

**VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V BRNĚ**

BRNO UNIVERSITY OF TECHNOLOGY

**FAKULTA ELEKTROTECHNIKY A KOMUNIKAČNÍCH  
TECHNOLOGIÍ**

**ÚSTAV ELEKTROENERGETIKY**

FACULTY OF ELECTRICAL ENGINEERING AND COMMUNICATION

DEPARTMENT OF ELECTRICAL POWER ENGINEERING

**METODA UZLOVÝCH NAPĚTÍ  
VÝPOČET ZKRATOVÝCH PROUDŮ V SÍTI VVN**

**SEMESTRÁLNÍ PROJEKT**

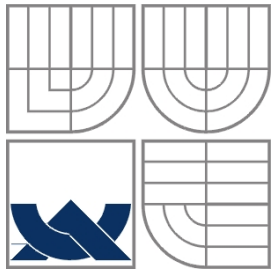
SEMESTRAL PROJECT

**AUTOR PRÁCE**

AUTHOR

**ING. RENÉ VÁPENÍK**

**BRNO 2009**



**VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V BRNĚ**



**Fakulta elektrotechniky a komunikačních technologií  
Ústav elektroenergetiky**

**Semestrální projekt**

**Metoda uzlových napětí.  
Výpočet zkratových proudů  
v síti vvn.**

**Ing. René Vápeník**

**vedoucí: doc. Ing. Evžen Haluzík, CSc.**

**Ústav elektroenergetiky, FEKT VUT v Brně, 2009**

**Brno**



**BRNO UNIVERSITY OF TECHNOLOGY**

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

**Semestral Project**

**The method of node voltage.  
Calculation of short-circuit currents  
in the system HV.**

by

**Ing. René Vápeník**

**Supervisor: doc. Ing. Evžen Haluzík, CSc.**

**Brno University of Technology, 2009**

**Brno**

## **ABSTRAKT**

Předmětem semestrální práce je výpočet zkratových poměrů pomocí metody uzlových napětí pro různé varianty chodu sítě. Součástí je i vytvoření softwarové podpory v programu vytvořeném pomocí PHP.

**KLÍČOVÁ SLOVA:** Metoda uzlových napětí, zkrat, chod sítě naprázdno, chod sítě se zátěží

## **ABSTRACT**

The subject of the project is to calculate the short-circuit conditions using the method of node voltage for different variants of network operation. This includes the creation of software support program created by PHP.

**KEY WORDS:** Method of node voltage, short circuits, remove the network load, network load operation.

## SEZNAM OBRÁZKŮ

<i>Obr. 1-1 Schéma sítě</i> .....	11
<i>Obr. 1-2 Topologická mapa sítě</i> .....	11
<i>Obr. 1-3 Náhrada napěťového zdroje zdrojem proudovým</i> .....	12
<i>Obr. 1-4 Topologická mapa sítě s vyznačenou orientací větví</i> .....	13
<i>Obr. 1-5 Snímek vstupního formuláře skriptu</i> .....	14
<i>Obr. 1-6 Topologická mapa sítě s vyznačenými napěťovými a proudovými poměry</i> .....	16
<i>Obr. 1-7 Snímek obrazovky se zobrazením výsledků</i> .....	16
<i>Obr. 1-8 Topologická mapa sítě s vyznačenými napěťovými a proudovými poměry</i> .....	18
<i>Obr. 1-9 Snímek části obrazovky se zobrazením výsledků skriptu</i> .....	18
<i>Obr. 1-10 Topologická mapa sítě s vyznačenými napěťovými a proudovými poměry</i> .....	20
<i>Obr. 1-11 Topologická mapa sítě s vyznačenými napěťovými a proudovými poměry</i> .....	22
<i>Obr. 1-12 Topologická mapa sítě s vyznačenými napěťovými a proudovými poměry</i> .....	23
<i>Obr. 1-13 Topologická mapa sítě s vyznačenými napěťovými a proudovými poměry</i> .....	24
<i>Obr. 2-1 Schéma sítě vvn</i> .....	27
<i>Obr. 2-2 Náhradní schéma sítě vvn</i> .....	29

## SEZNAM TABULEK

<i>Tab. 2-1 Parametry soustavy.....</i>	<i>27</i>
<i>Tab. 2-2 Parametry generátorů.....</i>	<i>27</i>
<i>Tab. 2-3 Parametry transformátorů.....</i>	<i>28</i>
<i>Tab. 2-4 Parametry vedení.....</i>	<i>28</i>
<i>Tab. 2-5 Přepočtené parametry zdrojů připojených do jednotlivých uzlů.....</i>	<i>29</i>
<i>Tab. 2-6 Parametry jednotlivých větví .....</i>	<i>30</i>
<i>Tab. 2-7 Tabulka odběru z jednotlivých uzlů .....</i>	<i>35</i>
<i>Tab. 2-8 Parametry v uzlech při chodu se zátěží .....</i>	<i>35</i>
<i>Tab. 2-9 Proudý tekoucí jednotlivými větvemi (vedeními) při chodu se zátěží.....</i>	<i>36</i>
<i>Tab. 2-10 Shrnutí výsledků – velikosti zkratových proudů (v A).....</i>	<i>37</i>
<i>Tab. 0-1 Fázové napětí v jednotlivých uzlech při zkratu (ve V).....</i>	<i>40</i>
<i>Tab. 0-2 Příspěvek jednotlivých zdrojů do zkratu (v A).....</i>	<i>40</i>
<i>Tab. 0-3 Velikost zkratového proudu (v A).....</i>	<i>41</i>
<i>Tab. 0-4 Proudý v jednotlivých vedeních .....</i>	<i>41</i>
<i>Tab. 0-5 Fázové napětí v jednotlivých uzlech při zkratu (ve V).....</i>	<i>42</i>
<i>Tab. 0-6 Příspěvek jednotlivých zdrojů do zkratu (v A).....</i>	<i>42</i>
<i>Tab. 0-7 Velikost zkratového proudu (v A).....</i>	<i>43</i>
<i>Tab. 0-8 Proudý v jednotlivých vedeních .....</i>	<i>43</i>
<i>Tab. 0-9 Fázové napětí v jednotlivých uzlech při zkratu (ve V).....</i>	<i>44</i>
<i>Tab. 0-10 Příspěvek jednotlivých zdrojů do zkratu (v A).....</i>	<i>44</i>
<i>Tab. 0-11 Velikost zkratového proudu (v A).....</i>	<i>45</i>
<i>Tab. 0-12 Proudý v jednotlivých vedeních .....</i>	<i>45</i>
<i>Tab. 0-13 Proud do zátěže při zkratu (ve A) .....</i>	<i>46</i>
<i>Tab. 0-14 Fázové napětí v jednotlivých uzlech při zkratu (ve V).....</i>	<i>47</i>
<i>Tab. 0-15 Příspěvek jednotlivých zdrojů do zkratu (v A).....</i>	<i>47</i>
<i>Tab. 0-16 Velikost zkratového proudu (v A).....</i>	<i>48</i>
<i>Tab. 0-17 Proudý v jednotlivých vedeních .....</i>	<i>48</i>
<i>Tab. 0-18 Proud do zátěže při zkratu (ve A) .....</i>	<i>49</i>
<i>Tab. 0-19 Velikosti náhradních sousledných impedancí (v <math>\Omega</math>) .....</i>	<i>50</i>
<i>Tab. 0-20 Velikosti náhradních impedancí složkové soustavy (v <math>\Omega</math>).....</i>	<i>50</i>
<i>Tab. 0-21 Velikosti zkratových proudů pro různé typy zkratu (v kA).....</i>	<i>51</i>

