

VYUŽITIE MATLABU PRI VYHODNOCOVANÍ KRÁTKODOBÝCH POKLESOV NAPÄTIA V TROJFÁZOVÝCH SÚSTAVÁCH

Štefan Lojek

Katedra výkonových elektrotechnických systémov, Elektrotechnická fakulta ŽU v Žiline

Abstrakt

V súčasnosti je problematike krátkodobých poklesov napájacieho napätia venovaná značná pozornosť, nakoľko tento jav najčastejšie zapríčiňuje zníženie kvality dodávanej elektrickej energie. Tieto nežiaduce poklesy zapríčiňujú poruchy zariadení, stratu informácií atď. Na ich komplexné hodnotenie v trojfázových sústavách bol v programe Matlab naprogramovaný software, ktorý poruchu zadeli do príslušnej triedy a zaznamená potrebné charakteristické parametre. Vstupnými dátami do programového výpočtu sú okamihové hodnoty z analyzátora kvality TOPAS 1000. Výstupom sú grafické závislosti jednotlivých charakteristických parametrov počas doby pôsobenia poklesu napätia, zadelenie do príslušnej triedy, vyčíslenie zmeny amplitúdy v percentách a zmeny fázy v stupňoch.

1 Čo je to krátkodobý pokles napätia (voltage dip)?

Norma STN EN 50 160 (33 0121): 2002 [1] definuje krátkodobý pokles napätia ako náhly pokles napájacieho napätia na hodnotu medzi 90 % a 1 % dohodnutého napätia, po ktorom nasleduje obnovenie napätia počas krátkeho časového intervalu (pozri obr. 2). Konvenčná doba trvania krátkodobého poklesu napätia je medzi 10 ms a 1 minútou, hĺbka krátkodobého poklesu je definovaná ako rozdiel medzi minimálnou efektívnou hodnotou napätia v priebehu krátkodobého poklesu a dohodnutým napätím. Pod pojmom dohodnuté napätie sa myslí menovité napätie siete, resp. napätie zmluvne potvrdené medzi dodávateľom a odberateľom. Zmeny napätia, ktoré neznižujú napätie na menej ako 90 % dohodnutého napätia sa nepovažujú za poklesy napätia [1]. V trojfázových sieťach sa za nekvalitnú dodávku elektrickej energie považuje stav, ak krátkodobý pokles napätia aspoň v jednej fáze nevyhovuje vyššie uvedenej podmienke. Však na podrobné vyhodnotenie zmeny napätia nestačí vyhodnocovať iba hĺbku najhlbšieho poklesu a čas jeho trvania. Tu často dochádza k nesymetrickým zmenám napätia, čo znamená, že veľkosť napätia v každej fáze nemusí byť rovnaká, pričom dochádza ku zmenám počiatovej fázy. Zmena amplitúdy napätia má všeobecný negatívny vplyv na činnosť výpočtovej, svetelnej, zabezpečovacej techniky atď., pričom zmena počiatovej fázy následne prehľbuje negatívny vplyv na činnosť zariadení pracujúcich na princípe fázového riadenia.

Analyzátor kvality elektrickej energie TOPAS 1000 pri „rozpoznaní“ poklesu napätia uchováva iba maximálnu hĺbku poklesu, spomedzi všetkých fáz, dobu pôsobenia poklesu, ako mu ukladá norma [1] a okamihové hodnoty napätia, resp. osciloskopický záznam počas trvania poruchy. Teda celý pokles je zhodnotený dvoma parametrami (hĺbkou poklesu a dobou pôsobenia), pričom napät'ové pomery v ostaných fázach je potrebné pracne hľadať v osciloskopickom zázname. Naprogramovaný software uľahčuje prácu s vyhodnocovaním týchto poklesov a spresňuje samotnú poruchu matematických opisom pomocou charakteristických parametrov [2]

- parameter V - charakteristické napätie,
- parameter F - PN (positiv - negativ) faktor,
- parameter V_0 - netočivá zložka napätia.

