{R,zvn (j-i)}$	přenosový koeficient mezi $j$ -tým a $i$ -tým uzlem	-
$t_{ud}$	doba trvání události	s
$U$	napětí	V
$U^{(1)}$	sousledná složka napětí	V
$U^{(2)}$	zpětná složka napětí	V
$U_{1(2)}$	velikost zpětné složky napětí v napájecím bodě	V
$U_{1(2)i}$	velikost zpětné složky napětí $i$ -tého příspěvku	V
$U_{hxm,i}$	efektivní fázová hodnota napětí $x$ -tého řádu uzlu $i$	V
$U_{hxm,j}$	efektivní fázová hodnota napětí $x$ -tého řádu uzlu $j$	V
$U_{L-L}$	efektivní hodnota sdruženého napětí	V
$U_n$	jmenovité napětí	V
$x$	číselná hodnota řádu harmonické $h$	-
$X$	Symbol nahrazující RMS hodnotu napětí či proudu	-
$X_{C,o}$	kapacitní reaktance odběru	$\Omega$
$X_k$	induktivní reaktance na jednotku délky	$\Omega/\text{km}$
$X_{L,nap}$	induktivní reaktance ekvivalentního napáječe	$\Omega$
$X_{L,o}$	induktivní reaktance odběru	$\Omega$
$x_T$	poměrná podélná reaktance transformátoru T	-

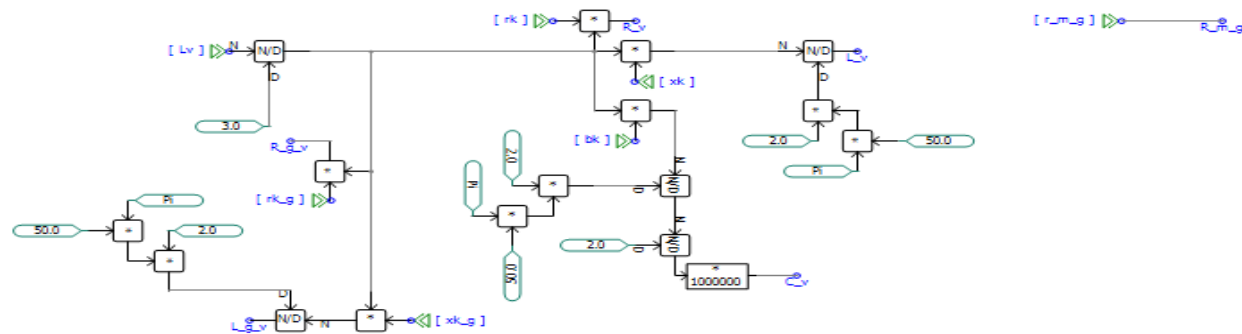
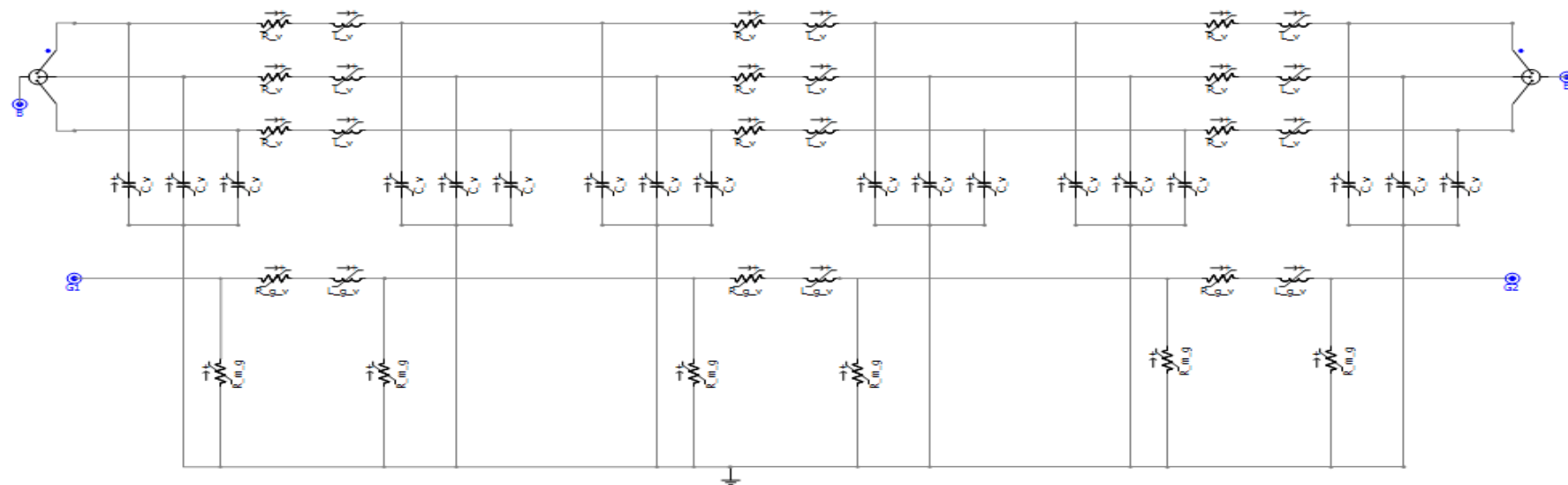
$x_{T1}$	poměrná podélná reaktance transformátoru T1	-
$x_{Tn}$	poměrná podélná reaktance n-tého transformátoru	-
$\bar{Y}$	vektor admitance jednoho $\pi$ -článku	S
$y$	y-tý zdroj rušení přispívající do uzlu	-
$\bar{Y}_V$	vektor celkové admitance vedení	S
$Z_k$	velikost zkratové impedance napáječe	$\Omega$
$\alpha$	sumační koeficient	-
$\alpha_{u(2)}$	sumační koeficient pro zpětnou složku napětí	V
$\delta_{hx,i}$	úhel napětí x-tého řádu v uzlu i	°
$\delta_{hx,j}$	úhel napětí x-tého řádu v uzlu j	°
$\Delta U$	hloubka poklesu napět'ové události	-
$\varphi$	úhel mezi napětím a proudem	°
$\varphi_{0,95}$	úhel odpovídající hodnotě účinníku 0,95	°
$\varphi_{0,98}$	úhel odpovídající hodnotě účinníku 0,98	°
$\omega$	úhlová frekvence	rad/s

## SEZNAM PŘÍLOH

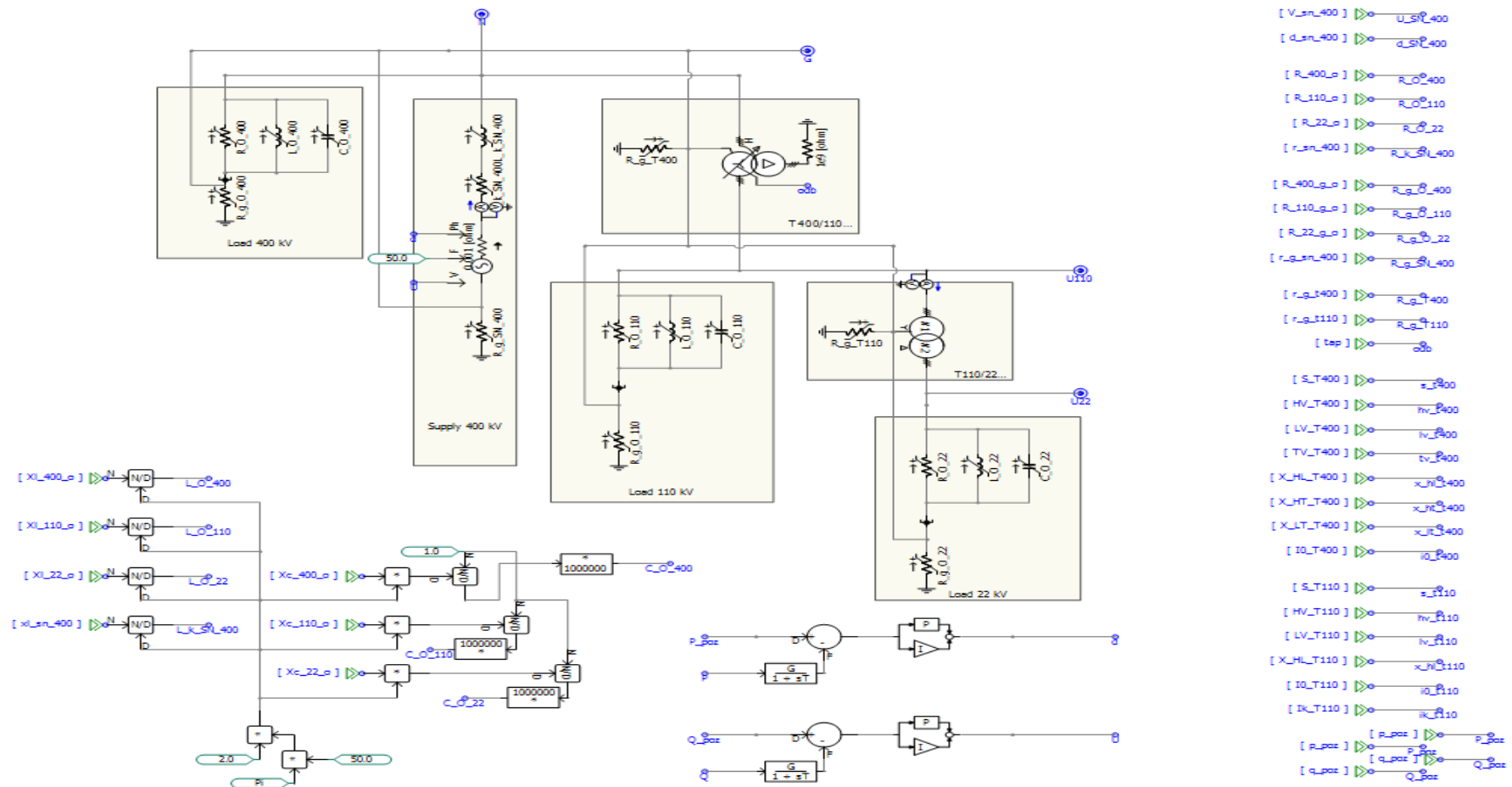
PŘÍLOHA A - EKVIVALENTNÍ MODELY Z PROSTŘEDÍ PSCAD.....	61
PŘÍLOHA B - DETAILNÍ SCHÉMA MODELU PS .....	68
PŘÍLOHA C - REFERENČNÍ VÝKONOVÉ TOKY V MODELU .....	69
PŘÍLOHA D - VÝLEDNÉ VÝKONOVÉ TOKY V MODELU .....	70
PŘÍLOHA E - PARAMETRIZACE ODBĚRŮ (ELEKTRONICKÁ PŘÍLOHA) .....	71
PŘÍLOHA F - FREKVENČNÍ CHARAKTERISTIKY IMPEDANCE UZLŮ MODELU .....	72
PŘÍLOHA G - PARAMETRIZACE NAPÁJEČŮ .....	79
PŘÍLOHA H - IMPEDANCE UZLŮ NA SYSTÉMOVÉ FREKVENCI .....	80
PŘÍLOHA I - MATICE POPISUJÍCÍ ŠÍŘENÍ HARMONICKÉHO ZKRESLENÍ NAPĚTÍ (ELEKTRONICKÁ PŘÍLOHA) .....	81
PŘÍLOHA J - HISTOGRAMY POMĚRNÝCH HODNOT NAPĚTÍ V UZLECH SE ZDROJEM RUŠENÍ .....	82
PŘÍLOHA K – MODEL PS Z PROSTŘEDÍ PSCAD.....	83