## SEZNAM SYMBOLŮ A ZKRATEK

A – Ampér, jednotka proudu

$E''$  - ekvivalentní napětí zdroje

HTML – Hyper Text Markup Language

I – modul proudu

$I_{ki}''$  - počátečný souměrný zkratový proud v i-tém uzlu

$I_{odi}$  – modul proudu odběru z i-tého uzlu

$[I_R]$  -redukovaná matice proudových zdrojů

$[I_v]$  - matice proudů v jednotlivých větvích

$[I_z]$  - matice proudových zdrojů

$[I_z]$  - matice proudů dodávaných ze zdroje

$[K]$  - incidenční matice

MVA – Megavoltampér

PHP – Hypertext Preprocessor

S – Modul zdánlivého výkonu

S – Siemens, jednotka vodivosti

U – modul napětí

$[U]$  - matice uzlových napětí

$U_i$  – modul napětí v i-tém uzlu

$[U_R]$  - redukovaná matice uzlových napětí

V – Volt, jednotka napětí

VA – Voltampér, jednotka zdánlivého výkonu

WWW -World Wide Web

Y – modul admitance

$[Y]$  - uzlová admitanční matice

$Y_k$  – modul admitance zkratu

$[Y_k]$  - matice admitance zkratu

$[Y_{od}]$  - diagonální matice náhradních admitancí odběru proudu

$Y_{odi}$  – modul náhradní admitance proudu odběru z i-tého uzlu

$[Y_R]$  - redukovaná uzlová admitanční matice



$[Y_v]$  - diagonální matice větvových admitancí

$[Y_z]$  - diagonální matice admitancí zdroje

$Z$  - modul impedance

$Z_0$  - modul netočivé složky impedance

$Z_1$  - modul sousledné složky impedance

$Z_2$  - modul zpětné složky impedance

$Z_k$  - modul impedance zkratu

kA - kiloampér

kV - kilovolt

$v_x$  - označení větve

$v_n$  - vysoké napětí

$v_{vn}$  - velmi vysoké napětí

$z_{vn}$  - zvlášť vysoké napětí

# OBSAH

<b>1 ÚVOD</b> .....	<b>11</b>
<b>1.1 POPIS MATEMATICKÉHO MODELU</b> .....	<b>11</b>
1.1.1 VÝPOČET ZKRATU V SÍTI BEZ ZÁTĚŽE (S NULOVÝM ODPOREM ZKRATU).....	17
1.1.2 VÝPOČET OBVODU V SÍTI BEZ ZÁTĚŽE (NENULOVÝ PŘECHODOVÝ ODPOR ZKRATU) .....	18
1.1.3 VÝPOČET CHODU SÍŤE S ODBĚRY.....	20
1.1.4 VÝPOČET ZKRATU V SÍTI SE ZÁTĚŽÍ (S NULOVÝM ODPOREM ZKRATU) .....	22
1.1.5 VÝPOČET ZKRATU V SÍTI SE ZÁTĚŽÍ (S NENULOVÝM ODPOREM ZKRATU).....	24
<b>1.2 SHRUTÍ:</b> .....	<b>25</b>
1.2.1 DALŠÍ POSTUP – DOPOČET JINÝCH TYPŮ ZKRATŮ.....	25
<b>2 PRAKTICKÝ VÝPOČET CHODU REÁLNÉ SÍŤE</b> .....	<b>27</b>
<b>2.1 VSTUPNÍ PARAMETRY</b> .....	<b>27</b>
<b>2.2 VÝPOČET METODOU UZLOVÝCH NAPĚTÍ</b> .....	<b>29</b>
2.2.1 VÝPOČET CHODU SÍŤE BEZ ZÁTĚŽE PŘI ZKRATU V UZLU A PRO NULOVÝ ODPOR ZKRATU ....	32
2.2.2 VÝPOČET CHODU SÍŤE BEZ ZÁTĚŽE PŘI ZKRATU V UZLU A PRO NENULOVÝ ODPOR ZKRATU	34
2.2.3 VÝPOČET USTÁLENÉHO CHODU SÍŤE SE ZÁTĚŽÍ .....	34
2.2.4 VÝPOČET USTÁLENÉHO CHODU SÍŤE SE ZÁTĚŽÍ A PRO NULOVÝ ODPOR ZKRATU .....	36
2.2.5 VÝPOČET USTÁLENÉHO CHODU SÍŤE SE ZÁTĚŽÍ A PRO NENULOVÝ ODPOR ZKRATU .....	36
<b>2.3 ZÁVĚR</b> .....	<b>37</b>
<b>POUŽITÁ LITERATURA</b> .....	<b>39</b>
<b>PŘÍLOHA A SHRUTÍ VÝSLEDKŮ PRO CHOD DANÉ SÍŤE BEZ ZÁTĚŽE A PRO NULOVÝ ODPOR ZKRATU</b> .....	<b>40</b>
<b>PŘÍLOHA B SHRUTÍ VÝSLEDKŮ PRO CHOD DANÉ SÍŤE BEZ ZÁTĚŽE A PRO NENULOVÝ ODPOR ZKRATU 2 OHMY</b> .....	<b>42</b>
<b>PŘÍLOHA C SHRUTÍ VÝSLEDKŮ PRO CHOD DANÉ SÍŤE SE ZÁTĚŽÍ A PRO NULOVÝ ODPOR ZKRATU</b> .....	<b>44</b>
<b>PŘÍLOHA D VÝPOČET USTÁLENÉHO CHODU SÍŤE SE ZÁTĚŽÍ A PRO NENULOVÝ ODPOR ZKRATU 2 OHMY</b> .....	<b>47</b>
<b>PŘÍLOHA E VELIKOST JEDNOTLIVÝCH TYPŮ ZKRATU PRO CHOD BEZ ZÁTĚŽE</b> .....	<b>50</b>

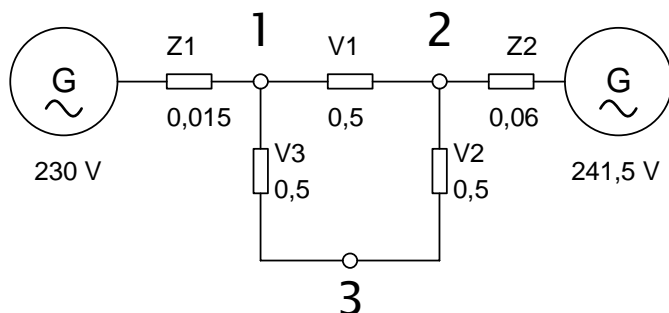
# 1 ÚVOD

Předmětem projektu je výpočet proudových a napěťových poměrů v síti vvn při třífázovém zkratu. Výpočet je proveden v několika variantách. Výpočet je proveden pomocí metody uzlových napětí a jsou uvažovány varianty výpočty bez zátěže a se zátěží a rovněž tak případy nulového a nenulového odporu zkratu. Tento model je podpořen skriptem naprogramovaný pomocí PHP, který je k dispozici na [www stránkách http://www.stud.feec.vutbr.cz/~xvapen02/vypocty/mun.php](http://www.stud.feec.vutbr.cz/~xvapen02/vypocty/mun.php).

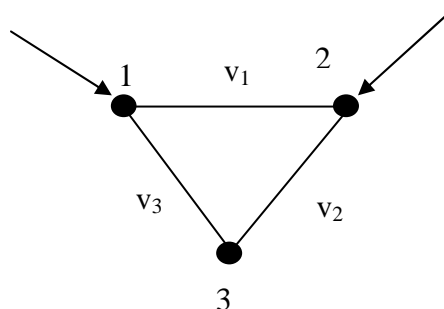
První část této práce je věnován detailnímu popisu algoritmu řešení na jednoduchém příkladu. Účelem je na nejjednodušším příkladě osvětlit použité algoritmy řešení. Druhá část je věnována výpočtu části distribuční sítě vvn s použitím daného skriptu.

## 1.1 Popis matematického modelu

Předpokládejme tuto jednoduchou síť, napájenou dvěma transformátory s různě nastavenými odbočkami, bez odběru.



Obr. 1-1 Schéma sítě



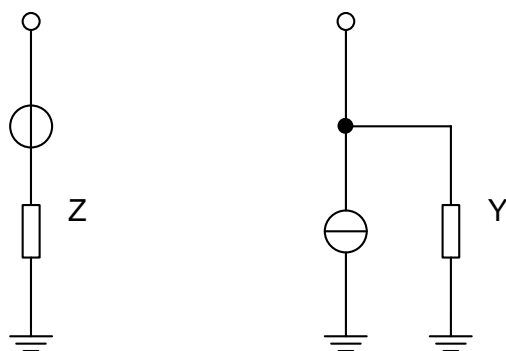
Obr. 1-2 Topologická mapa sítě

Do uzlu č. 1 je připojen zdroj napětí  $U=230$  V s vnitřní impedancí  $0.015 \Omega$ .

Do uzlu č. 2 je připojen zdroj napětí  $U=241,5$  V s vnitřní impedancí  $0.06 \Omega$ .

Impedance větví  $v_1$  až  $v_3$  je  $0,5 \Omega$ .

Nejprve přepočteme zdroje napětí na zdroje proudu.



Obr. 1-3 Náhrada napěťového zdroje zdrojem proudovým

$$I_1 = \frac{U_1}{Z} = \frac{230 \text{ V}}{0,015 \Omega} = 15333,33 \text{ A} \quad (1.1)$$

$$Y_1 = \frac{1}{Z_1} = 66,66 \text{ S} \quad (1.2)$$

Pro zdroj připojený do uzlu 2 dostáváme

$$I_2 = 4025 \text{ A}$$

$$Y_2 = 16,66 \text{ S}$$

Dále přepočteme impedance jednotlivých větví na admitance. Pro jednotlivé větve  $v_1$  až  $v_3$  je admitance 2 S.

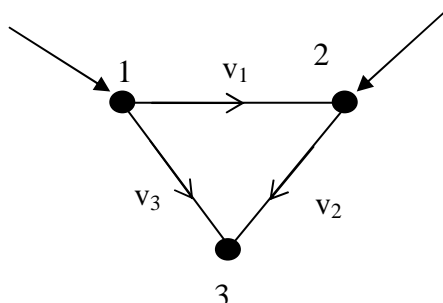
V dalším kroku sestojíme diagonální matici větvových admitancí. Prvky na  $i$ -tém řádku a  $i$ -tém sloupci tvoří admitance  $i$ -té větve. Ostatní prvky jsou nulové.

$$[Y_v] = \begin{bmatrix} 2 & 0 & 0 \\ 0 & 2 & 0 \\ 0 & 0 & 2 \end{bmatrix} \text{ S} \quad (1.3)$$

Stejným způsobem vytvoříme diagonální matici admitancí zdroje propojených do jednotlivých  $j$ -tých uzlů.

$$[Y_z] = \begin{bmatrix} 66,66 & 0 & 0 \\ 0 & 16,66 & 0 \\ 0 & 0 & 0 \end{bmatrix} \text{ S} \quad (1.4)$$

Dále vytvoříme incidenční matici  $K$ . Ta má  $i$  řádek (jednotlivé řádky představují větve) a  $j$  sloupců (jednotlivé sloupce představují uzly). Než ji vytvoříme, musíme si orientovat (stanovit směry toku proudu) jednotlivé větve.



Obr. 1-4 Topologická mapa sítě s vyznačenou orientací větví

Incidenční matici vytvoříme tak, že prvek v  $i$ -tém řádku v  $j$ -tém sloupci odpovídá 1, pokud  $i$ -tá větev vychází z  $j$ -tého sloupce a odpovídá  $-1$  pokud,  $i$ -tá větev vchází do  $j$ -tého uzlu. První větev vychází z uzlu číslo 1 a vchází do uzlu č. 2. První řádek matice tedy odpovídá:

$$K_1 = [1 \quad -1 \quad 0] \quad (1.5)$$

Druhá větev vychází z uzlu číslo 2 a vchází do uzlu č. 3. Druhý řádek matice tedy odpovídá:

$$K_2 = [0 \quad 1 \quad -1] \quad (1.6)$$

A třetí větev vychází z uzlu číslo 1 a vchází do uzlu č. 3. Třetí řádek matice tedy odpovídá:

$$K_3 = [1 \quad 0 \quad -1] \quad (1.7)$$

Výsledná incidenční matice  $K$  má tvar

$$K = \begin{bmatrix} 1 & -1 & 0 \\ 0 & 1 & -1 \\ 1 & 0 & -1 \end{bmatrix} \quad (1.8)$$

Dále vypočítáme uzlovou admitanční matici dle vztahu

$$[Y] = [K^T][Y_v][K] + [Y_z] \quad (1.9)$$

Tuto matici můžeme rovněž sestavit přímo z topologické mapy sítě. Prvky na hlavní diagonále tvoří součet admitancí všech větví z uzlu vycházejících včetně admitance příslušného zdroje připojeného do daného uzlu. Ostatní prvky tvoří zápornou hodnotu admitance mezi  $i$ -tým uzlem na  $i$ -tém řádku a  $j$ -tým uzlem v  $j$ -tém sloupci.

Admitance zdrojů tvoří další větve mezi  $i$ -tým uzlem a uzlem č. 0 představující zem. Pokud bychom ale při vytváření výše uvedených matic uvažovali i uzel č. 0, dostali bychom další řádek a další sloupec, které by byl lineární kombinací ostatních a pro řešení může být vynechán.

Na následujícím obrázku jsou znázorněny jednotlivé kroky zadávání potřebných údajů do formuláře:

**Metoda uzlových napětí**

POZOR - místo desetinné čárky je třeba použít desetinou TEČKU!