2 Matematický opis poklesu napätia

Vstupné okamihové hodnoty nameraných fázových napätí $u_a(t)$, $u_b(t)$, $u_c(t)$ sa najskôr prevedú do fázorového (komplexného) tvaru pomocou Fourierovej transformácie pre základnú harmonickú sieťovej frekvencie ($\omega = 314,16$) nasledovne

$$\operatorname{Re}\{\mathbf{U}_a\} = \frac{2}{T} \cdot \int_{t-T}^T (\sin(\omega \cdot t) \cdot u_a(t)) dt, \quad \operatorname{Im}\{\mathbf{U}_a\} = \frac{2}{T} \cdot \int_{t-T}^T (\cos(\omega \cdot t) \cdot u_a(t)) dt. \quad (1)$$

Vo fázorovom vyjadrení je možné pokles napätia (symetrický alebo nesymetrický) ďalej matematicky popísať pomocou rozloženia fázorov napätí \mathbf{U}_a , \mathbf{U}_b , \mathbf{U}_c na symetrické zložky napätia (súslednú \mathbf{U}_1 , spätnú \mathbf{U}_2 a netočivú \mathbf{U}_0) pomocou Fortescuoovej metódy [3] nasledovne

$$\begin{bmatrix} \mathbf{U}_0 \\ \mathbf{U}_1 \\ \mathbf{U}_2 \end{bmatrix} = \frac{1}{3} \cdot \begin{bmatrix} 1 & 1 & 1 \\ 1 & \mathbf{a} & \mathbf{a}^2 \\ 1 & \mathbf{a}^2 & \mathbf{a} \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} \mathbf{U}_a \\ \mathbf{U}_b \\ \mathbf{U}_c \end{bmatrix}, \quad (2)$$

kde je operátor

$$\mathbf{a} = e^{j\frac{2\pi}{3}} = -\frac{1}{2} + \frac{\sqrt{3}}{2}j = 1 \angle 120^\circ. \quad (3)$$

Na základe znalosti zložkových napätí sa vyhodnocujú jednotlivé poklesy napätia. Parameter \mathbf{V} charakterizuje veľkosť efektívnej hodnoty napätia v ľubovoľnom meracom bode a všeobecne platí, že

$$\mathbf{V} = \mathbf{U}_1 - \mathbf{U}_2 \cdot e^{-jk \cdot 60^\circ}, \quad (4)$$

kde k je parameter charakterizujúci typ poklesu (pozri tab. 1.).

Môže nadobúdať hodnoty (v pomerných jednotkách) v rozmedzí od $0 + 0j$ po $1 + 0j$. Nameraním $\mathbf{V} = 1$ sa vyjadria fázory symetrickej sústavy napätí, resp. v sústave nepôsobí žiadna zmena napätia. Nameraním $\mathbf{V} = 0$ sa vyjadria fázory jednotlivých napätí v mieste, kde pôsobí ideálna porucha (napr. skrat s nulovou impedanciou), pričom merané napätie je nulové. Medzi týmito okrajovými podmienkami môže parameter \mathbf{V} nadobúdať rôzne komplexné hodnoty, pričom komplexné číslo bude charakterizovať samotný pokles amplitúdy a zmenu fázového uhlu jednotlivých napätí. Ďalší charakteristický parameter (\mathbf{F}) charakterizuje prípadné prehĺbenie poklesu napätia spätným vplyvom asynchronných strojov na napájaciu sieť (z dôvodu nerovnakej súslednej a spätnej zložkovej impedancie). Ak platí, že $\mathbf{F} = 1 + 0j$ vplyv asynchronných motorov sa neprejaví, v opačnom prípade parameter \mathbf{F} klesá, pričom platí

$$\mathbf{F} = \mathbf{U}_1 + \mathbf{U}_2 \cdot e^{-jk \cdot 60^\circ}. \quad (5)$$

Parameter \mathbf{V}_0 charakterizuje veľkosť netočivej zložky napätia v meranom bode, ktorá sa prejaví pri zemných poruchách (ak sa meria fázové napätie voči nulovému potenciálu zeme) a platí

$$\mathbf{V}_0 = \mathbf{U}_0 = \frac{1}{3} \cdot (\mathbf{U}_a + \mathbf{U}_b + \mathbf{U}_c). \quad (6)$$

Parametre \mathbf{V} , \mathbf{F} a \mathbf{V}_0 sú vo výpočtoch v pomerných jednotkách vzťahnutých k pôvodnému napätiu.