## **Příloha A - Ekvivalentní modely z prostředí PSCAD**

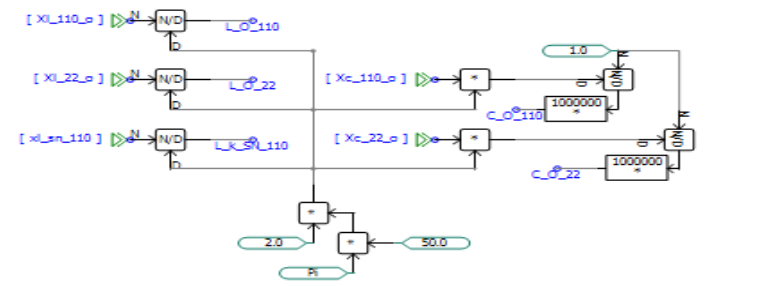
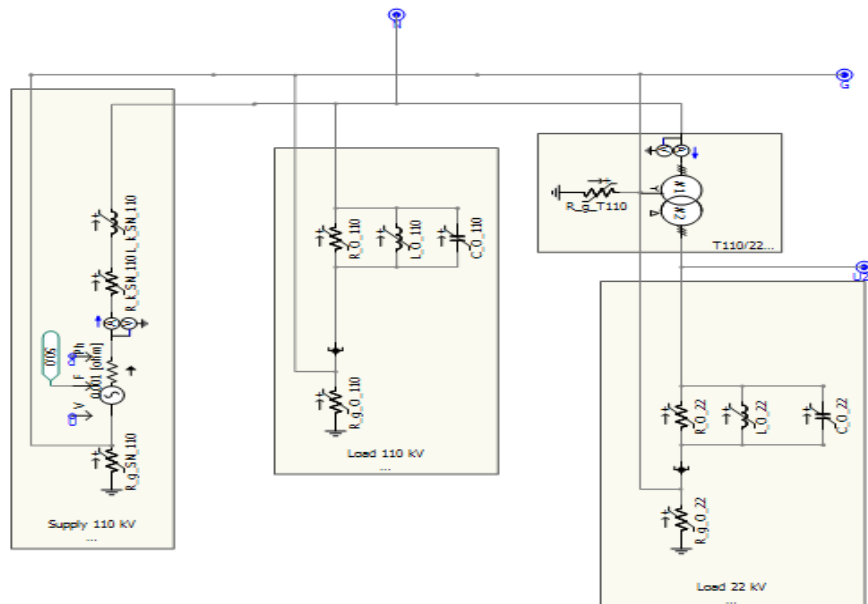
# A.1 - Model vedení



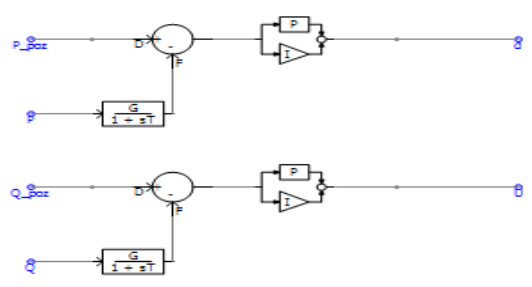
## A.2 - Ekvivalentní agregovaný model sítí 400, 110 a 22 kV



### A.3 - Ekvivalentní agregovaný model sítí 110 a 22 kV

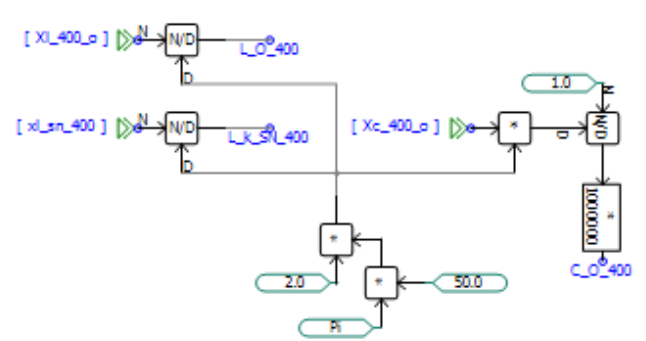
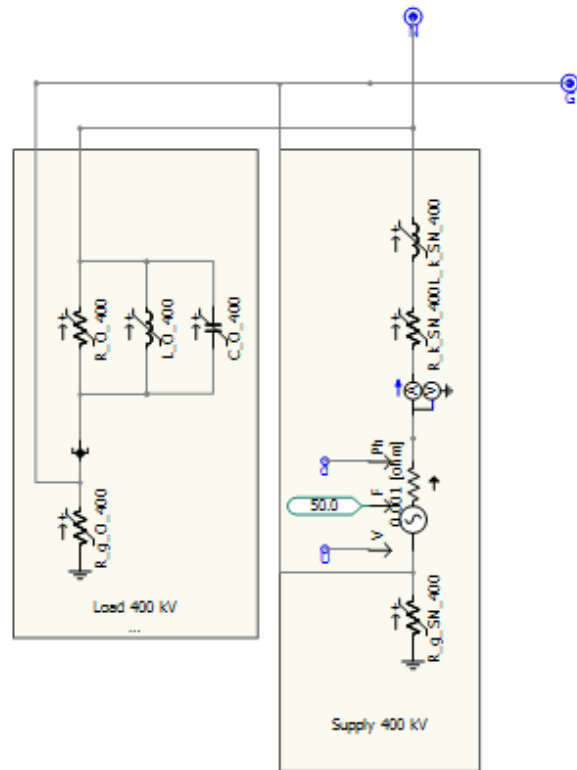


- [ V\_s\_n\_110 ] >> U\_s\_110
- [ d\_s\_n\_110 ] >> d\_s\_110
- [ R\_110\_e ] >> R\_0\_110
- [ R\_22\_e ] >> R\_0\_22
- [ r\_s\_n\_110 ] >> R\_k\_s\_110
- [ R\_110\_e\_a ] >> R\_g\_0\_110
- [ R\_22\_e\_a ] >> R\_g\_0\_22
- [ r\_g\_s\_n\_110 ] >> R\_g\_s\_110
- [ r\_g\_t\_110 ] >> R\_g\_t\_110
- [ S\_T110 ] >> s\_T110
- [ HV\_T110 ] >> hv\_R110
- [ LV\_T110 ] >> lv\_R110
- [ X\_HL\_T110 ] >> x\_HL\_T110
- [ I0\_T110 ] >> i0\_R110
- [ I\_k\_T110 ] >> ik\_R110
- [ P\_pos ] >> P\_pos
- [ Q\_pos ] >> Q\_pos