**Krok 1**

Počet uzlů   
 Počet větví

**Krok 2 - Zadání parametrů uzlů**

Parametry uzlů

Uzel č.	uzel	Napájecí napětí	U= V	Impedance zdroje	Z= $\Omega$	Odběr A	I= A	Proud A	I= A	Admitance zdroje S	Admitance zátěže S	Admitance zátěže S
Uzel č. 1	uzel 1	Napájecí napětí	U= V 230	Impedance zdroje	Z= $\Omega$ 0.015	Odběr A 0	I= A 0	Proud A 15333.3333	I= A 15333.3333	Admitance zdroje S 66.66666666	Admitance zátěže S 0	Admitance zátěže S 0
Uzel č. 2	uzel 2	Napájecí napětí	U= V 241.5	Impedance zdroje	Z= $\Omega$ 0.06	Odběr A 0	I= A 0	Proud A 4025	I= A 4025	Admitance zdroje S 16.66666666	Admitance zátěže S 0	Admitance zátěže S 0
Uzel č. 3	uzel 3	Napájecí napětí	U= V	Impedance zdroje	Z= $\Omega$	Odběr A 0	I= A 0	Proud A 0	I= A 0	Admitance zdroje S 0	Admitance zátěže S 0	Admitance zátěže S 0

**Krok 3 - Zadání impedance větví**

Parametry větví

Větev č.	Z= $\Omega$	Y= S
Větev č. 1	Z= 0.5	Y= 2
Větev č. 2	Z= 0.5	Y= 2
Větev č. 3	Z= 0.5	Y= 2

**Krok 4 - Zadej incidenční matici**

Incidenční matice

1	-1	
	1	-1
1		-1

Odeslat

Obr. 1-5 Snímek vstupního formuláře skriptu

Po výpočtu dostáváme uzlovou admitanční matici

$$[Y] = \begin{bmatrix} 70,66 & -2 & -2 \\ -2 & 20,66 & -2 \\ -2 & -2 & 4 \end{bmatrix} \text{ S} \quad (1.10)$$

Pro další výpočet sestavíme proudovou matici zdrojů:

$$[I_z] = \begin{bmatrix} 15333,33 \\ 4025 \\ 0 \end{bmatrix} \text{ A} \quad (1.11)$$

Dle následujícího vztahu vypočteme napětí v jednotlivých uzlech:

$$[U] = [Y]^{-1} \cdot [I] \quad (1.12)$$

Dostáváme výsledek

$$[U] = \begin{bmatrix} 230,4 \\ 239,8 \\ 235,1 \end{bmatrix} \text{ V} \quad (1.13)$$

Vynásobením diagonální admitanční matice, incidenční matice a matice napětí v jednotlivých uzlech dostaneme proudy tekoucí jednotlivými větvemi

$$[I_v] = [Y_v][K][U] \quad (1.14)$$

Výsledek

$$[I_v] = \begin{bmatrix} -18,8 \\ 9,4 \\ -9,4 \end{bmatrix} \text{ A} \quad (1.15)$$

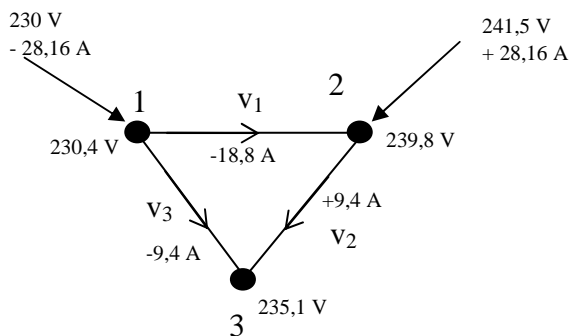
Proud dodávaný ze zdroje určíme dle vztahu

$$[I_z] = [I] - [Y_z][U] \quad (1.16)$$

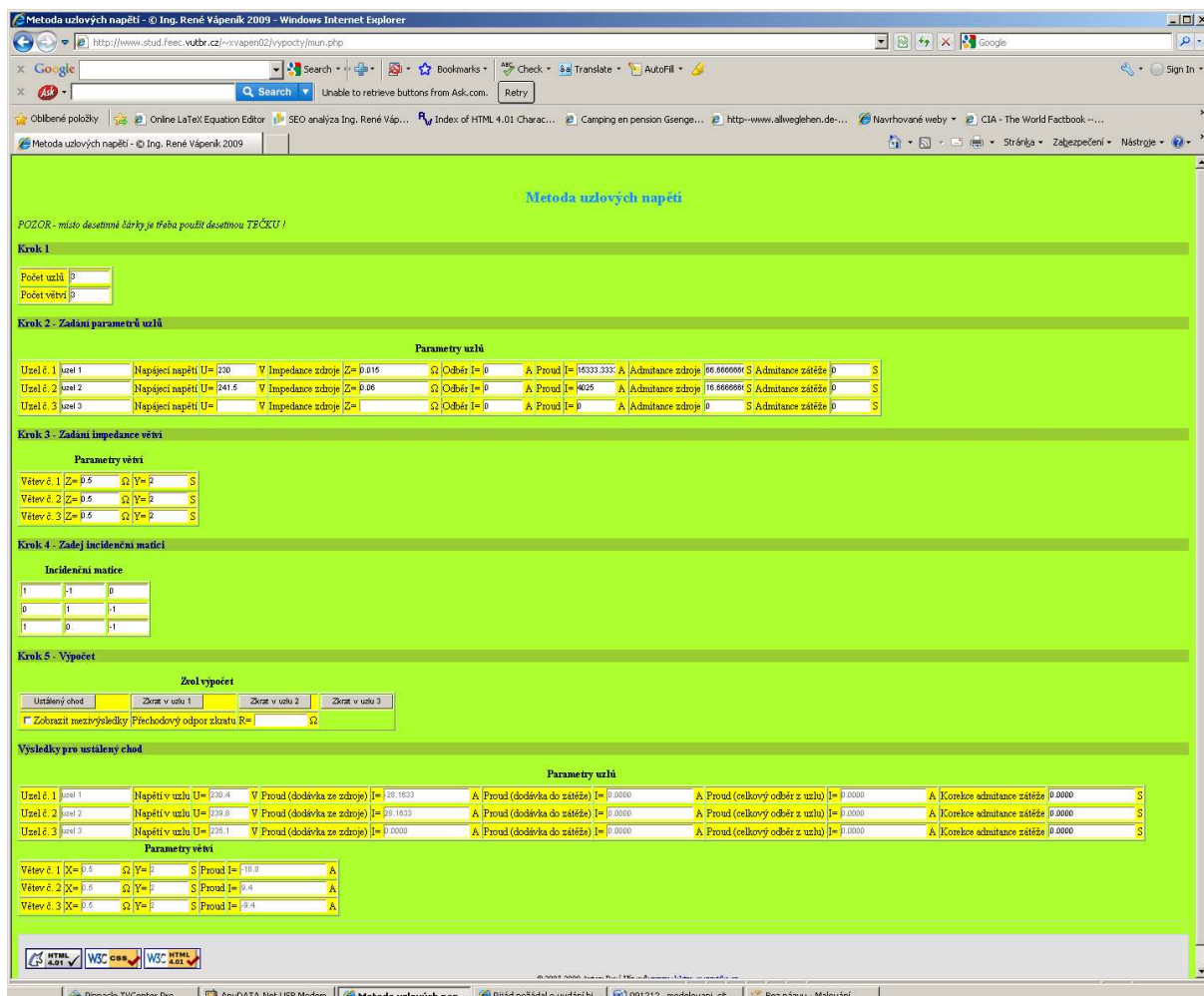
Výsledek

$$[I_z] = \begin{bmatrix} -28,16 \\ 28,16 \\ 0 \end{bmatrix} \text{ A} \quad (1.17)$$

Tím máme proveden kompletní výpočet ustáleného chodu dané sítě bez zátěže (naprázdno).



Obr. 1-6 Topologická mapa sítě s vyznačenými napěťovými a proudovými poměry



Obr. 1-7 Snímek obrazovky se zobrazením výsledků



### 1.1.1 Výpočet zkratu v síti bez zátěže (s nulovým odporem zkratu).

Předpokládejme síť jako v předchozím příkladu. Pro výpočet zkratu v  $i$ -tém uzlu (při nulovém přechodovém odporu zkratu) se tento uzel spojí s uzlem 0. V matematickém vyjádření to představuje následujícím kroky.

Definujeme redukovanou uzlovou impedanční matici  $Y_r$ , kterou vytvoříme tak, že z uzlové admitanční matice  $Y$  vynecháme  $i$ -tý sloupec a  $i$ -tý řádek.

V následujícím výpočtu předpokládejme zkrat v uzlu č. 2, vynecháme tedy druhý řádek a druhý sloupec.

$$[Y_R] = \begin{bmatrix} 70,66 & -2 \\ -2 & 4 \end{bmatrix} \text{ S} \quad (1.18)$$

V matici zdrojů vynecháme  $i$ -tý řádek

$$[I_R] = \begin{bmatrix} 15333,33 \\ 0 \end{bmatrix} \text{ A} \quad (1.19)$$

Dle následujícího vztahu vypočteme napětí v jednotlivých uzlech:

$$[U_R] = [Y_R]^{-1} \cdot [I_R] \quad (1.20)$$

Dostáváme výsledek

$$[U_R] = \begin{bmatrix} 220,1 \\ 110 \end{bmatrix} \text{ V} \quad (1.21)$$

Napětí v uzlu č. 2 je rovno 0. Výsledná matice napětí jednotlivých uzlů je

$$[U] = \begin{bmatrix} 220,1 \\ 0 \\ 110 \end{bmatrix} \text{ V} \quad (1.22)$$

Proudy v jednotlivých větvích již spočítáme stejně jako v předchozím příkladě. Dostáváme:

$$[I_v] = [Y_v][K][U] = \begin{bmatrix} 440,2 \\ -220,1 \\ 220,1 \end{bmatrix} \text{ A} \quad (1.23)$$

Stejným způsobem spočítáme proud dodávaný ze zdrojů

$$[I_z] = [I] - [Y_z][U] = \begin{bmatrix} 660,3 \\ 4025 \\ 0 \end{bmatrix} \text{ A} \quad (1.24)$$

Zkratový proud, tzn. proud tekoucí z uzlu č. 2 (obecně z i-tého uzlu) do země dostaneme jako rozdíl bilance proudu v uzlu a proudu do uzlu dodávaného ze zdroje dle vztahu:

$$I_{ki}'' = \left( \sum_{j=1}^n K_{ji} \cdot I_{vj} \right) - I_{zi} \quad (1.25)$$

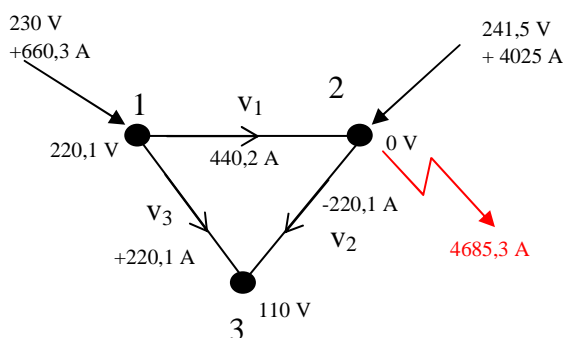
Bilanci proudů v i-tém uzlu dostaneme tak, že prvky i-tého sloupce incidenční matice vynásobíme příslušné prvky matice větvových proudů (j až n, kde n je počet větví.).

V našem konkrétním případě tedy dostáváme:

$$I_{k2}'' = (-1.440,2) + 1.(-220,1) + (0.220,1) - 4025 = -4685,3 \text{ A} \quad (1.26)$$

Znaménko minus označuje proud tekoucí z uzlu.

Velikost (absolutní hodnota) tohoto proudu odpovídá součtu proudu dodávaných zdroji. Při výpočtu jsme neuvažovali odběry.