3 Zaradenie poklesu napätia do príslušnej triedy

Kvôli lepšej orientácii medzi jednotlivými poklesmi napätia sa robí tzv. klasifikácia. Príslušné triedy sú označené veľkými písmenami. Delia sa na základné (A, C, D) a ovplyvnené netočivou zložkou napätia (B = D - \mathbf{V}_0 , E = C + \mathbf{V}_0), pričom každá z nich je matematicky opísaná rovnicami pomocou parametrov \mathbf{V} , \mathbf{F} a \mathbf{V}_0 . Viac pozri v [2]. Každý pokles je možné presne charakterizovať tým, ktorá fáza bola poklesom „porušená“. Je potrebné zaviesť nasledovný index. Tento sa bude písať ku jednotlivým typom poklesov. Indexy označujú písmenom fázu v ktorej si napätie:

- zachovalo svoj počiatkový uhol (typu C, D),
- ako jediné sa neprejavilo poklesom, zachovalo svoj počiatkový uhol (typ E),
- ako jediné sa prejavilo poklesom, zachovalo svoj počiatkový uhol (typ B),
- index sa nepoužíva v prípade symetrickeho poklesu (typ A).

Zaradenie poklesov napätia do špecifických tried a určenie typu poklesu sa vyhodnocuje na základe rozdielu počiatkovej spätnej a súslednej zložky napätia nasledovne [2]

$$k = Rnd \left(\frac{\arctg \frac{\text{Im}\{U_2\}}{\text{Re}\{U_2\}} - \arctg \frac{\text{Im}\{U_1\}}{\text{Re}\{U_1\}}}{60^\circ} \right), \quad (7)$$

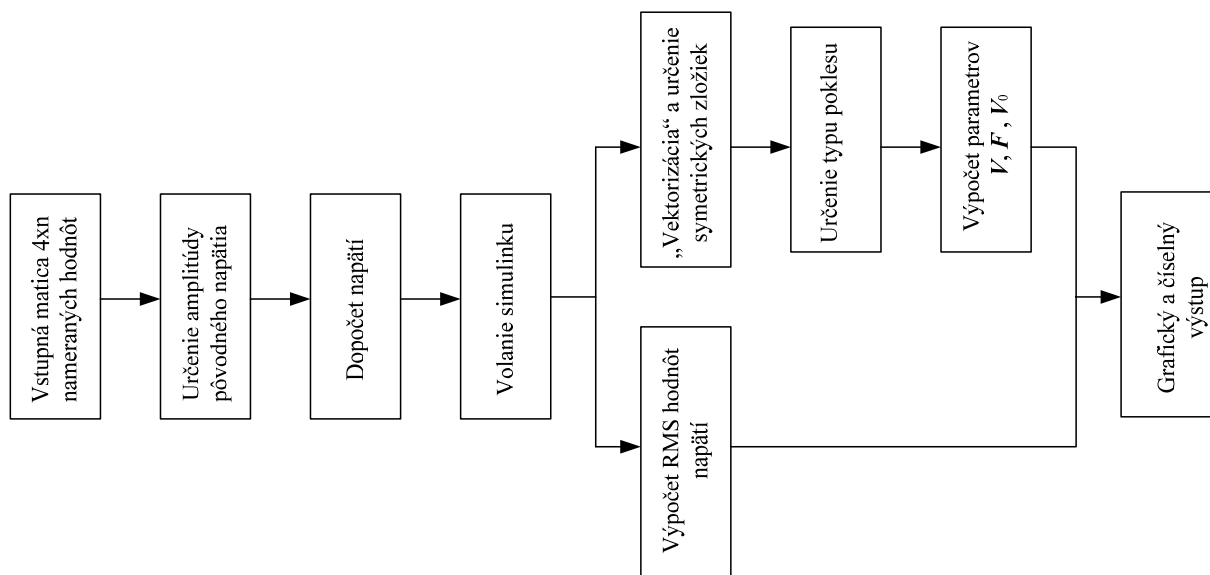
kde k je parameter charakterizujúci typ udalosti (pozri tab. 1.), celočíselne zaokrúhlený (Rnd).