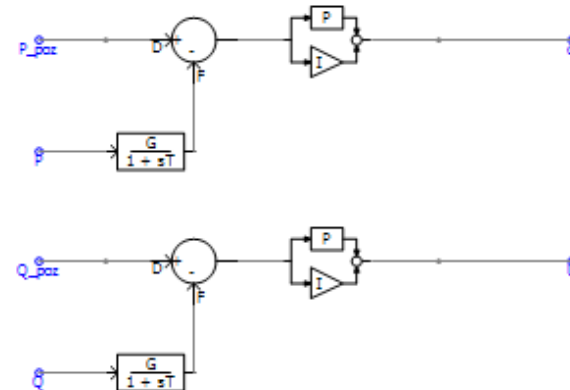




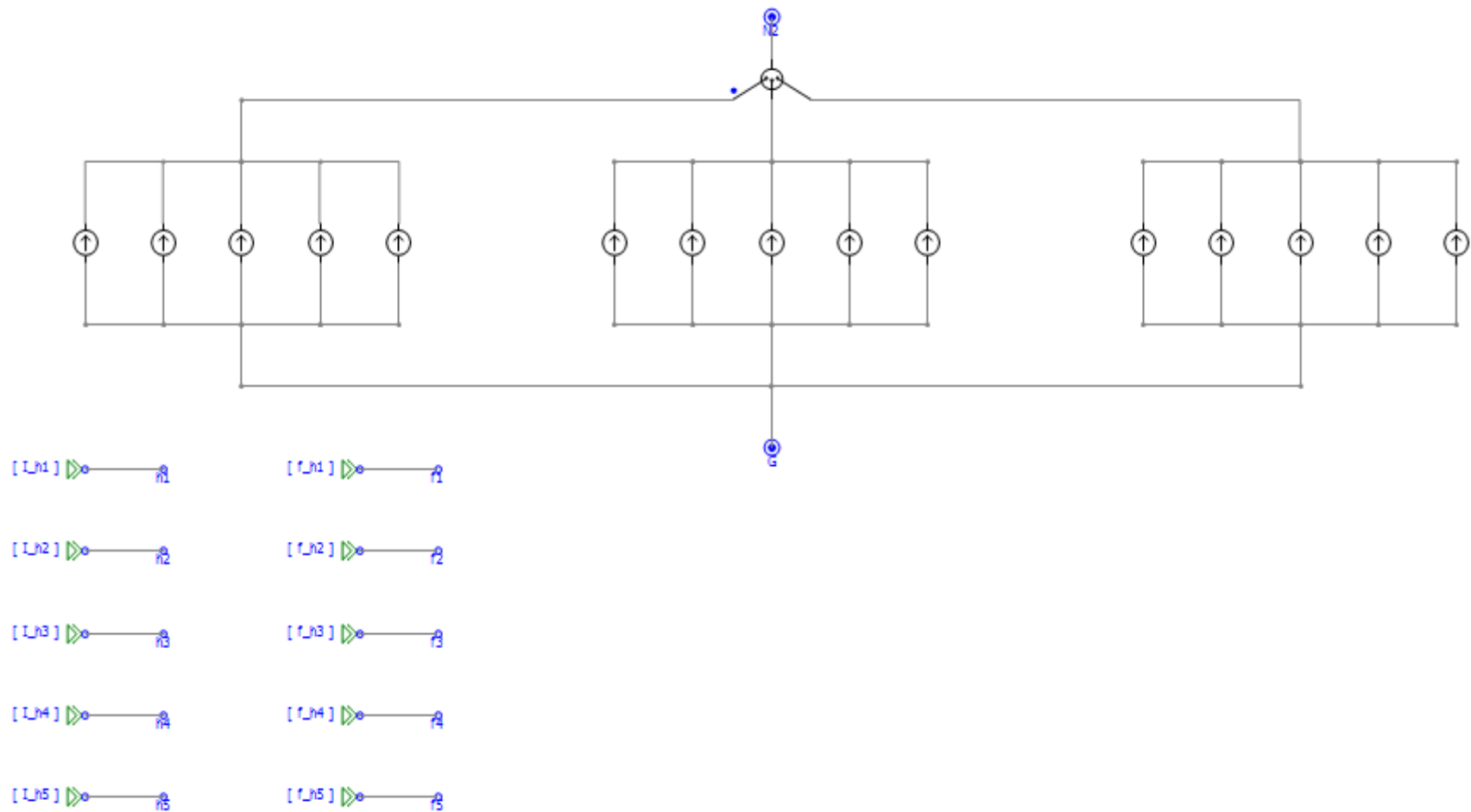
## A.4 - Ekvivalentní agregovaný model elektrárny



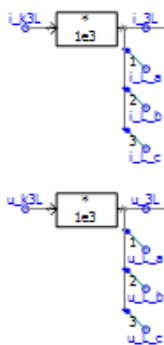
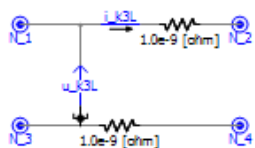
- [V\_sn\_400] → U\_SF\_400
- [d\_sn\_400] → d\_SF\_400
- [R\_400\_s] → R\_O\_400
- [r\_sn\_400] → R\_KSN\_400
- [R\_400\_g] → R\_gO\_400
- [r\_gsn\_400] → R\_gSN\_400
- [P\_pac] → P\_pac
- [q\_pac] → Q\_pac



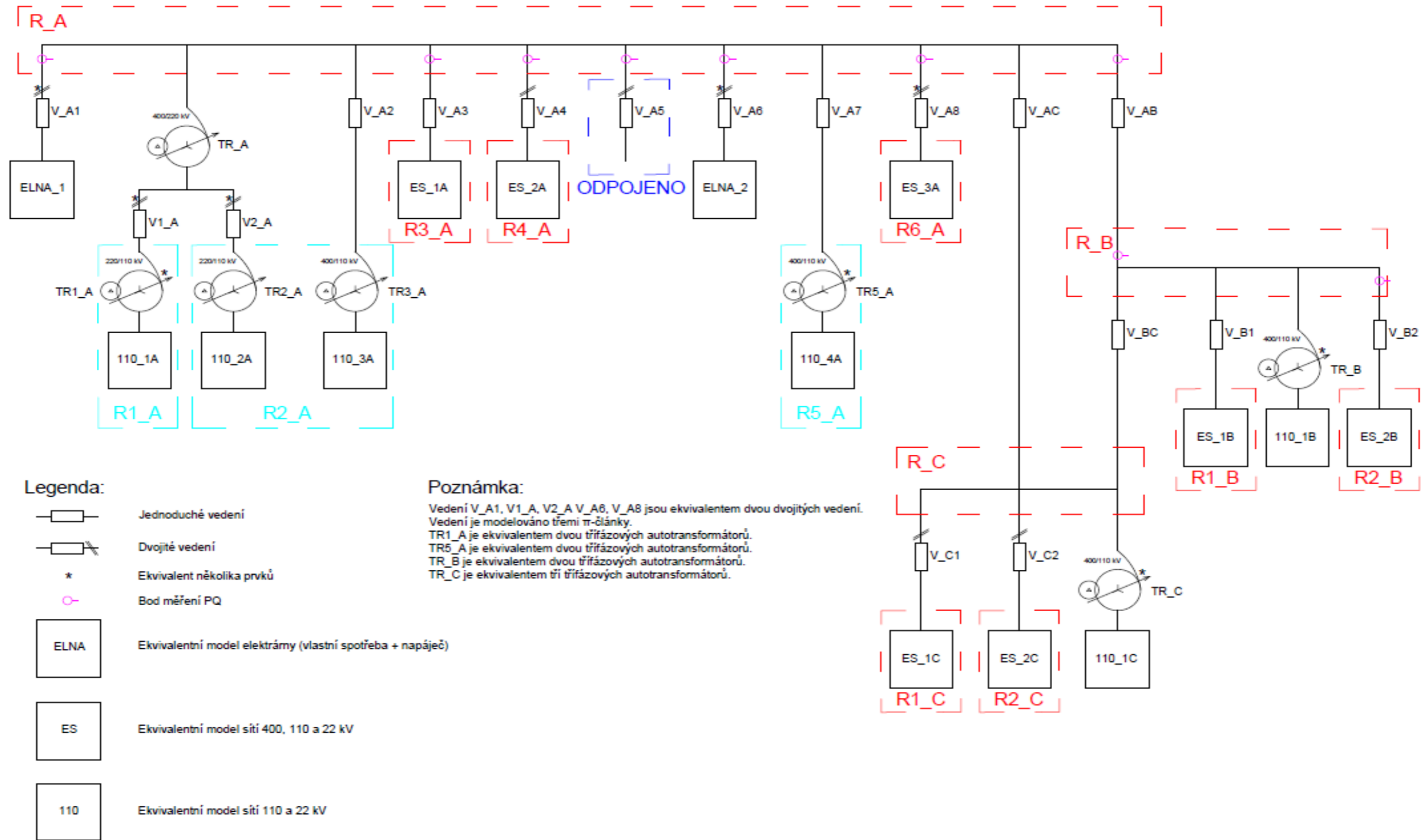
## A.5 - Ekvivalentní model zdroje harmonických proudů