Obr. 1-8 Topologická mapa sítě s vyznačenými napěťovými a proudovými poměry

Výsledky pro zkratovaný uzel č. 2											
Parametry uzlů											
Uzel č. 1	Uzel 1	Napětí v uzlu U=	220,1 V	Proud (dodávka ze zdroje) I=	660,2871 A	Proud (dodávka do zátěže) I=	0,0000 A	Proud (celkový odběr z uzlu) I=	0,0000 A	Korekce admittance zátěže	0,0000 S
Uzel č. 2	Uzel 2	Napětí v uzlu U=	0,0 V	Proud (dodávka ze zdroje) I=	4025,0000 A	Proud (dodávka do zátěže) I=	0,0000 A	Proud (celkový odběr z uzlu) I=	-4685,2871 A	Korekce admittance zátěže	0,0000 S
Uzel č. 3	Uzel 3	Napětí v uzlu U=	110,0 V	Proud (dodávka ze zdroje) I=	0,0000 A	Proud (dodávka do zátěže) I=	0,0000 A	Proud (celkový odběr z uzlu) I=	0,0000 A	Korekce admittance zátěže	0,0000 S
Parametry větví											
Větev č. 1	X=	0,5	Y=	0	Proud I=	440,2 A					
Větev č. 2	X=	0,5	Y=	0	Proud I=	-220,1 A					
Větev č. 3	X=	0,5	Y=	0	Proud I=	220,1 A					

Zkratový proud tekoucí uzlem č. 2 je -4685,2871 A (znaménko - znáří proud tekoucí ven z uzlu)

Obr. 1-9 Snímek části obrazovky se zobrazením výsledků skriptu

### 1.1.2 Výpočet obvodu v síti bez zátěže (nenulový přechodový odpor zkratu)

Další případ, který může v obvodu nastat je zkrat v i-tém uzlu s nenulovým přechodovým odporem. Uvažujeme zkrat v uzlu č. 3 a přechodovou impedanci zkratu  $Z_k=5 \Omega$ . Tomu odpovídá admittance  $Y_k=0,2 \text{ S}$ .

Vytvoříme si příslušnou admitanční matici. Ta bude obsahovat až na prvek v i-tém řádku a i-tém sloupci, kde bude přechodová admittance zkratu. Ostatní prvky budou nulové.

$$[Y_k] = \begin{bmatrix} 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0,2 \end{bmatrix} S \quad (1.27)$$

Uzlovou admitanční matici obvodu dostaneme jako součet matic:

$$[Y] = [K^T][Y_v][K] + [Y_z] + [Y_k] \quad (1.28)$$

Po výpočtu dostáváme uzlovou admitanční matici

$$[Y] = \begin{bmatrix} 70,66 & -2 & -2 \\ -2 & 20,66 & -2 \\ -2 & -2 & 4,2 \end{bmatrix} S \quad (1.29)$$

Následující výpočty jsou stejné jako v první příkladě.

Matice uzlových napětí je:

$$[U] = [Y]^{-1} \cdot [I] = \begin{bmatrix} 230,1 \\ 238,6 \\ 223,2 \end{bmatrix} V \quad (1.30)$$

Proudy v jednotlivých větvích již spočítáme stejně jako v předchozím příkladě. Dostáváme:

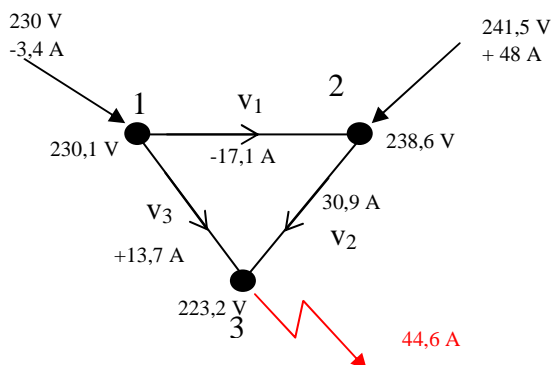
$$[I_v] = [Y_v][K][U] = \begin{bmatrix} -17,1 \\ 30,9 \\ 13,7 \end{bmatrix} A \quad (1.31)$$

Stejným způsobem spočítáme proud dodávaný ze zdrojů

$$[I_z] = [I] - [Y_z][U] = \begin{bmatrix} -3,4 \\ 48 \\ 0 \end{bmatrix} A \quad (1.32)$$

Velikost zkratového proudu bude:

$$I_{k3}'' = (0 \cdot (-17,1)) + (-1 \cdot 30,9) + (-1 \cdot 13,7) - 0 = -44,6 A \quad (1.33)$$



Obr. 1-10 Topologická mapa sítě s vyznačenými napěťovými a proudovými poměry

### 1.1.3 Výpočet chodu sítě s odběry

V našem případě bude odběr představovat proud z uzlu č. 1 o velikosti 10 A.

Ten nasimuluje admitancí

$$Y_{od1} = \frac{I_{od1}}{\max(U)} = \frac{10}{241,5} = 0,041 \text{ S} \quad (1.34)$$

Z jednotlivých admitancí simulujících zátěž vytvoříme diagonální matici:

$$[Y_{od}] = \begin{bmatrix} 0,041 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 \end{bmatrix} \text{ S} \quad (1.35)$$

Vytvoříme uzlovou admitanční matici dle vztahu:

$$[Y] = [K^T][Y_v][K] + [Y_z] + [Y_{od}] \quad (1.36)$$

Po výpočtu dostáváme uzlovou admitanční matici

$$[Y] = \begin{bmatrix} 70,71 & -2 & -2 \\ -2 & 20,66 & -2 \\ -2 & -2 & 4,2 \end{bmatrix} \text{ S} \quad (1.37)$$

Následující výpočty jsou stejné jako v první příkladě.

Matice uzlových napětí je:

$$[U] = [Y]^{-1} \cdot [I] = \begin{bmatrix} 230,3 \\ 239,8 \\ 235,2 \end{bmatrix} \text{ V} \quad (1.38)$$

Proudy v jednotlivých větvích již spočítáme stejně jako v předchozím příkladě. Dostáváme:

$$[I_v] = [Y_v][U] = \begin{bmatrix} -19,0 \\ 9,5 \\ -9,5 \end{bmatrix} \text{ A} \quad (1.39)$$

Stejným způsobem spočítáme proud dodávaný ze zdrojů

$$[I_z] = [I] - [Y_z][U] = \begin{bmatrix} -18,97 \\ 28,51 \\ 0 \end{bmatrix} \text{ A} \quad (1.40)$$

Proudy tekoucí z uzlů dostaneme vynásobením diagonální matice zátěže a matice uzolvých napětí:

$$[I_{od}] = [Y_{od}][U] = \begin{bmatrix} -9,54 \\ 0 \\ 0 \end{bmatrix} \text{ A} \quad (1.41)$$

Tento vypočtený proud se liší od proudu zadaného. Je to způsobeno tím, že průchodem proudu obvodem dochází k úbytkům napětí a to má za následek, že v místě odběru není jmenovité napětí zdroje (námi uvažovaných 241,5 V), ale napětí nižší.

Provedeme tudíž korekci admitance zátěže a to tak, že místo námi uvažovaných 241,5 V dosadíme vypočtené napětí v daném uzlu, znovu vypočteme admitanci simulující zátěž:

$$Y_{od1} = \frac{I_{od1}}{U_i} = \frac{10}{230,3} = 0,043 \text{ S} \quad (1.42)$$

A celý výpočet zopakujeme.

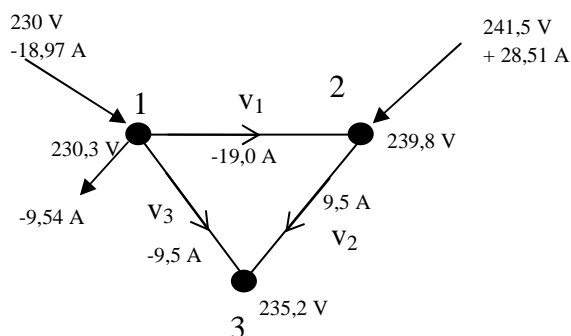
Již při druhém výpočtu dodáváme tyto, přesnější hodnoty:

$$[U] = [Y]^{-1} \cdot [I] = \begin{bmatrix} 230,3 \\ 239,8 \\ 235,2 \end{bmatrix} \text{ V} \quad (1.43)$$

$$[I_v] = [Y_v][K][U] = \begin{bmatrix} -19,0 \\ 9,5 \\ -9,5 \end{bmatrix} \text{ A} \quad (1.44)$$

$$[I_z] = [I] - [Y_z][U] = \begin{bmatrix} -18,53 \\ 28,53 \\ 0 \end{bmatrix} \text{ A} \quad (1.45)$$

$$[I_{od}] = [Y_{od}][U] = \begin{bmatrix} -9,99 \\ 0 \\ 0 \end{bmatrix} \text{ A} \quad (1.46)$$



Obr. 1-11 Topologická mapa sítě s vyznačenými napěťovými a proudovými poměry

### 1.1.4 Výpočet zkratu v síti se zátěží (s nulovým odporem zkratu)

V předchozích případech byly shrnuty základní varianty výpočtu chodu sítě. Výpočet zkratu (ať již s nulovým či nenulovým odporem) v síti s odběry je již kombinací předchozích zevrubně popsanych postupů. Následující část je omezena jen na výsledky.

Pro zkrat v uzlu č. 2 s nulovou přechodovou impedancí zkratu dostáváme:

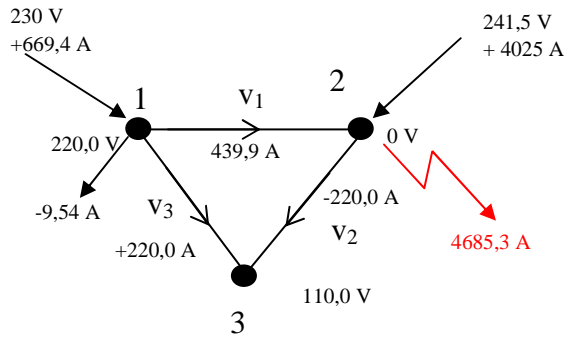
$$[U] = [Y]^{-1} \cdot [I] = \begin{bmatrix} 220,0 \\ 0 \\ 110,0 \end{bmatrix} \text{ V} \quad (1.47)$$

$$[I_v] = [Y_v][K][U] = \begin{bmatrix} 439,9 \\ -220 \\ 220 \end{bmatrix} \text{ A} \quad (1.48)$$

$$[I_z] = [I] - [Y_z][U] = \begin{bmatrix} 669,4 \\ 4025 \\ 0 \end{bmatrix} \text{ A} \quad (1.49)$$

$$[I_{od}] = [Y_{od}][U] = \begin{bmatrix} -9,54 \\ 0 \\ 0 \end{bmatrix} \text{ A} \quad (1.50)$$

a zkratový proud  $I_{k2}'' = -4684,88 \text{ A}$



Obr. 1-12 Topologická mapa sítě s vyznačenými napěťovými a proudovými poměry

### 1.1.5 Výpočet zkratu v síti se zátěží (s nenulovým odporem zkratu)

Předpokládejme zkrat v uzlu č. 3 a přechodový odpor zkratu  $5 \Omega$ .