Tabuľka 1: URČENIE TYPU POKLESU NAPÄTIA

Fázové	A / C _A	D _C	C _B	D _A	C _C	D _B
Združené	A / D _{BC}	C _{AB}	D _{CA}	C _{BC}	D _{AB}	C _{CA}
k	0	1	2	3	4	5

4 Chod programu

Vstupnými údajmi výpočtu sú okamihové hodnoty jednotlivých fázových napätí spolu s príslušnými časmi merania. Teda vstupom je matica so 4 stĺpcami a n riadkami, ktorých počet závisí od doby merania. Táto matica je uložená v klasickom textovom súbore a načítanie do programu je komfortne urobené pomocou funkcie „uigetfile“. Pri každej zaznamenatej poruche TOPAS 1000 ukladá aj 40 ms „predporuchového“ pôvodného napätia, z ktorého sa určí amplitúda pôvodného napätia v každej fáze. Táto je potrebná na prevod parametrov V , F , V_0 do pomerných jednotiek. V ďalšom kroku výpočtu sa robí dopočet prvej periódy nameraného symetrického napätia tak, aby napätie vo fáze A začínalo s nulovou počiatočnou fázou. Ďalším krokom je „vektORIZÁCIA“ okamžitých hodnôt napätia pomocou Fourierovej transformácie. Tu sa na výpočet využil blok „fourier analyser“ zo Simulinku – power system toolbox. Prepočet do symetrických zložkových sústav robí blok „3-phase sequence analyser“. Výstupom budú amplitúdy v pomerných jednotkách a počiatočné fázy jednotlivých zložkových napätí. Z nich sa určí typ poklesu napätia spolu s parametrom k podľa rovnice (7). Následne sa vypočítajú charakteristické parametre V , F , V_0 podľa rovníc (4-6). Prvým výstupom výpočtu sú časové priebehy charakteristických parametrov a typu poklesu napätia, počas doby jeho pôsobenia. Potom v určitom čase (perióde) si užívateľ môže zvoliť detailnejšie informácie. Vykreslí sa fázorový diagram v danom čase, vypíšu sa zmeny jednotlivých napätí, spolu s charakteristickými parametrami a typom poklesu. Týmto jeden cyklus výpočtu končí. Chod programu je zobrazený na obr. 1.



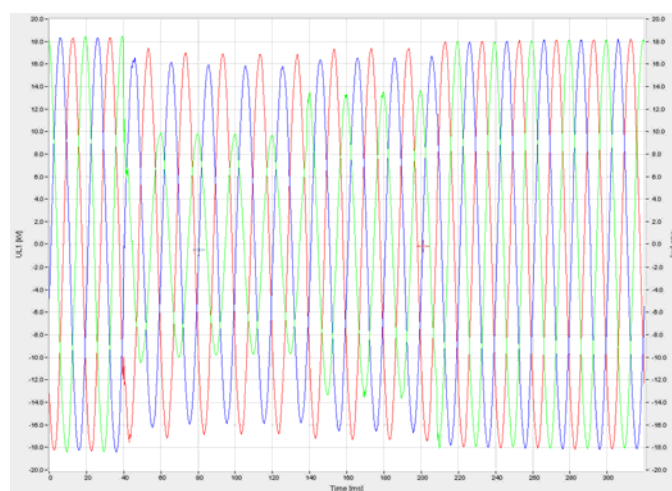
Obrázok 1: Principiálny diagram chodu programu

Volanie Simulinku z Matlabu bolo zvolené preto, lebo Simulink už obsahuje hotové bloky fourierovej transformácie a blok transformácie do symetrických zložiek. Využitím týchto blokov sa celé programovanie zjednodušilo, nakoľko sa využilo už niečo existujúce a hlavne funkčné, pričom výmena údajov medzi Matlabom a Simulinkom pomocou „workspace“ je bezproblémová. Nevýhodou