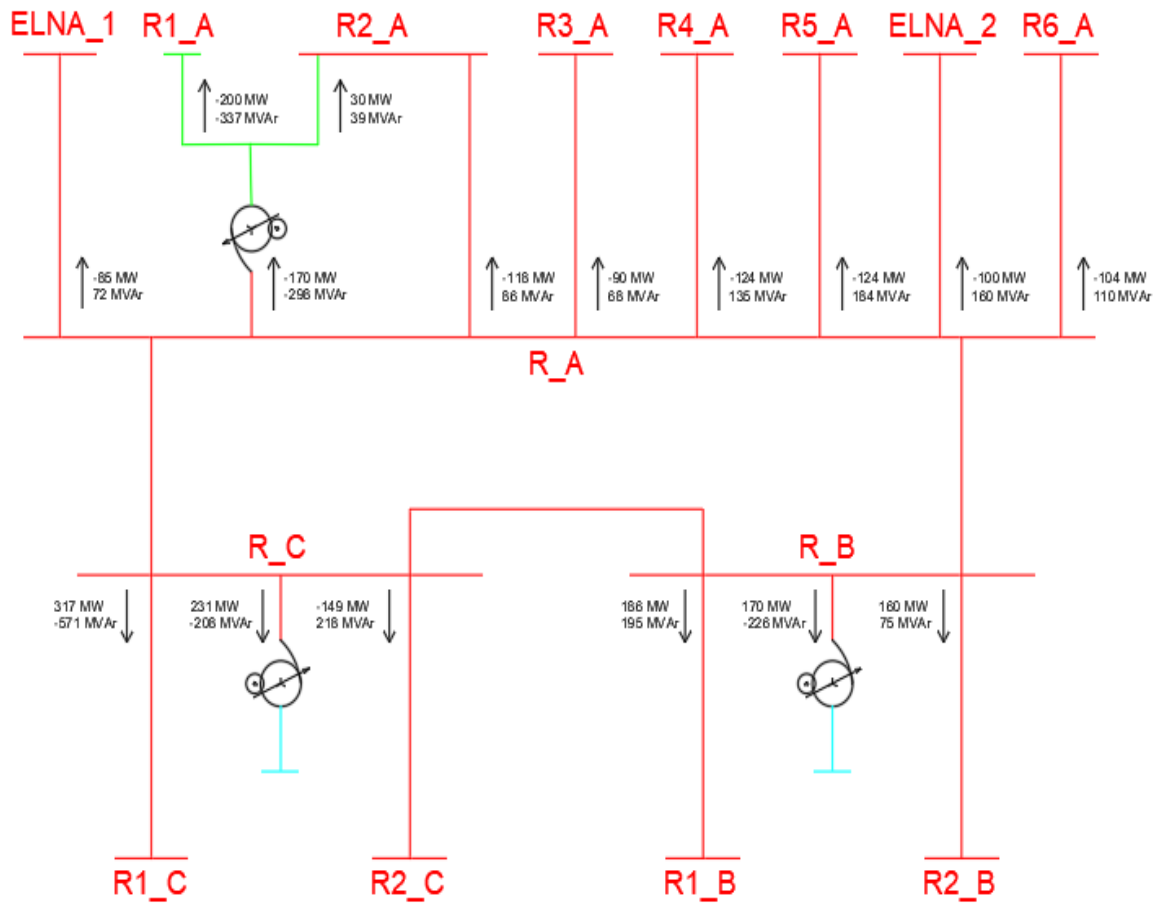
## A.6 - Model měřicí aparatury pro měření harmonického zkreslení napětí



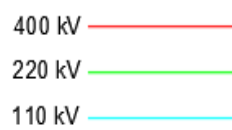
## Příloha B - Detailní schéma modelu PS



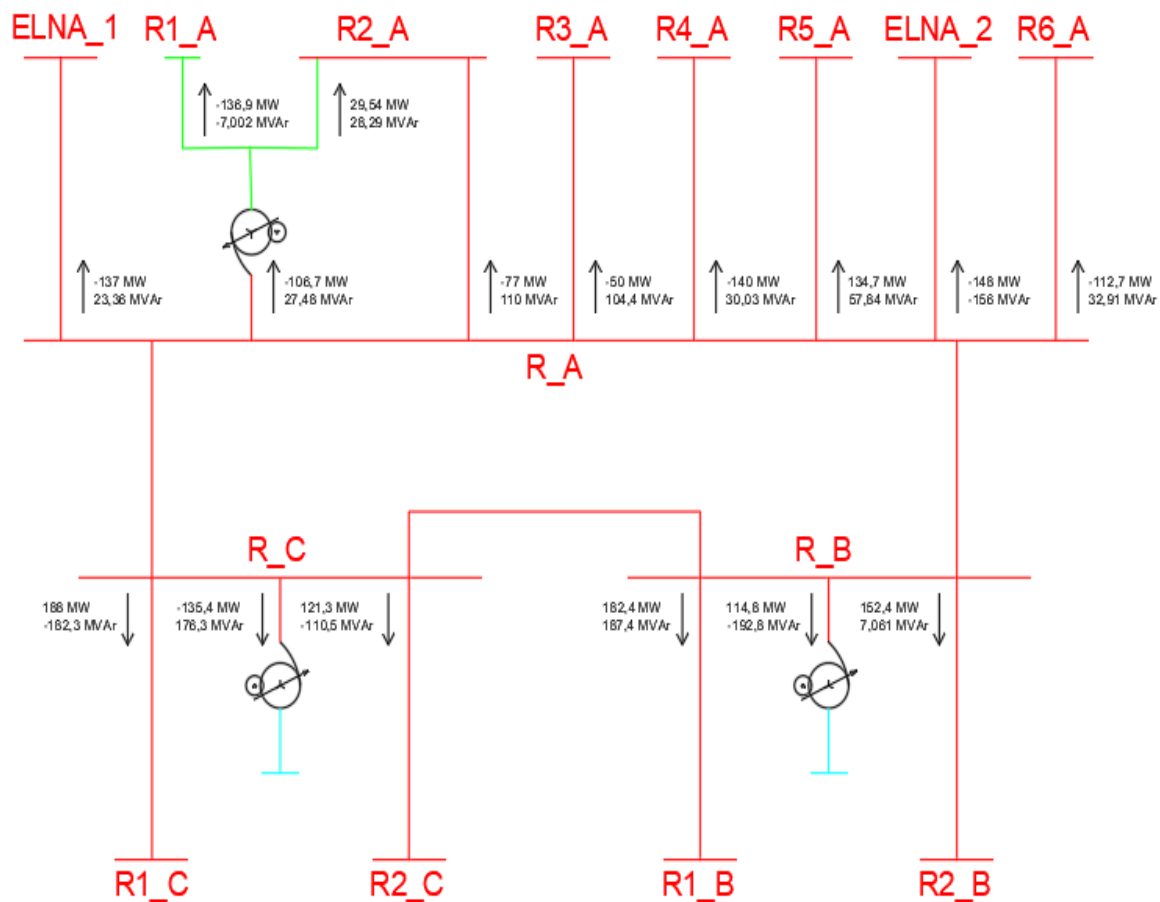
## Příloha C - Referenční výkonové toky v modelu



Legenda:



## Příloha D - Výsledné výkonové toky v modelu



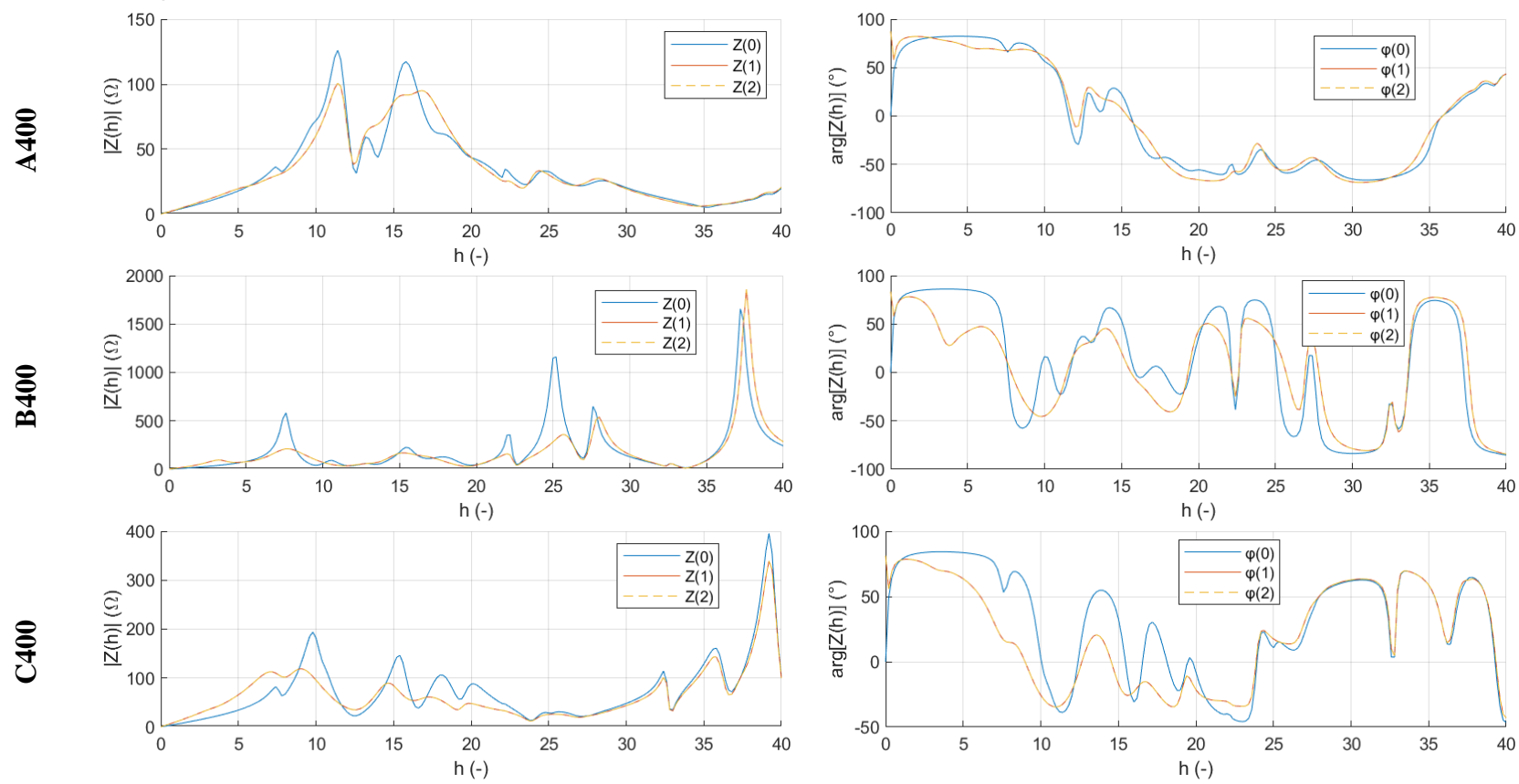
Legenda:

- 400 kV ————
- 220 kV ————
- 110 kV ————

## **Příloha E - Parametrizace odběrů (elektronická příloha)**

# Příloha F - Frekvenční charakteristiky impedance uzlů modelu

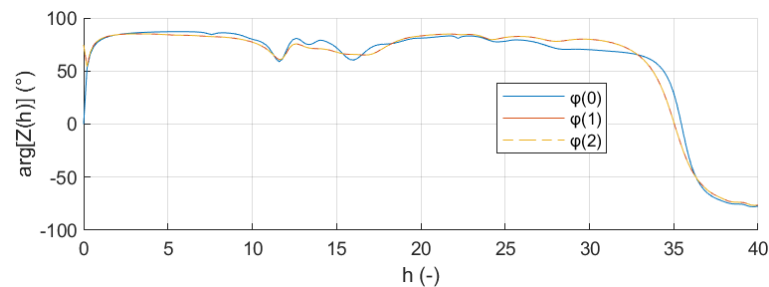
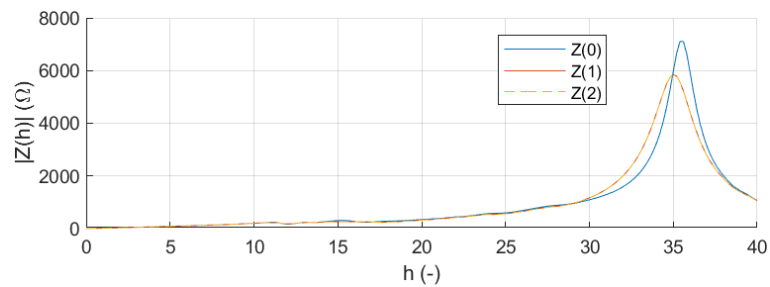
## F.1 - Uzly A400, B400 a C400



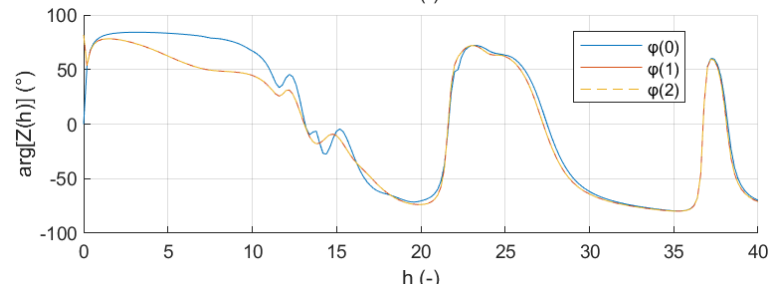
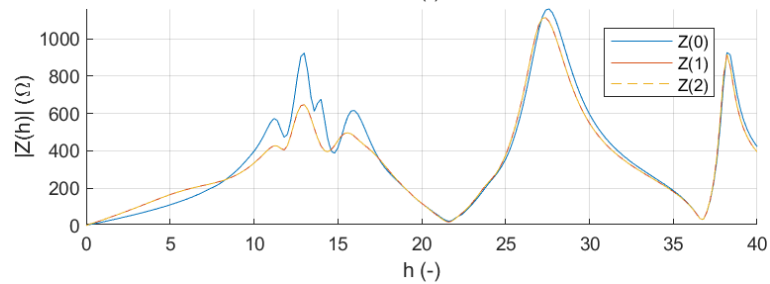


## F.2 - Uzly R2A400, R3A400 a R4A400

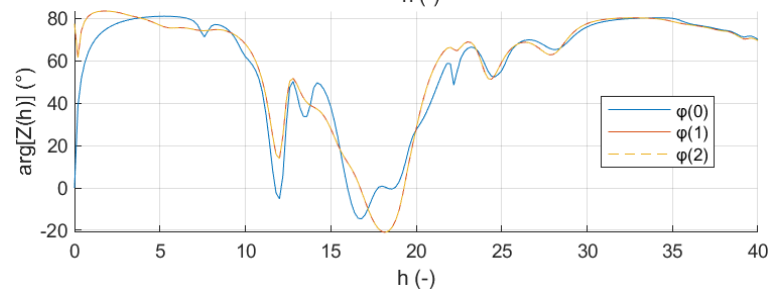
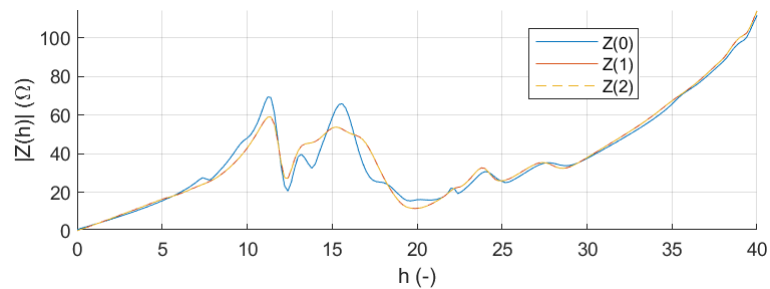
**R2A400**



**R3A400**

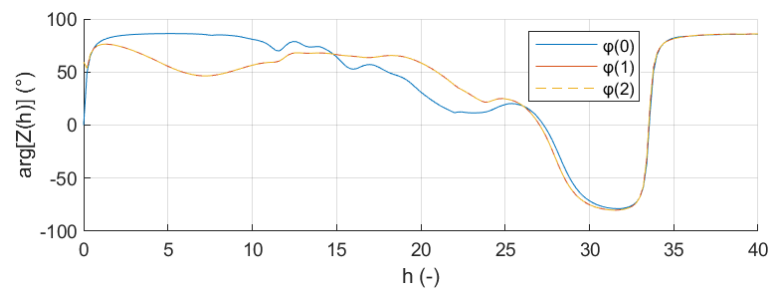
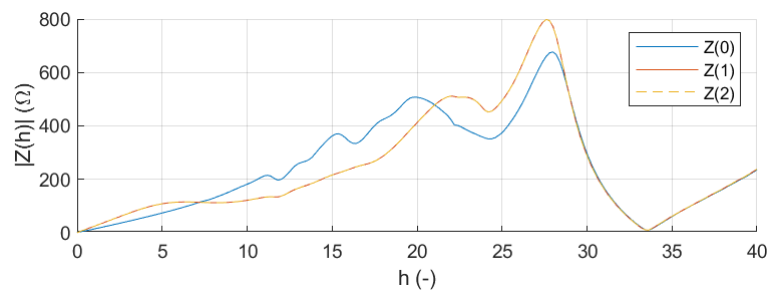


**R4A400**

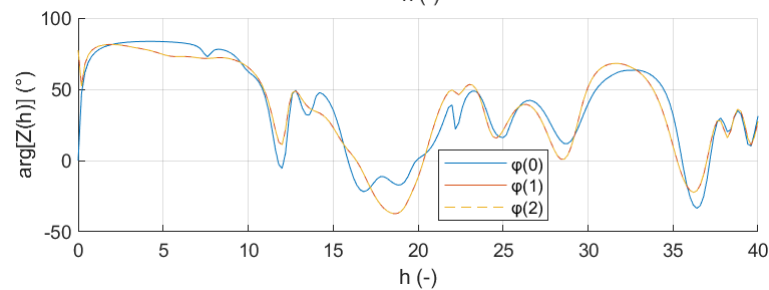
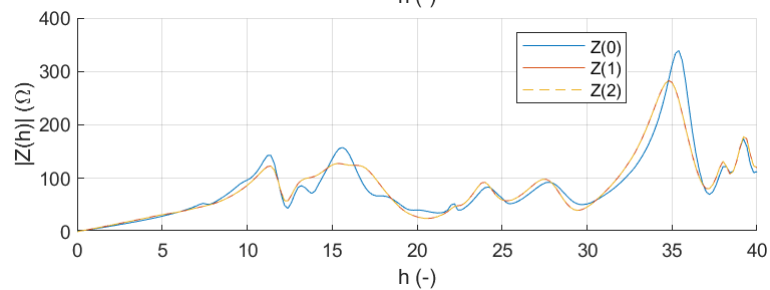