Matice uzlových napětí je:

$$[U] = [Y]^{-1} \cdot [I] = \begin{bmatrix} 229,9 \\ 238,6 \\ 223,2 \end{bmatrix} \text{ V} \quad (1.51)$$

Proudy v jednotlivých větvích již spočítáme stejně jako v předchozím příkladě. Dostáváme:

$$[I_v] = [Y_v][K][U] = \begin{bmatrix} -17,4 \\ 31 \\ 13,6 \end{bmatrix} \text{ A} \quad (1.52)$$

Stejným způsobem spočítáme proud dodávaný ze zdrojů

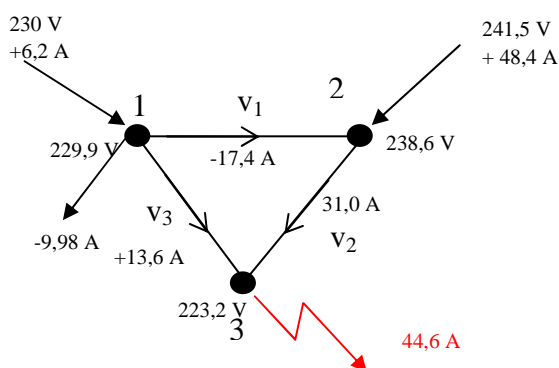
$$[I_z] = [I] - [Y_z][U] = \begin{bmatrix} 6,2 \\ 48,4 \\ 0 \end{bmatrix} \text{ A} \quad (1.53)$$

A proudy dodávané do zátěže:

$$[I_{od}] = [Y_{od}][U] = \begin{bmatrix} -9,98 \\ 0 \\ 0 \end{bmatrix} \text{ A} \quad (1.54)$$

Velikost zkratového proudu bude:

$$I_{k3}'' = (0 \cdot (-17,4)) + (-1 \cdot 31) + (-1 \cdot 13,6) - 0 = -44,6 \text{ A}$$



Obr. 1-13 Topologická mapa sítě s vyznačenými napěťovými a proudovými poměry



Příslušný PHP skript je navržen tak, že korekce admitance zátěže se provádí jen při výpočtu ustáleného stavu. Při výpočtu zkratu se tato korekce neprovádí, neboť v důsledku zkratu dochází k poklesu napětí a tím i poklesu proudu zátěže a korekcí tohoto proudu bychom zkreslili výpočet.

## 1.2 Shrnutí:

Výpočtem jsme ukázali, že zkratový proud v nezatíženém obvodu je největší, zatím co v zatíženém obvodu bude menší o proud, který teče do zátěže.

Toto zjednodušení ale nemusí obecně platit. Zde záleží na charakteru zátěže. Pokud se bude jednat o čistě ohmickou zátěž např. elektrotepelných spotřebičů, bude toto tvrzení pravdivé. Avšak pokud zátěž budou tvořit velké motory, naopak při zkratu síti se začnou chovat jako generátory a zkratový proud mohou zvýšit.

### 1.2.1 Další postup – dopočet jiných typů zkratů

Zde jsme provedli výpočet třífázového zkratu při různých stavech sítě a pro různou velikost přechodového odporu zkratu. Jiné typy zkratu můžeme následně dopočítat dle následujícího postupu:

Máme danou velikost ekvivalentního zdroje napětí  $E''$  a vypočítanou velikost zkratového proudu. Jednoduchým způsobem můžeme vypočítat velikost sousledné složky náhradní impedance dle vztahu.

$$Z_1 = \frac{E''}{I^{(3)}} \quad (1.55)$$

V dalších výpočtech předpokládáme, že pro velikosti impedance složkové soustavy platí:

$$Z_2 = Z_1 \quad (1.56)$$

$$Z_0 = 0,8 \cdot Z_1 \quad (1.57)$$

Velikosti zkratových proudů dostaneme dle následujících vztahů[2]:

Trojfázový zkrat:

$$I_k^{(3)} = I_1 = \frac{E''}{Z_1} \quad (1.58)$$

Jednofázový zkrat

$$I_k^{(1)} = 3 \cdot I_1 = 3 \cdot \frac{E''}{Z_1 + Z_2 + Z_0} \quad (1.59)$$

Dvoufázový zkrat

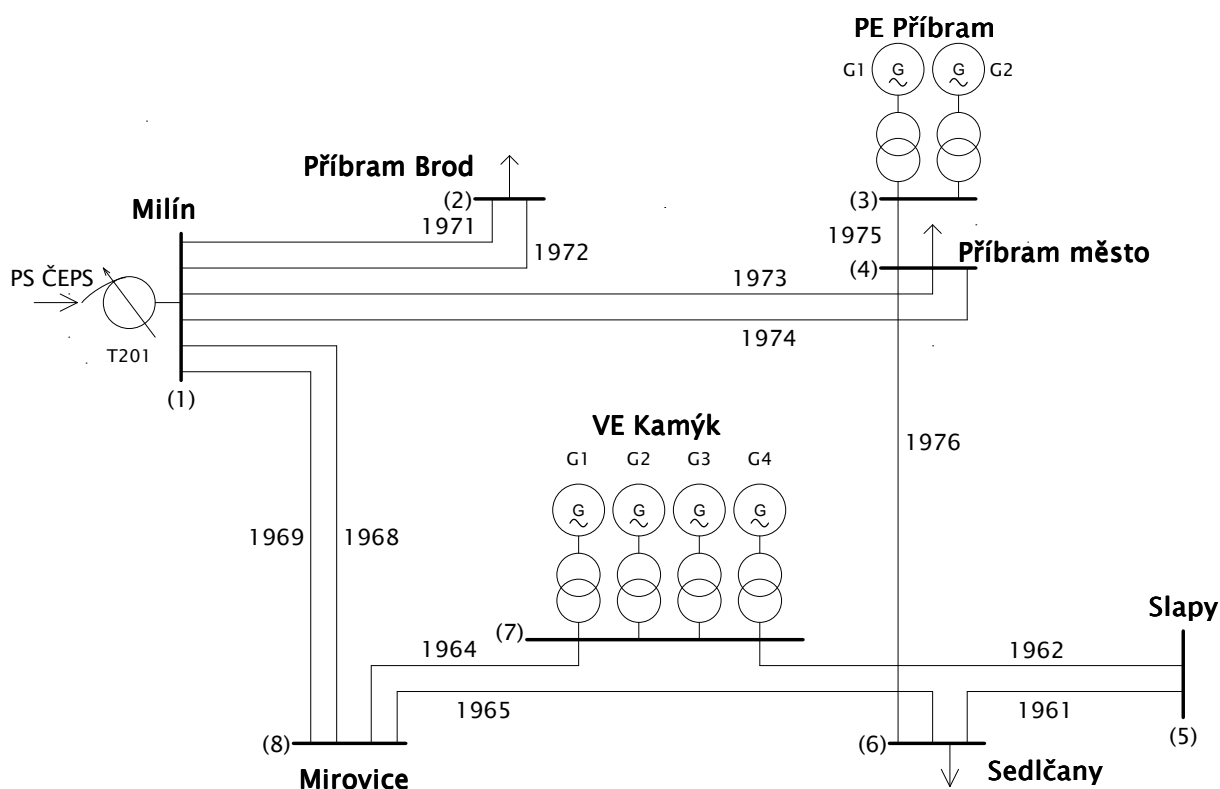
$$I_k^{(2)} = \sqrt{3} \cdot I_1 = \sqrt{3} \cdot \frac{E''}{Z_1 + Z_2} \quad (1.60)$$

Dvoufázový zemní zkrat

$$I_k^{(2,N)} = \sqrt{3} \cdot \sqrt{1 - \frac{Z_2 \cdot Z_0}{(Z_1 + Z_0)^2}} \cdot I_1 = \sqrt{3} \cdot \sqrt{1 - \frac{Z_2 \cdot Z_0}{(Z_1 + Z_0)^2}} \cdot \frac{E''}{Z_1 + \frac{Z_2 \cdot Z_0}{Z_2 + Z_0}} \quad (1.61)$$

## 2 PRAKTICKÝ VÝPOČET CHODU REÁLNÉ SÍTĚ

Předmětem projektu je porovnání různých variant výpočtu třífázového zkratu na vybrané části ES České republiky a daném místě poruchy. Pro výpočet byla vybrána část distribuční sítě 110 kV napájená z uzlové transformovny 220/110 kV Milín. Do této sítě pracují dvě elektrárny a to VE Kamýk a PE Příbram.



Obr. 2-1 Schéma sítě vvn

### 2.1 Vstupní parametry

*Technické údaje jsou fiktivní !*

Zkratový výkon přenosové soustavy ČEPS

Tab. 2-1 Parametry soustavy

Místo	Zkratový výkon soustavy [MVA]	Reaktance [ $\Omega$ ]
Uzel Milín	3500	$X_s = 3,46\Omega$

Tab. 2-2 Parametry generátorů

Stanice	Označení	Výkon [MVA]	$e_k$ [%]	Reaktance [ $\Omega$ ]
---------	----------	-------------	-----------	------------------------

PE Příbram	G1	40	12	$X_{TG1} = 36,3\Omega$
PE Příbram	G2	4,3	10	$X_{TG2} = 281,4\Omega$
VE Kamýk	G1	10	10	$X_{HG1} = 121\Omega$
VE Kamýk	G2	10	10	$X_{HG2} = 121\Omega$
VE Kamýk	G3	10	10	$X_{HG3} = 121\Omega$
VE Kamýk	G4	10	10	$X_{HG4} = 121\Omega$

Tab. 2-3 Parametry transformátorů

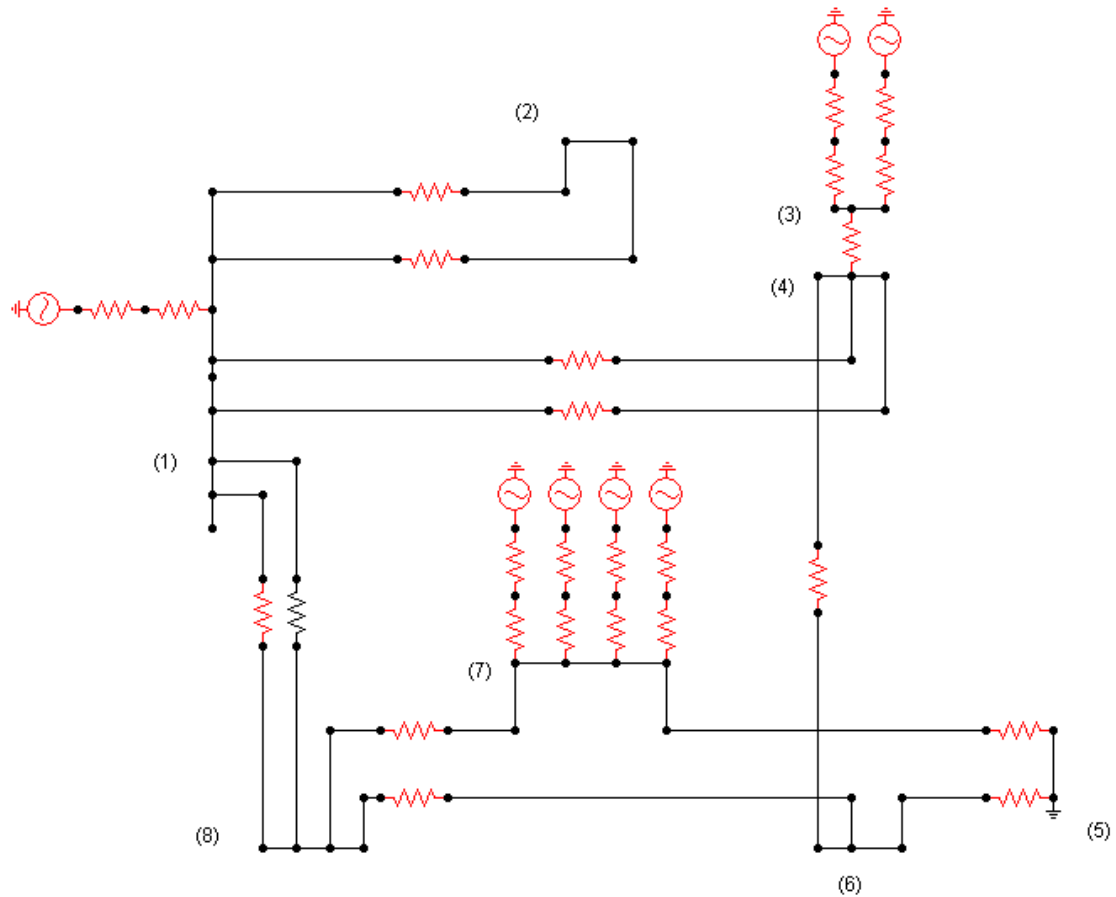
Stanice	Označení	Výkon [MVA]	$u_k$ [%]	Reaktance [ $\Omega$ ]
Milín	T201	200	12	$X_{T201} = 7,26\Omega$
PE Příbram	T1	40	11	$X_{T1} = 33,275\Omega$
PE Příbram	T2	10	10	$X_{T2} = 121\Omega$
VE Kamýk	T1	10	10	$X_{TG1} = 121\Omega$
VE Kamýk	T2	10	10	$X_{TG2} = 121\Omega$
VE Kamýk	T3	10	10	$X_{TG3} = 121\Omega$
VE Kamýk	T4	10	10	$X_{TG4} = 121\Omega$