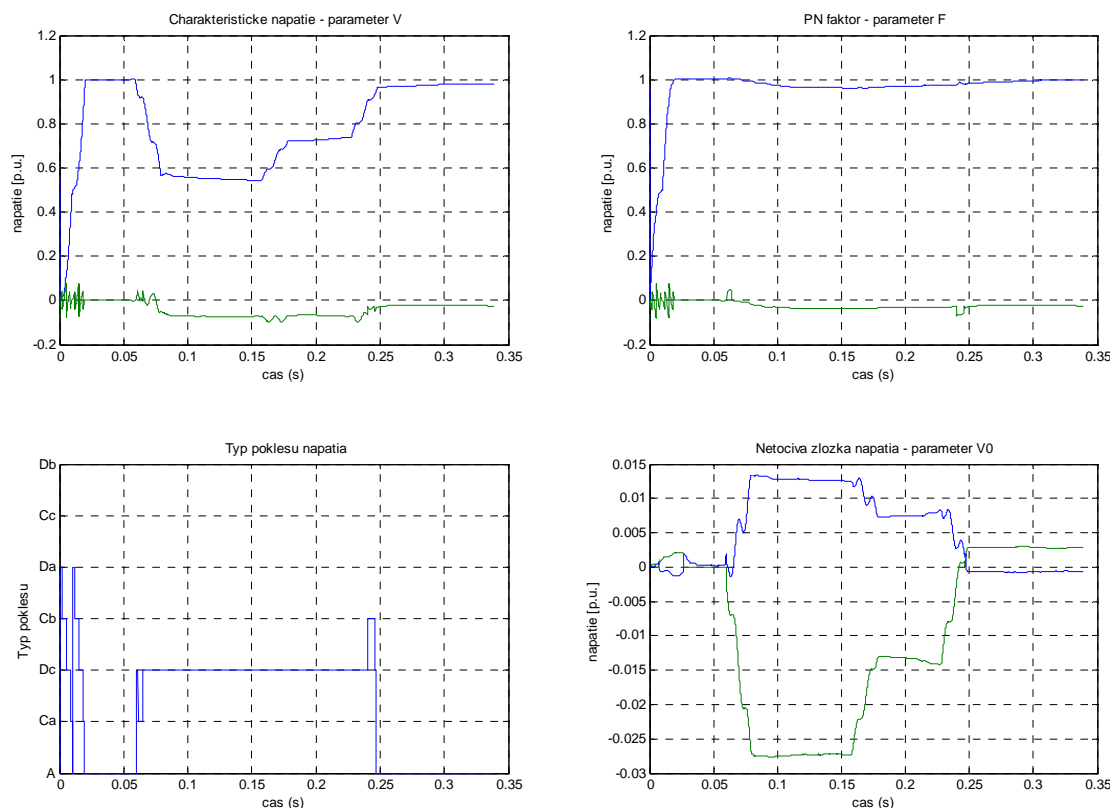
je, že bloku „fourier analyser“ nie je možné zdefinovať počiatkové podmienky a preto potrebuje 20 ms na „rozbehnutie“ čo je vidieť aj v grafoch na obr. 3.

5 Praktické použitie, výsledky

Merací prístroj TOPAS 1000 počas týždenného merania na 22 kV prípojnici v rozvodnej stanici 110 / 22 kV zaznamenal niekoľko krátkodobých poklesov napätia. Tieto sa po meraní následne pomocou popísaného programu analyzovali. Ako príklad uvádzam zaznamenaný nesymetrický pokles napätia s dobou pôsobenia 180 ms. Software ho identifikoval ako pokles typu D_C po celú dobu trvania poklesu. Osciloskopický záznam poklesu napätia (z prístroja TOPAS 1000) je zobrazený na obr. 2. Časové priebehy charakteristických parametrov a typu poklesu sú zobrazené na obr. 3.



Obrázok 2: Osciloskopický záznam poklesu napätia (z prístroja TOPAS 1000)