### F.3 - Uzly R5A400, R6A400 a R1B400

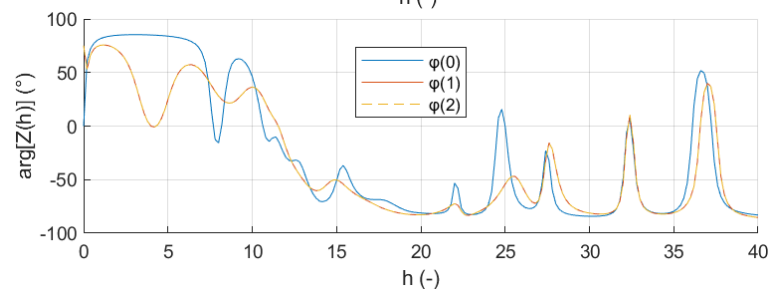
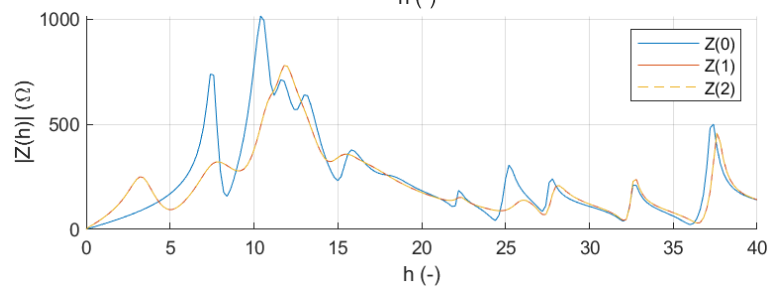
**R5A400**



**R6A400**

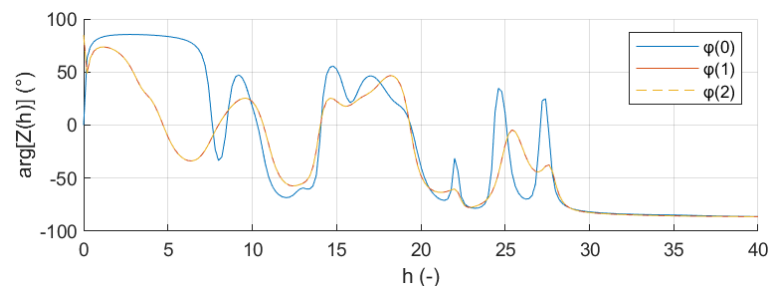
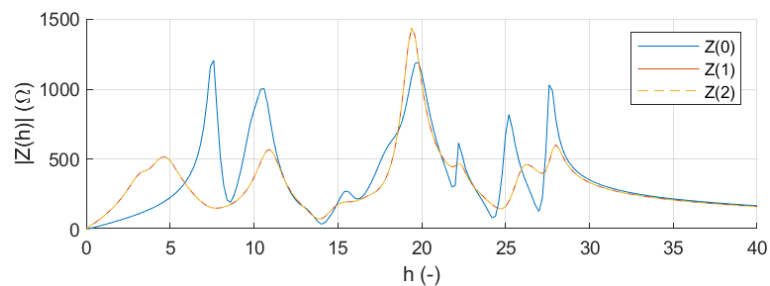


**R1B400**

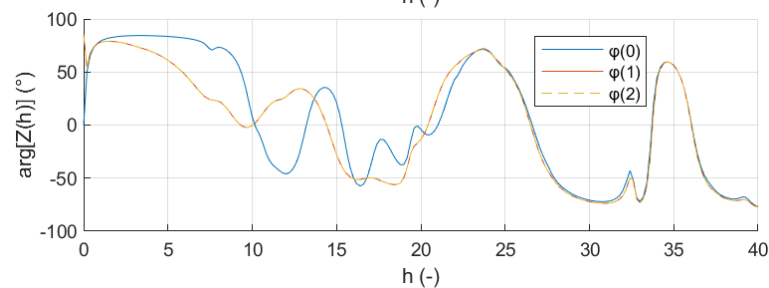
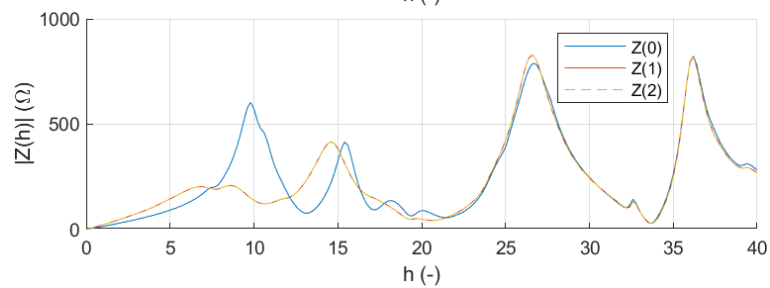


## F.4 - Uzly R2B400, R1C400 a R2C400

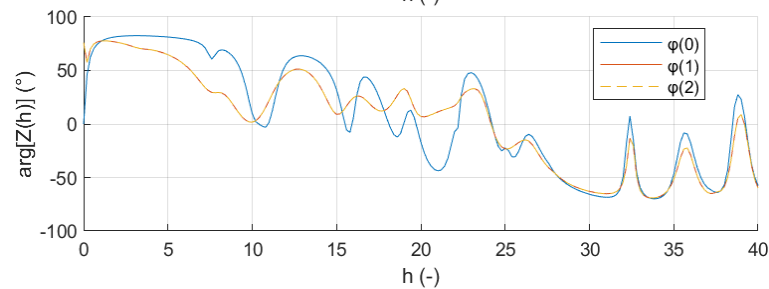
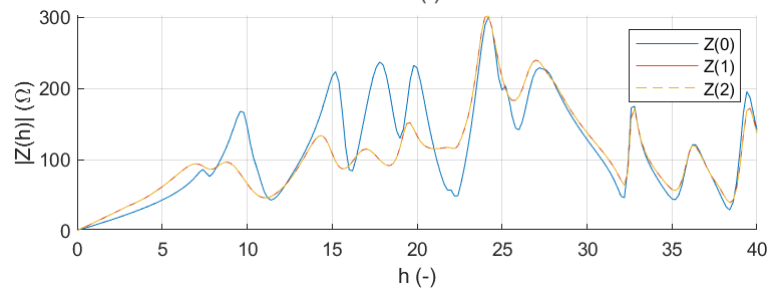
R2B400



R1C400

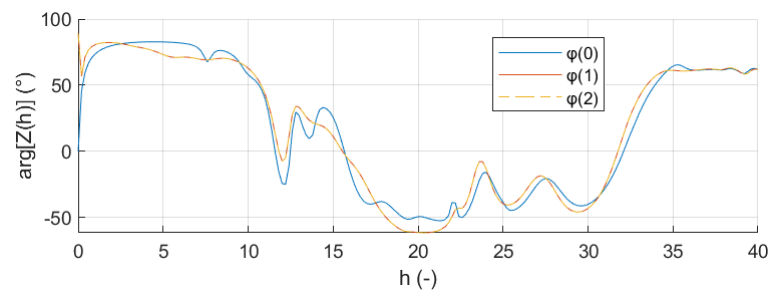
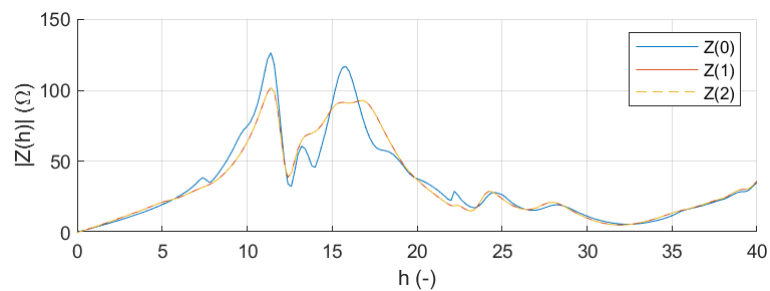


R2C400

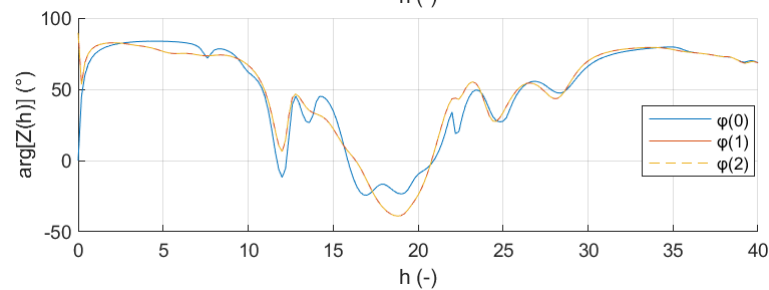
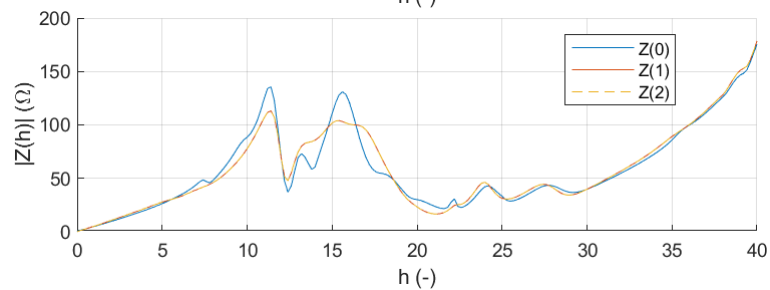