Tab. 2-4 Parametry vedení

Vedení	Označení	Měrná reaktance [ $\Omega \cdot km^{-1}$ ]	délka [km]	Reaktance [ $\Omega$ ]
Slapy – Sedlčany	V1961	0,4	34	$X_{V1961} = 13,6\Omega$
Slapy – VE Kamýk	V1962	0,4	26	$X_{V1962} = 10,4\Omega$
VE Kamýk – Mirovice	V1964	0,4	27	$X_{V1964} = 10,8\Omega$
Sedlčany – Mirovice	V1965	0,4	36	$X_{V1965} = 14,4\Omega$
Milín - Mirovice	V1968	0,4	10	$X_{V1968} = 4\Omega$
Milín – Mirovice	V1969	0,4	10	$X_{V1969} = 4\Omega$
Milín – Příbram Brod	V1971	0,4	9	$X_{V1971} = 3,6\Omega$
Milín – Příbram Brod	V1972	0,4	9	$X_{V1972} = 3,6\Omega$
Milín – Příbram Město	V1973	0,4	14	$X_{V1973} = 5,6\Omega$
Milín – Příbram Město	V1974	0,4	14	$X_{V1974} = 5,6\Omega$

Příbram Město – PE Příbram	V1975	0,4	2	$X_{V1975} = 0,8\Omega$
Sedlčany – Příbram Město	V1976	0,4	36	$X_{V1976} = 14,4\Omega$

## 2.2 Výpočet metodou uzlových napětí



Obr. 2-2 Náhradní schéma sítě vvn

Přepočet zdrojů

Tab. 2-5 Přepočtené parametry zdrojů připojených do jednotlivých uzlů

Uzel č.	Napětí [V]	Impedance [ $\Omega$ ]	Proud [A]	Admittance [S]
1	$110\,000/\sqrt{3}$	10,72	5 924,31	0,0933
3	$110\,000/\sqrt{3}$	59,3	1070,97	0.0169
7	$110\,000/\sqrt{3}$	60,5	1049,73	0.0165

Příslušná matice proudů má tvar:

$$[I] = \begin{bmatrix} 5924,31 \\ 0 \\ 1070,97 \\ 0 \\ 0 \\ 0 \\ 1049,73 \\ 0 \end{bmatrix} \text{ A} \quad (2.1)$$

Matice admitancí zdrojů:

$$[Y_z] = \begin{bmatrix} 0,0933 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0,0169 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0,0165 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \end{bmatrix} \text{ S} \quad (2.2)$$

V následující tabulce jsou shrnuty parametry jednotlivých větví

Tab. 2-6 Parametry jednotlivých větví

Větev č.	Vedení	Větev mezi uzly	Reaktance [ $\Omega$ ]	Admittance [S]
1	V1971	1 – 2	3,6	0,2778
2	V1972	1 - 2	3,6	0,2778
3	V1973	1 – 4	5,6	0,1786
4	V1974	1 – 4	5,6	0,1786
5	V1968	1 - 8	4	0,25
6	V1969	1 - 8	4	0,25
7	V1975	3 – 4	0,8	1,2500
8	V1976	4 – 6	14,4	0,0694
9	V1961	5 – 6	13,6	0,0735
10	V1962	5 – 7	10,4	0,0962
11	V1965	6 – 8	14,4	0,0694
12	V1964	7 - 8	10,8	0,0926



Výsledná uzlová admitanční matice má tvar

$$[Y] = \begin{bmatrix} 1,5060 & -0,5556 & 0 & -0,3571 & 0 & 0 & 0 & -0,5 \\ -0,5556 & 0,5556 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1,2669 & -1,25 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ -0,3571 & 0 & -1,25 & 1,6765 & 0 & -0,0694 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0,1697 & -0,0735 & -0,0962 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & -0,0694 & -0,0735 & 0,2123 & 0 & -0,0694 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & -0,0962 & 0 & 0,2053 & -0,0926 \\ -0,5 & 0 & 0 & 0 & 0 & -0,0694 & -0,0926 & 0,6620 \end{bmatrix} \quad (2.5)$$

### 2.2.1 Výpočet chodu sítě bez zátěže při zkratu v uzlu a pro nulový odpor zkratu

Pro výpočet zkratu v místě uzlu  $x$  vynecháme z uzlové admitanční matice  $[Y]$   $x$ -tý sloupec a  $x$ -tý řádek a vytvoříme tak redukovanou uzlovou admitanční matici  $[Y_R]$ .

Pro výpočet zkratu v místě uzlu 5 vynecháme z matice 5 řádek a 5 sloupec. Obdobně z matice proudu

$$[I_R] = \begin{bmatrix} 5924,31 \\ 0 \\ 1070,97 \\ 0 \\ 0 \\ 1049,73 \\ 0 \end{bmatrix} A \quad (2.6)$$

$$[Y_R] = \begin{bmatrix} 1,5060 & -0,5556 & 0 & -0,3571 & 0 & 0 & -0,5 \\ -0,5556 & 0,5556 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1,2669 & -1,25 & 0 & 0 & 0 \\ -0,3571 & 0 & -1,25 & 1,6765 & -0,0694 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & -0,0694 & 0,2123 & 0 & -0,0694 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0,2053 & -0,0926 \\ -0,5 & 0 & 0 & 0 & -0,0694 & -0,0926 & 0,6620 \end{bmatrix} S \quad (2.7)$$

Vynásobením matic dostaneme napětí v jednotlivých uzlech

$$[U_R] = [Y_R][I_R] \quad (2.8)$$



Dostáváme výsledek

$$[U_R] = \begin{bmatrix} 37364 \\ 37364 \\ 36416 \\ 36050 \\ 22713 \\ 20191 \\ 33423 \end{bmatrix} \text{ V} \quad (2.9)$$

Napětí v uzlu č. 5 je rovno 0. Výsledná matice napětí jednotlivých uzlů je

$$[U] = \begin{bmatrix} 37364 \\ 37364 \\ 36416 \\ 36050 \\ 0 \\ 22713 \\ 20191 \\ 33426 \end{bmatrix} \text{ V} \quad (2.10)$$

Proudy v jednotlivých větvích již spočítáme stejně jako v předchozím příkladě. Dostáváme:

$$[I_v] = [Y_v][K][U] = \begin{bmatrix} 0 \\ 0 \\ 234,6 \\ 234,6 \\ 984,7 \\ 984,7 \\ 456,8 \\ 926,2 \\ -1670,1 \\ -1941,4 \\ -743,9 \\ -1225,5 \end{bmatrix} \text{ A} \quad (2.11)$$

Stejným způsobem spočítáme proud dodávaný ze zdrojů

$$[I_z] = [I] - [Y_z][U] = \begin{bmatrix} 2439 \\ 0 \\ 457 \\ 0 \\ 0 \\ 0 \\ 716 \\ 0 \end{bmatrix} \text{ A} \quad (2.12)$$

Zkratový proud, tzn. proud tekoucí z uzlu č. 5 (obecně z i-tého uzlu) do země dostaneme jako rozdíl bilance proudu v uzlu a proudu do uzlu dodávaného ze zdroje dle vztahu:

$$I_{ki}'' = \left( \sum_{j=1}^n K_{ji} \cdot I_{vj} \right) - I_{zi} = -3612 \text{ A} \quad (2.13)$$

V příloze A jsou uvedeny hodnoty vypočítané pro zkrat v jednotlivých uzlech.

### 2.2.2 Výpočet chodu sítě bez zátěže při zkratu v uzlu a pro nenulový odpor zkratu

Při výpočtu jsme předpokládali velikost impedance zkratu 2 ohmy. Postup výpočtu je popsán v čl. 1.1.2. Výsledky jsou uvedeny v příloze B.

### 2.2.3 Výpočet ustáleného chodu sítě se zátěží

Odběry z jednotlivých uzlů nasimulujeme pomocí admitancí připojených mezi daný uzel a referenční zem (uzel 0).

V následující tabulce jsou nadefinovány velikosti odběru z jednotlivých uzlů. Současně jsou zde uvedeny hodnoty náhradních admitancí včetně korigovaných hodnot. V prvním přiblížení provedeme výpočet náhradní admitanci při uvažování jmenovitého napětí. Díky úbytkům napětí je ale skutečné napětí v jednotlivých uzlech nižší. V dalších, opakujících se výpočtech jsou uvažovány již vypočtené (nižší) hodnoty napětí v jednotlivých uzlech. Již po druhé korekci odchylka vypočtené zátěže je minimální od zátěže zadané.

Přesný postup výpočtu je popsán v čl. 1.1.3.

Tab. 2-7 Tabulka odběru z jednotlivých uzlů

Uzel č.	Název uzlu	Odběr [MW]	Účinník $\cos \varphi$	Proud [A]	Náhradní admittance [S]	Náhradní admittance po 1. korekci	Náhradní admittance po 2. korekci
1	Milín	-0,5	0,95	-2,76	0,000043	0,000045	0,000045
2	Příbram Brod	-15	0,95	-82,87	0,001305	0,001365	0,001367
3	PE Příbram	-3	0,95	-16,57	0,000261	0,000274	0,000274
4	Příbram Město	-26	0,95	-143,65	0,002261	0,002374	0,002379
6	Sedlčany	-19	0,95	-104,97	0,001653	0,001745	0,001749
7	VE Kamýk	-1	0,95	-5,52	0,000086	0,000091	0,000091

V následujících tabulkách jsou shrnuty výsledky výpočtů pro chod dané sítě s definovanou zátěží.

Tab. 2-8 Parametry v uzlech při chodu se zátěží

č.	Název	Fázové napětí [V]	Dodávka ze zdroje [A]	Výkon zdroje [MVA]	Odběr z uzlu [A]	Odběr z uzlu [MVA]
1	TR Milín	60740,5	258,2	47,05	-2,76	-0,50
2	TR Příbram Brod	60591,4		0,00	-82,86	-15,06
3	PE Příbram	60394,4	52,5	9,51	-16,57	-3,00
4	TR Příbram město	60365,6		0,00	-143,63	-26,01
5	TR Slapy	60420,8		0,00	0	0,00
6	TR Sedlčany	59987,9		0,00	-104,96	-18,89
7	VE Kamýk	60751,9	45,6	8,31	-5,52	-1,01
8	TR Mirovice	60663,2		0,00	0	0,00

Tab. 2-9 Proudý tekoucí jednotlivými větvemi (vedeními) při chodu se zátěží

č. větve	Číslo vedení	Proud [A]
1	V1971	41,4
2	V1972	41,4
3	V1973	67,0
4	V1974	67,0
5	V1968	19,3
6	V1969	19,3
7	V1975	35,9
8	V1976	26,2
9	V1961	31,8
10	V1962	-31,8
11	V1965	-46,9
12	V1964	8,2

#### 2.2.4 Výpočet ustáleného chodu sítě se zátěží a pro nulový odpor zkratu

Postup výpočtu je popsán v čl. 1.1.4. Výsledky jsou uvedeny v příloze C.