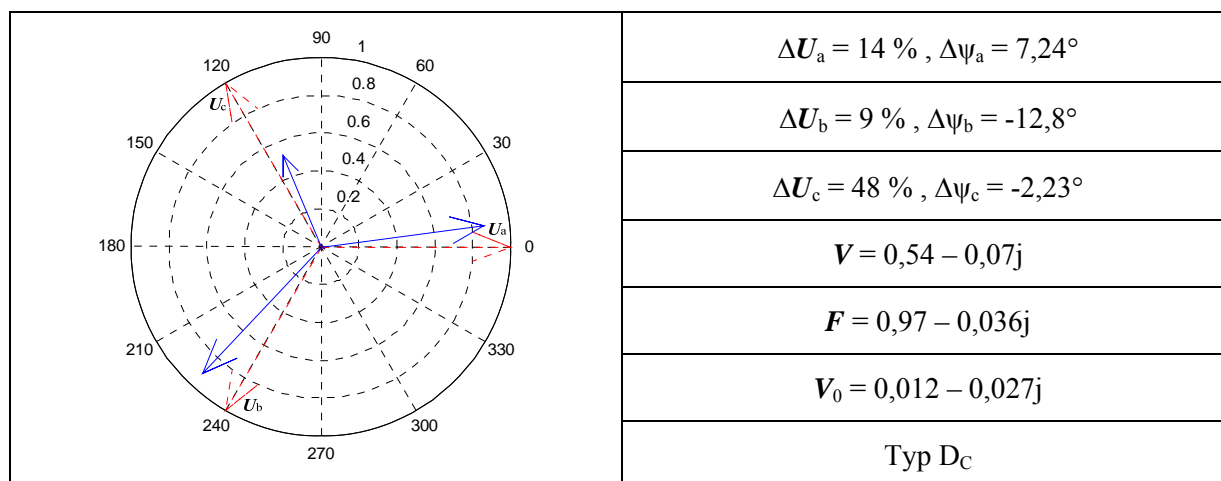


Obrázok 3: Časové priebehy charakteristických parametrov a typu poklesu

Časové priebehy na obr. 3 slúžia najmä na to, aby mal užívateľ celkovú predstavu o jednotlivých charakteristických parametroch počas trvania poklesu napätia, ako sa menia ich hodnoty, prípadne ako sa mení typ poklesu. Modré čiary predstavujú vždy reálnu a zelené imaginárnu časť príslušných charakteristických parametrov. Z grafov vidieť, že pokles napätia sa dá rozdeliť na

dva čiastkové poklesy, kedy parameter V nadobúda dve rozdielne ustálené hodnoty. Parameter F nadobúda hodnoty približne do 0,97, teda nerovnaké zložkové impedancie k miestu merania sa výrazne neprejavili. Namerala sa však aj malá hodnota netočivej zložky napätia (0,012 - 0,027j), z čoho sa dá usudzovať, že príčinou tohto poklesu bola jednofázová zemná porucha (zodpovedá tomu trieda poklesu D) v „nadradenej“ elektrizačnej sústave 110 kV, ktorá bola do sústavy 22 kV „zavlečená“ cez transformátor v zapojení YNyn0d1 (štandardne používaný transformátor v rozvodniach 110 / 22 kV). Užívateľ má ďalej možnosť „napät'ovú situáciu“ v jednotlivých časových okamžikoch podrobnejšie preskúmať. Ako príklad udávam hodnoty z času 0,15 s, ktoré sú uvedené v tab. 2, pričom zodpovedajú prvej ustálenej časti poklesu.

Tabuľka 2: PODROBNÝ VÝPIS ÚDAJOV V ČASE 0,15 S



6 Záver

Opísaný program bol naprogramovaný za účelom presnej identifikácie napät'ových pomerov počas krátkodobých poklesov napätia z nameraných hodnôt analyzátorom kvality TOPAS 1000. Po zadaní súboru, v ktorom sa namerané údaje nachádzajú, sa užívateľovi zobrazia časové priebehy charakteristických parametrov a typ poklesu napätia. Program na výpočet charakteristických parametrov a určenia typu poklesu používa známu teóriu rozkladu nesymetrickej trojfázovej sústavy napätí na symetrické zložky, ako uvádza literatúra [2]. Následne program umožňuje pre zvolený čas vypísať zmenu jednotlivých amplitúd napätí v percentách a zmenu počiatočných fáz v stupňoch. Graficky sú tieto zmeny napätí zobrazené vo fázorovom diagrame. Nie je preto potrebné pracne prehľadávať osciloskopický záznam z prístroja TOPAS 1000 s prípadným ručným dopočítavaním percentuálnej hĺbky poklesu. Ručný výpočet zmeny počiatočnej fázy by bol ešte komplikovanejší, pretože TOPAS 1000 tieto zmeny priamo neuchováva.

Programové prostredie Matlab bolo zvolené najmä z dôvodu, že celý program pracuje s maticami komplexných čísel, kvôli dobrému grafickému výstupu, čo týka najmä vykreslenia fázorových diagramov a tiež z dôvodu, že bolo možné využiť už existujúcu fourierovu transformáciu a transformáciu do symetrických zložiek.

Literatúra

- [1] STN EN 50 160 (33 0121): 2002. *Charakteristiky napätia elektrickej energie dodávanej z verejnej distribučnej siete*. Slovenský ústav technickej normalizácie, júl 2002.
- [2] M. BOLLEN, E. STYVAKTAKIS. *Characterization of Three-Phase Unbalanced Dips*. IEEE P1564, 2000.
- [3] L. REISS, K. MALÝ, Z. PAVLÍČEK. *Teoretická elektroenergetika 2*. ALFA, jún 1971.

Ing. Štefan Lojek

Katedra výkonových elektrotechnických systémov, Elektrotechnická fakulta ŽU v Žiline Univerzitná 8251/1, 010 26 Žilina, Slovenská republika, email: lojek@kves.utc.sk.