## F.5 - Uzly ELNA1, ELNA2 a B110

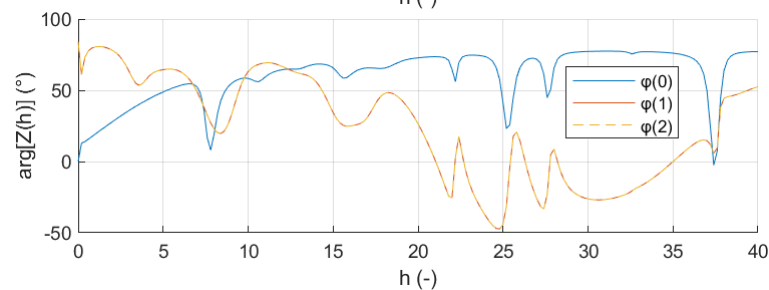
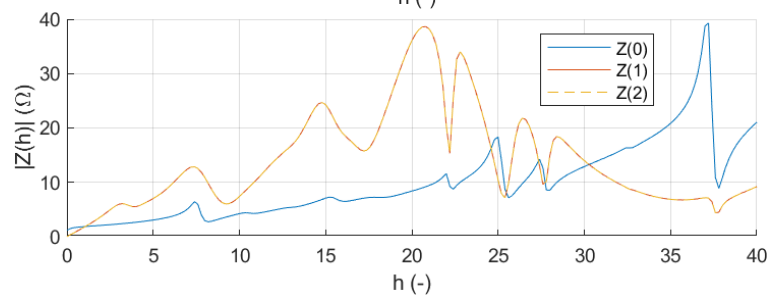
**ELNA1**



**ELNA2**

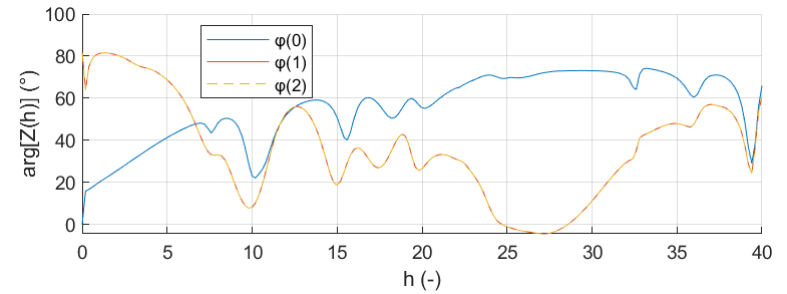
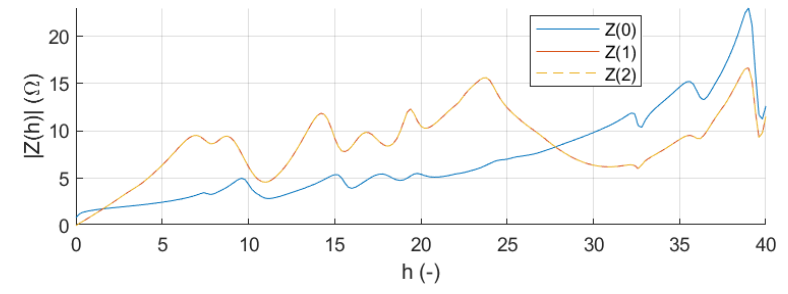


**B110**

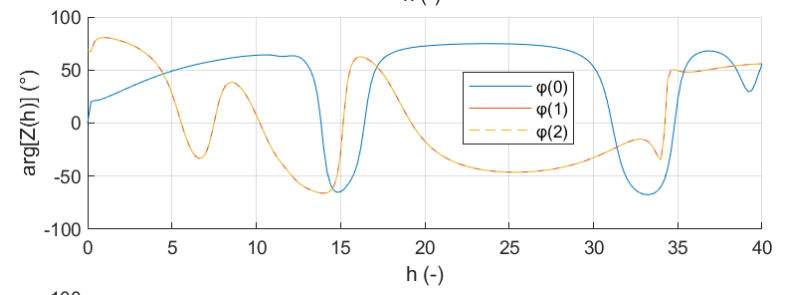
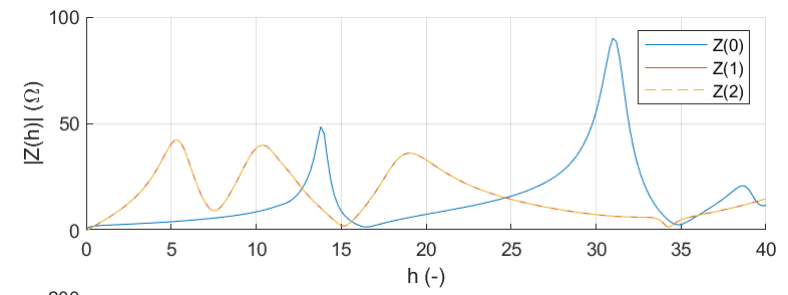


## F.6 - Uzly C110, R1A110, R1B110

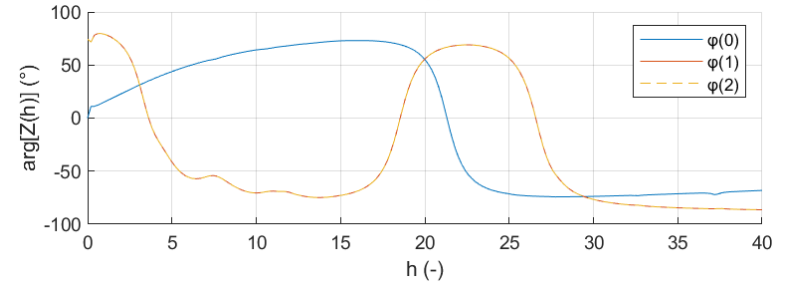
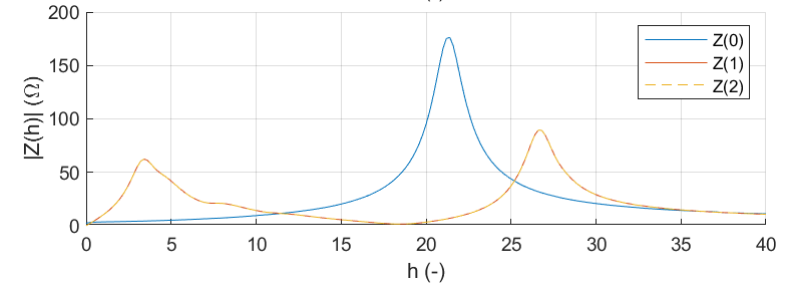
C110



R1A110

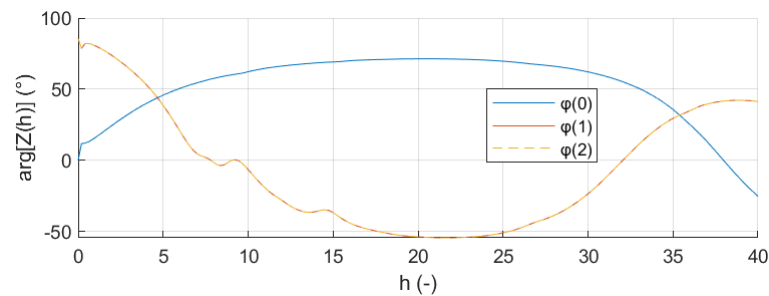
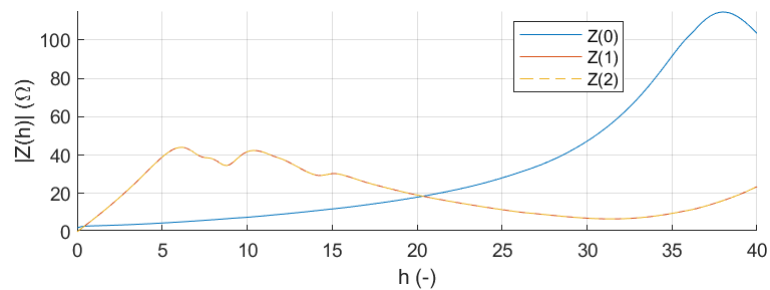


R1B110

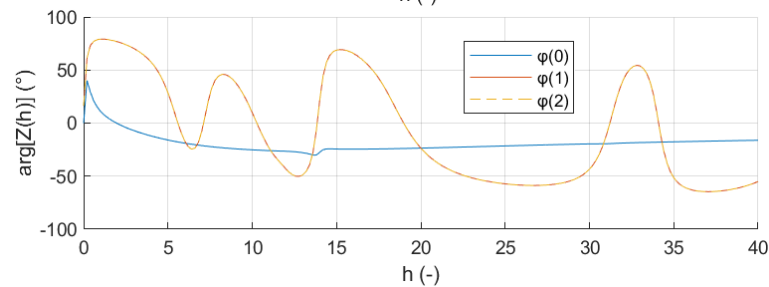
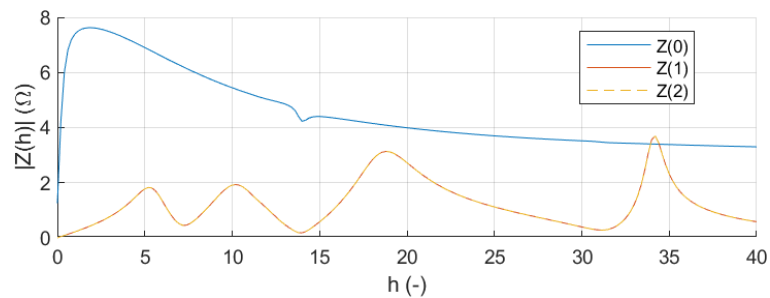