#### 2.2.5 Výpočet ustáleného chodu sítě se zátěží a pro nenulový odpor zkratu

Postup výpočtu je popsán v čl. 1.1.5. Výsledky pro uvažovaný odpor zkratu 2 ohmy jsou uvedeny v příloze D.

## 2.3 Závěr

Při těchto výpočtech jsme zanedbávali činný odpor a uvažovali pouze moduly impedancí vedení, transformátorů a zdrojů. Výpočet byl rovněž zjednodušen zanedbáním příčných admitancí vedení. Díky těmto zjednodušujícím předpokladům jsme mohli výpočet provádět jen v oboru reálných čísel.

Tab. 2-10 Shrnutí výsledků – velikosti zkratových proudů (v A)

Zátěž		ne	ano	ne	ano
Přechodový odpor zkratu [Ω]		0	0	2	2
Zkrat v uzlu č.	1	-7831,1	-7816,4	-6281,9	-6216,5
	2	-6408,6	-6359,1	-5332,5	-5255,8
	3	-6153,1	-6108,1	-5154,4	-5080,5
	4	-6486,4	-6456,5	-5386,2	-5318,7
	5	-3611,6	-3524,2	-3242,8	-3156,0
	6	-4495,0	-4431,7	-3937,6	-3861,2
	7	-4477,2	-4389,7	-3924,0	-3835,4
	8	-6676,6	-6627,3	-5516,7	-5438,9

Velikost zkratového proudu je nejvyšší v případě chodu dané sítě bez zátěže a se zanedbatelnou velikostí přechodového odporu zkratu. Vliv zátěže na velikost zkratu je poměrně malý, činí cca 1 % z velikosti zkratového proudu. Oproti tomu výrazný vliv na velikost zkratového proudu má vlastní velikost přechodové impedance zkratu. Tento vliv bude tím větší, čím menší je impedance dané sítě.

Dle vzorců uvedených v čl. 1.2.1 byli následně dopočteny velikosti zkratových proudů pro různé typy zkratu. Tyto hodnoty byly vypočteny pouze pro stav sítě bez zátěže a pro ideální kovový zkrat se zanedbatelnou impedancí. Při výpočtech jsme předpokládali, že pro velikosti impedance složkové soustavy platí:

$$Z_2 = Z_1 \quad (2.14)$$

$$Z_0 = 0,8 \cdot Z_1 \quad (2.15)$$

Velikosti zkratových proudů byly vypočteny dle následujících vztahů[2]:

Trojfázový zkrat

$$I_k^{(3)} = I_1 = \frac{E''}{Z_1} \quad (2.16)$$

Jednofázový zkrat

$$I_k^{(1)} = 3 \cdot I_1 = 3 \cdot \frac{E''}{Z_1 + Z_2 + Z_0} \quad (2.17)$$

Dvoufázový zkrat

$$I_k^{(2)} = \sqrt{3} \cdot I_1 = \sqrt{3} \cdot \frac{E''}{Z_1 + Z_2} \quad (2.18)$$

Dvoufázový zemní zkrat

$$I_k^{(2,N)} = \sqrt{3} \cdot \sqrt{1 - \frac{Z_2 \cdot Z_0}{(Z_1 + Z_0)^2}} \cdot I_1 = \sqrt{3} \cdot \sqrt{1 - \frac{Z_2 \cdot Z_0}{(Z_1 + Z_0)^2}} \cdot \frac{E''}{Z_1 + \frac{Z_2 \cdot Z_0}{Z_2 + Z_0}} \quad (2.19)$$

Výsledky jsou uvedeny v příloze E.

## POUŽITÁ LITERATURA

- [1] ARRILLAGA J.,ARNOLD C.P., Computer analysis of power systems, University of Canterbury, Christchurs, New Zealand.
- [2] BLAŽEK V., Přenosové sítě, Brno 2007, VUT.
- [3] BROŽA P., Tvorba WWW stránek pro úplné začátečníky, Praha 1999, Computer Press, ISBN 80-7226-164-9
- [4] BUBENÍK, F.,PULTAR, M., PULTAROVÁ, I. Matematické vzorce a metody. Praha 1997, ČVUT, ISBN 80-01-01643-9.
- [5] BUDINSKÝ B., CHARVÁT J., Matematika I, Praha 1987, SNTL.
- [6] CASTAGNETTO J., RAWAT H., SCHUMANN S., SCOLLO C., VELIATH D., Programujeme PHP profesionálně, Praha 2001, Computer Press, ISBN 80-7226-310-2.
- [7] HODINKA, M., FECKO, Š., NĚMEČEK F., Přenos a rozvod elektrické energie, Praha 1989, SNTL, ISBN 80-03-00065-3.
- [8] KOLCUN M., CHLADNÝ V., VARGA L., Počítačová analýza elektrizačnej sústavy, Technická univerzita Košice 2006, ISBN 80-8073-453-4.
- [9] MIKULEC, M., HAVLÍČEK, V., Základy teorie elektrických obvodů 1, Praha 1997, ČVUT, ISBN 80-01-01620-X.
- [10] MIKULEC, M., HAVLÍČEK, V., Základy teorie elektrických obvodů 2, Praha 1998, ČVUT, ISBN 80-01-01778-8.
- [11] SEDLAČEK J., VALSA J., Elektrotechnika II, Brno 2003, VUT.
- [12] TOMAN P., Teorie souměrných složek, [disk]. Brno 2005, VUT. [cit.2009-05-10]

## Příloha A Shrnutí výsledků pro chod dané sítě bez zátěže a pro nulový odpor zkratu

Tab. 0-1 Fázové napětí v jednotlivých uzlech při zkratu (ve V)

Uzel		Zkrat v uzlu č.							
č.	Název	1	2	3	4	5	6	7	8
1	TR Milín	0	11535.5212	16592.6891	13383.8063	37364.8834	29286.1429	32381.5507	10790.8849
2	TR Příbram Brod	0	0	16592.6891	13383.8063	37364.8834	29286.1429	32381.5507	10790.8849
3	PE Příbram	3798.7401	14644.2624	0	845.3644	36416.2394	26481.8216	32442.2207	12812.6451
4	TR Příbram město	2993.2189	13985.0552	4065.6958	0	36050.7519	25982.3116	32023.1208	12128.7280
5	TR Slapy	6821.2436	17117.7618	17351.3387	14194.3456	0	12734.9622	9808.9199	7896.4752
6	TR Sedlčany	3887.5342	14716.9281	12823.6840	9357.0113	22713.5867	0	22635.9690	6698.5563
7	VE Kamýk	9064.6684	18953.6934	20813.6628	17893.4835	20191.0659	22473.4628	0	8812.5308
8	TR Mirovice	1675.5691	12906.7418	6787.6849	13592.1393	33426.1016	25261.3475	26830.3987	0

Tab. 0-2 Příspěvek jednotlivých zdrojů do zkratu (v A)

Zdroj		Zkrat v uzlu č.							
Uzel č.	Název	1	2	3	4	5	6	7	8
1	TR Milín	5924.3031	4848.1790	4376.4283	4675.7643	2438.7236	3192.3374	2903.5867	4917.6413
3	PE Příbram	1006.9015	824.0091	1070.9701	1056.7055	456.8594	624.3875	523.8749	854.8964
7	VE Kamýk	899.8898	736.4348	705.6915	753.9590	715.9824	678.2568	1049,7278	904.0573



Tab. 0-3 Velikost zkratového proudu (v A)

Zkrat uzlu č.							
1	2	3	4	5	6	7	8
-7831,1103	-6408.6229	-6153,1324	-6486.4288	-3611.5653	-4494.9817	-4477,2179	-6676.5950

Tab. 0-4 Proudů v jednotlivých vedeních

Vedení		Zkrat v uzlu č.							
č. větve	Číslo vedení	1	2	3	4	5	6	7	8
1	V1971	0	3204.3114	0	0	0	0	0	0
2	V1972	0	3204.3114	0	0	0	0	0	0
3	V1973	-534.5034	-437.4168	2236.9631	2389.9654	234.6663	589.9699	64.0053	-238.9006
4	V1974	-534.5034	-437.4168	2236.9631	2389.9654	234.6663	589.9699	64.0053	-238.9006
5	V1968	-418.8923	-342.8052	-48.7490	-52.0832	984.6955	1006.1989	1387.7880	2697.7212
6	V1969	-418.8923	-342.8052	-48.7490	-52.0832	984.6955	1006.1989	1387.7880	2697.7212
7	V1975	1006.9015	824.0091	-5082.1198	1056.7055	456.8594	624.3875	523.8749	854.8964
8	V1976	-62.1052	-50.8245	-608.1936	-649.7925	926.1920	1804.3272	651.8855	377.0953
9	V1961	215.7139	176.5319	332.9158	355.6863	-1670.1167	936.3943	-943.1654	88.0823
10	V1962	-215.7139	-176.5319	-332.9158	-355.6863	-1941.4486	-936.3943	943.1654	-88.0823
11	V1965	153.6087	125.7074	-275.2778	-294.1061	-743.9246	-1754.2602	-291.2798	465.1775
12	V1964	684.1759	559.9029	372.7757	398.2726	-1225.4663	-258.1375	-2484.2962	815.9751

## Příloha B Shrnutí výsledků pro chod dané sítě bez zátěže a pro nenulový odpor zkratu 2 ohmy

Tab. 0-5 Fázové napětí v jednotlivých uzlech při zkratu (ve V)

Uzel		Zkrat v uzlu č.							
č.	Název	1	2	3	4	5	6	7	8
1	TR Milín	12563,8	20263,4	24208,2	21886,2	40035,0	33530,2	36228,2	19949,7
2	TR Příbram Brod	12563,8	10664,9	24208,2	21886,2	40035,0	33530,2	36228,2	19949,7
3	PE Příbram	15611,1	22850,1	10308,7	11474,2	39183,2	31073,4	36281,4	21620,2
4	TR Příbram město	14964,9	22301,6	13714,5	10772,5	38855,0	30635,9	35914,1	21055,1
5	TR Slapy	18035,6	24908,3	24843,7	22559,2	6485,6	19031,1	16444,8	17558,1
6	TR Sedlčany	15682,3	22910,6	21050,9	18542,4	26879,8	7875,2	27686,9	16568,3
7	VE Kamýk	19835,2	26435,9	27744,0	25630,9	24614,8	27562,1	7847,9	18315,0
8	TR Mirovice	13907,9	21404,4	24371,5	22059,2	36498,4	30004,3	31363,0	11033,4

Tab. 0-6 Příspěvek jednotlivých zdrojů do zkratu (v A)