## F.7 - Uzly R1C110 a R1A22

**RIC110**



**R1A22**



## Příloha G - Parametrizace napáječů

Model	Napáječ		
	$S_k$ (3) (MVA)	$R$ ( $\Omega$ )	$X_L$ ( $\Omega$ )
ELNA_1	3500,00	5,00	50,04
ELNA_2	2900,00	6,04	60,39
ES_1A	2300,00	7,61	76,14
ES_2A	2850,00	6,14	61,45
ES_3A	2600,00	6,74	67,36
ES_1B	4300,00	4,07	40,73
ES_2B	2350,00	7,45	74,52
ES_1C	3000,00	5,84	58,38
ES_2C	7000,00	2,50	25,02
110_1A	1170,00	1,13	11,32
110_2A	1170,00	1,13	11,32
110_3A	7500,00	0,18	1,77
110_4A	2600,00	0,51	5,09
110_1B	4200,00	0,32	3,15
110_1C	3100,00	0,43	4,27

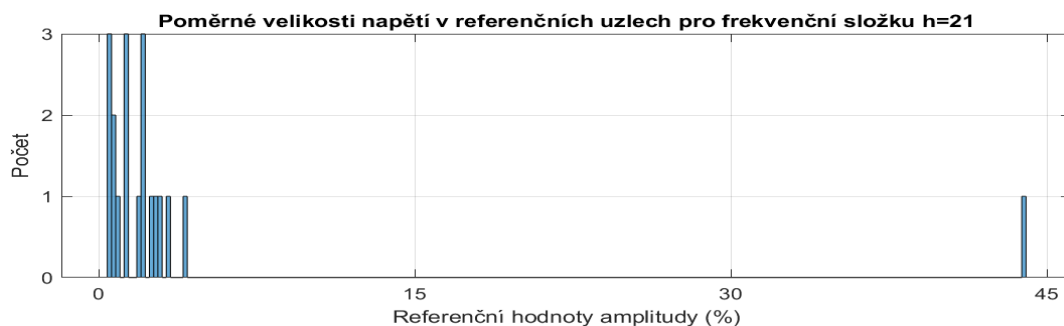
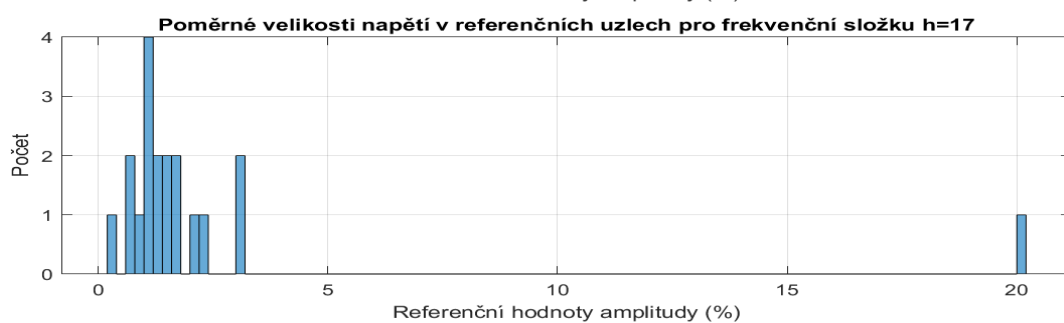
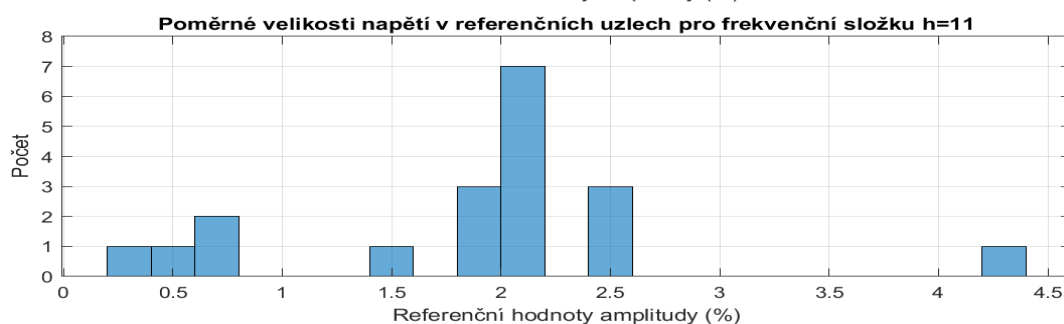
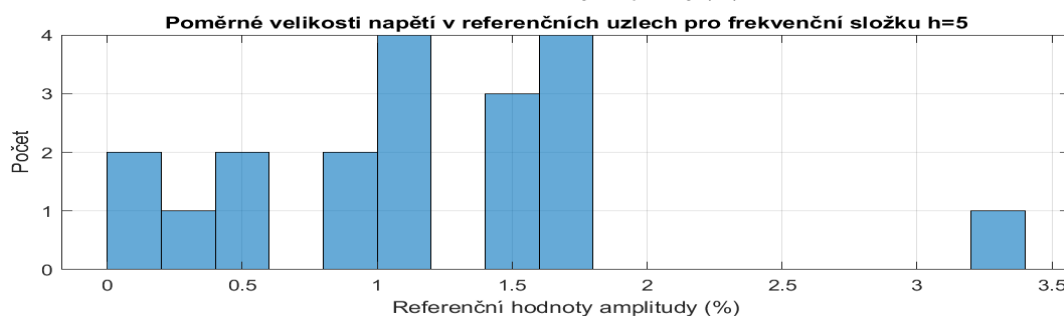
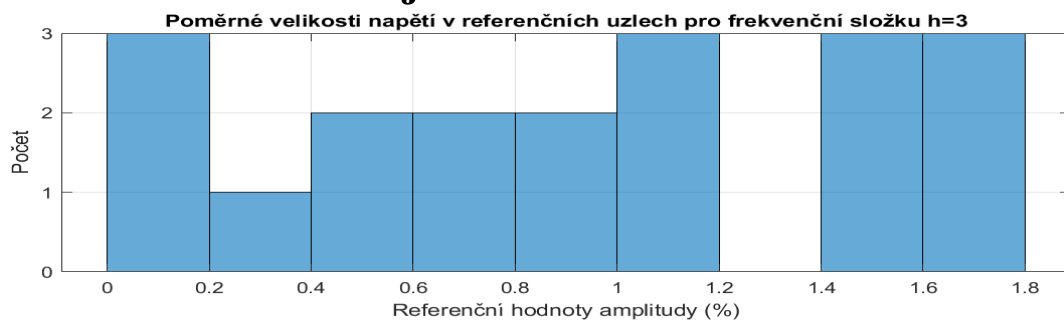
## Příloha H - Impedance uzlů na systémové frekvenci

Uzel	$ Z(0) $ ( $\Omega$ )	$\arg(Z(0))$ ( $^\circ$ )	$ Z(1) $ ( $\Omega$ )	$\arg(Z(1))$ ( $^\circ$ )
A400	3.36	73.10	3.64	80.80
B400	11.34	80.90	22.86	77.90
C400	5.87	78.20	10.95	77.90
ELNA1	3.70	73.70	3.98	80.60
ELNA2	5.01	74.90	5.28	80.00
R2A400	16.67	79.20	17.54	80.20
R3A400	20.10	79.70	31.43	77.20
R4A400	3.29	67.30	3.18	82.10
R5A400	14.43	78.90	24.46	75.80
R6A400	5.52	75.90	6.19	79.10
R1B400	25.09	81.70	54.12	75.50
R2B400	32.85	82.50	92.31	73.40
R1C400	15.51	79.10	23.63	78.00
R2C400	7.74	77.00	11.65	77.50
B110	1.86	19.20	1.76	80.40
C110	1.64	20.00	1.13	81.30
R1A110	2.53	23.50	4.65	80.60
R1B110	3.63	15.20	10.21	79.00
R1C110	3.10	16.00	6.88	80.50
R1A22	7.39	11.20	0.22	79.13



# **Příloha I - Matice popisující šíření harmonického zkreslení napětí (elektronická příloha)**

## Příloha J - Histogramy poměrných hodnot napětí v uzlech se zdrojem rušení



## **Příloha K – Model PS z prostředí PSCAD**

Vytvořený simulační model v prostředí PSCAD je k dispozici na UEEN VUT v Brně.

V případě potřeby poskytnutí modelu je nutné kontaktovat [fekt-ueen@vut.cz](mailto:fekt-ueen@vut.cz), případně [drapela@vut.cz](mailto:drapela@vut.cz)