Zdroj		Zkrat v uzlu č.							
Uzel č.	Název	1	2	3	4	5	6	7	8
1	TR Milín	4752,3079	4034,0613	3666,0766	3882,6829	2189,6971	2796,5014	2544,8042	4063,3273
3	PE Příbram	807,7146	685,6395	897,1302	877,4720	410,2079	546,9661	459,1421	706,3801
7	VE Kamýk	721,8721	612,7709	591,1485	626,0759	649,8709	594,1559	920,0102	747,0006

Tab. 0-7 Velikost zkratového proudu (v A)

Zkrat uzlu č.							
1	2	3	4	5	6	7	8
-6281,8946	-5332,4718	-5154,3553	-5386,2309	-3242,7759	-3937,6235	-3923,9565	-5516,7079

Tab. 0-8 Proudů v jednotlivých vedeních

Vedení		Zkrat v uzlu č.							
č. větve	Číslo vedení	1	2	3	4	5	6	7	8
1	V1971	0	2666,2	0	0	0	0	0	0
2	V1972	0	2666,2	0	0	0	0	0	0
3	V1973	-428,8	-364,0	1873,9	1984,6	210,7	516,8	56,1	-197,4
4	V1974	-428,8	-364,0	1873,9	1948,6	210,7	516,8	56,1	197,4
5	V1968	-336,0	-285,2	-40,8	-43,2	884,1	881,4	1216,3	2229,1
6	V1969	-336,0	-285,2	-40,8	-43,2	884,1	881,4	1216,3	2229,1
7	V1975	807,7	685,6	-4257,2	877,5	410,2	547,0	459,1	706,4
8	V1976	-49,8	-42,3	-509,5	-539,6	831,6	1580,6	571,3	311,6
9	V1961	173,0	146,9	278,9	295,4	-1499,6	820,3	-826,6	72,8
10	V1962	-173,0	-146,9	-278,9	-295,4	-1743,2	-820,3	826,6	-72,8
11	V1965	123,2	104,6	230,6	-244,2	-668,0	-1536,7	-255,3	384,4
12	V1964	548,8	465,9	312,3	330,7	-1100,3	-226,1	-2177,3	674,2

## Příloha C Shrnutí výsledků pro chod dané sítě se zátěží a pro nulový odpor zkratu

Tab. 0-9 Fázové napětí v jednotlivých uzlech při zkratu (ve V)

Uzel		Zkrat v uzlu č.							
č.	Název	1	2	3	4	5	6	7	8
1	TR Milín	0	11446,3	16492,4	13327,4	36555,4	28900,2	31697,5	10718,3
2	TR Příbram Brod	0	0	16451,9	13294,6	36465,7	28829,2	31619,7	10691,9
3	PE Příbram	3771,0	14441,5	0	845,2	35443,2	26018,5	31558,1	12660,8
4	TR Příbram město	2966,0	13782,7	4029,7	0	35072,4	25518,5	31164,4	11977,6
5	TR Slapy	6780,7	16889,0	17176,3	14083,0	0	12615,7	9474,4	7816,0
6	TR Sedlčany	3829,8	14412,6	12608,7	9219,7	21971,8	0	21864,0	6567,2
7	VE Kamýk	9037,3	18782,7	20669,1	17802,0	19850,0	22263,1	0	8771,0
8	TR Mirovice	1665,7	12783,5	16669,2	13522,3	32689,3	24940,5	26232,8	0

Tab. 0-10 Příspěvek jednotlivých zdrojů do zkratu (v A)

Zdroj		Zkrat v uzlu č.							
Uzel č.	Název	1	2	3	4	5	6	7	8
1	TR Milín	5924,3097	4856,5570	4385,8364	4681,0858	2514,2884	3228,3939	2967,4489	4924,4720
3	PE Příbram	1007,3787	827,4690	1070,9713	1056,7186	473,2781	632,2104	538,2881	857,4670
7	VE Kamýk	900,3526	739,2716	708,0906	755,4810	721,6304	681,7444	1049,7289	904,7534

Tab. 0-11 Velikost zkratového proudu (v A)

Zkrat uzlu č.							
1	2	3	4	5	6	7	8
-7816,4256	-6359,0607	-6108,1169	-6456,5144	-3524,2263	-4431,7192	-4389,6934	-6627,3172

Tab. 0-12 Proudů v jednotlivých vedeních

Vedení		Zkrat v uzlu č.							
č. větve	Číslo vedení	1	2	3	4	5	6	7	8
1	V1971	0,0	3179,5	11,3	9,1	24,9	19,7	21,6	7,3
2	V1972	0,0	3179,5	11,3	9,1	24,9	19,7	21,6	7,3
3	V1973	-529,6	-417,2	2225,5	2379,9	264,8	603,9	95,2	-224,9
4	V1974	-529,6	-417,2	2225,5	2379,9	264,8	603,9	95,2	-224,9
5	V1968	-416,4	-334,3	-44,2	-48,7	966,5	989,9	1366,2	2679,6
6	V1969	-416,4	-334,3	-44,2	-48,7	966,5	989,9	1366,2	2679,6
7	V1975	1006,3	823,5	-5037,1	1056,5	463,6	625,1	529,6	854,0
8	V1976	-60,0	-43,7	-595,8	-640,3	909,8	1772,1	645,9	375,7
9	V1961	217,0	182,1	335,8	357,6	-1615,6	927,6	-911,0	91,8
10	V1962	-217,0	-182,1	-335,8	-357,6	-1908,7	-927,6	911,0	-91,8
11	V1965	150,3	113,1	-282,0	-298,8	-744,3	-1732,0	-303,4	456,1
12	V1964	682,6	555,5	370,4	396,3	-1188,8	-247,9	-2429,0	812,1



## Příloha D Výpočet ustáleného chodu sítě se zátěží a pro nenulový odpor zkratu 2 ohmy

Tab. 0-14 Fázové napětí v jednotlivých uzlech při zkratu (ve V)

Uzel		Zkrat v uzlu č.							
č.	Název	1	2	3	4	5	6	7	8
1	TR Milín	12432,9	19998,1	23936,7	21682,4	39082,0	32999,1	35364,6	19688,0
2	TR Příbram Brod	12402,4	10511,7	23878,0	21629,1	38986,0	32918,0	35277,8	19639,7
3	PE Příbram	15361,2	22413,6	10160,9	11338,8	38049,8	30443,8	35225,3	21220,1
4	TR Příbram město	14715,0	21864,1	13507,8	10637,5	37714,7	30004,4	34851,4	20654,3
5	TR Slapy	17760,2	24441,0	24451,8	22248,5	6312,1	18769,8	15907,1	17248,9
6	TR Sedlčany	15324,7	22319,1	20579,9	18165,9	25943,3	7722,4	26677,6	16146,3
7	VE Kamýk	19622,7	26063,7	27412,7	25370,5	24122,9	27217,8	7670,8	18092,0
8	TR Mirovice	13741,8	21089,9	24070,8	21829,3	35611,6	29539,1	30580,1	10877,8

Tab. 0-15 Příspěvek jednotlivých zdrojů do zkratu (v A)

Zdroj		Zkrat v uzlu č.							
Uzel č.	Název	1	2	3	4	5	6	7	8
1	TR Milín	4764,5140	4058,8093	3691,3897	3901,6922	2278,5978	2846,0322	2625,3659	4087,7352
3	PE Příbram	811,9278	693,0011	899,6225	879,7591	429,3215	557,5845	476,9520	713,1264
7	VE Kamýk	725,3860	618,9235	596,6249	630,3806	651,0020	599,8467	922,9370	750,6869

Tab. 0-16 Velikost zkratového proudu (v A)

Zkrat uzlu č.							
1	2	3	4	5	6	7	8
-6216,4698	-5255,8465	-5080,4573	-5318,7473	-3156,0482	-3861,2031	-3835,4207	-5438,9321

Tab. 0-17 Proudů v jednotlivých vedeních

Vedení		Zkrat v uzlu č.							
č. větve	Číslo vedení	1	2	3	4	5	6	7	8
1	V1971	8,5	2635,1	16,3	14,8	26,7	22,5	24,1	13,4
2	V1972	8,5	2635,1	16,3	14,8	26,7	22,5	24,1	13,4
3	V1973	-407,5	-332,2	1862,3	1972,3	244,2	534,8	91,6	-172,6
4	V1974	-407,5	-332,2	1862,3	1972,3	244,2	534,8	91,6	172,6
5	V1968	-327,2	-272,9	-33,5	-36,7	867,6	865,0	1196,1	2202,5
6	V1969	-327,2	-272,9	-33,5	-36,7	867,6	865,0	1196,1	2202,5
7	V1975	807,7	686,9	-4183,6	876,6	418,9	549,2	467,3	707,3
8	V1976	-42,3	-31,6	-491,1	-522,8	817,5	1457,4	567,6	313,1
9	V1961	179,1	156,0	284,7	300,2	-1443,5	812,3	-791,9	81,1
10	V1962	-179,1	-156,0	-284,7	-300,2	-1712,6	-812,3	791,9	-81,1
11	V1965	100,9	85,4	-242,4	-254,4	-671,4	-1515,0	-271,0	365,9
12	V1964	544,5	460,5	309,4	327,9	-1063,8	-214,9	-2121,2	668,0





## Příloha E Velikost jednotlivých typů zkratu pro chod bez zátěže

Tab. 0-19 Velikosti náhradních sousledných impedancí (v  $\Omega$ )

Zátěž	Přechodový odpor zkratu [ $\Omega$ ]	Zkrat v uzlu č.							
		1	2	3	4	5	6	7	8
ne	0	8,1098	9,9099	10,3213	9,7910	17,5848	14,1288	14,1848	9,5121
ano	0	8,1250	9,9871	10,3974	9,8363	18,0206	14,3304	14,4676	9,5828
ne	2	10,1098	11,9098	12,3213	11,7909	19,5846	16,1286	16,1848	11,5120
ano	2	10,2162	12,0834	12,5006	11,9405	20,1228	16,4479	16,5584	11,6767

Při praktických výpočtech se předpokládá pro zkrat ideální spojení se zanedbatelnou impedancí a rovněž se nepředpokládá odběr z jednotlivých uzlů. Hodnoty v následujících tabulkách jsou vypočteny pro tento stav (vstupní hodnoty jsou v prvním řádku tabulky 0.19)

Tab. 0-20 Velikosti náhradních impedancí složkové soustavy (v  $\Omega$ )

Impedance	Zkrat v uzlu č.							
	1	2	3	4	5	6	7	8
Sousledná $Z_1$	8,1098	9,9099	10,3213	9,7910	17,5848	14,1288	14,1848	9,5121
Zpětná $Z_2$ ( $Z_2 = Z_1$ )	8,1098	9,9099	10,3213	9,7910	17,5848	14,1288	14,1848	9,5121
Netočivá $Z_0$ ( $Z_0 = 0,8 \cdot Z_1$ )	6,4878	7,9279	8,2570	7,8328	14,0678	11,3030	11,3478	7,6097

Tab. 0-21 Velikosti zkratových proudů pro různé typy zkratu (v kA)

Typ zkratu	Zkrat v uzlu č.							
	1	2	3	4	5	6	7	8
Třífázový	7,83	6,41	6,15	6,49	3,61	4,49	4,48	6,68
Jednofázový	8,39	6,87	6,59	6,95	3,87	4,82	4,80	7,15
Dvoufázový	6,78	5,55	5,33	5,62	3,13	3,89	3,88	5,78
Dvoufázový zemní	8,15	6,67	6,40	6,75	3,76	4,68	4,66	6,95