

Martin Kanálik

## Výpočet vplyvu parametrov štvorsystémového vzdušného vedenia na úroveň nesymetrie napätia

V dôsledku zníženia investičných a priestorových požiadaviek na konštrukciu nových vzdušných vedení, je v súčasnosti trend budovania viacsystémových vzdušných vedení s viacerými napätovými hladinami. Na druhej strane, vplyv elektromagnetických polí od jednotlivých vedení, môže spôsobiť zvýšenú hladinu napätovej nesymetrie na niektorom z týchto vedení. Úlohou tohto článku je popísať vzájomný vplyv štvorsystémového vzdušného vedenia 2×400 kV a 2×110 kV na úroveň nesymetrie napätia, v prípade rôznych prevádzkových podmienok.

Kľúčové slová: elektrické parametre vedení, teória komplexnej hĺbky, nesymetria napätia

### I. ÚVOD

Nesymetria napätia je spôsobená najmä nesymetrickým zaťažením, avšak napätová nesymetria môže byť meraná na konci vzdušného vedenia aj v prípade symetrického zaťaženia. Dôvodom je nesymetrická impedancia vonkajšieho vedenia. Vzhľadom k tomu, že v súčasnej dobe sa stále častejšie konštruujú viacsystémové vzdušné vedenia, analýza ich vplyvu na úroveň napätovej nesymetrie je veľmi aktuálna. Výpočet vlastných a vzájomných pozdĺžnych impedancií je možné realizovať pomocou rôznych koncepcií (Rüdenberg, Carson, teória komplexnej hĺbky), prinášajúcich porovnateľné výsledky [1]. Analýza, ktorej výsledky sú uvedené v tomto článku bola vykonaná na základe výpočtu pozdĺžnych impedancií vonkajšieho vedenia metódou komplexnej hĺbky, ktorú vypracoval Dubanton už v roku 1969 [2] následne Gary [3] a Deri [4] ju v rokoch 1976 a 1981 upravili do súčasnej podoby. Táto metóda, rovnako ako Carsonova metóda [5] uvažuje s korekčnými činiteľmi pre zohľadnenie vplyvu zeme ako spätného vodiča prúdu. Analýza parametrov vedení v prípade štandardných nízko a vysoko napätových distribučných systémoch ako aj v prenosových systémoch bola realizovaná v [6] až [7]. V prípade vonkajších vedení veľmi vysokého a zvlášť vysokého napätia, môžu byť v blízkosti jedného vedenia veľké elektromagnetické polia ovplyvňované inými vedeniami, čo môže zvyšovať úroveň nesymetrie napätia.

### II. METÓDA MODELU ZEME AKO SPÄTNÉHO VODIČA POMOCOU KOMPLEXNEJ HĽBKY

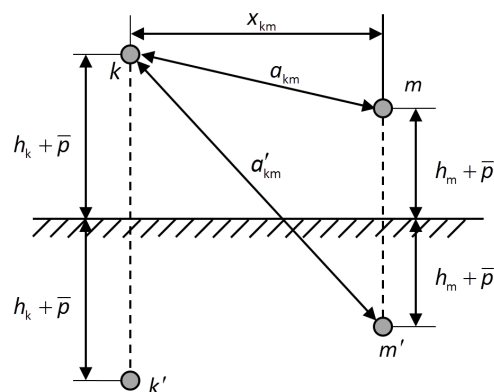
Na reprezentáciu prúdu tečúceho zemou je zem nahradená množinou vodičov umiestnených presne pod skutočnými vodičmi vedenia v komplexnej hĺbke  $\bar{p}$  (Obr. 1) [8]. To znamená, že vzdialenosti medzi vodičmi a ich obrazmi sú komplexné čísla. Tento model dosahuje veľmi dobré výsledky porovnateľné s Carsonovou teóriou v celom frekvenčnom rozsahu [1].

Hodnotu komplexnej hĺbky popisuje vzorec:

$$\bar{p} = \sqrt{\frac{\rho}{j\omega\mu}} \quad (\text{m}) \quad (1)$$

kde

- $\rho$  je rezistivita zeme ( $\Omega \cdot \text{m}$ ),
- $j$  je imaginárna jednotka,
- $\omega$  je uhlová frekvencia ( $\text{rad}^{-1} \cdot \text{s}$ ),
- $\mu$  je permeabilita zeme ( $\text{H} \cdot \text{m}^{-1}$ ), pre zem  $\mu = 4\pi \cdot 10^{-7} \text{ H} \cdot \text{m}^{-1}$



Obr. 1. Model dvoch vodičov a ich obrazov zahŕňajúci komplexnú hĺbku

Výpočet vlastnej impedancie umiestnenej na hlavnej diagonále impedančného modelu pozdĺžnych impedancií je následne daný vzťahom:

$$\bar{Z}_{kk} = R_k + j\omega \frac{\mu_0}{2\pi} \ln \frac{2(h_k + \bar{p})}{r_{e,k}} \quad (\Omega \cdot \text{m}^{-1}) \quad (2)$$

kde

- $R_k$  je striedavá rezistancia vodiča  $k$  ( $\Omega \cdot \text{m}^{-1}$ ),
- $h_k$  je výška vodiča  $k$  nad zemou (m)
- $r_{e,k}$  je efektívny polomer vodiča  $k$  (m), zahŕňa v sebe nerovnomerné rozdelenie prúdu po priereze vodiča a magnetické vlastnosti materiálu vodiča,

Druhý člen pravej strany rovnice (2) má svoju reálnu aj imaginárnu časť. Reálna časť predstavuje činné straty spôsobené neideálnou vodivou cestou zeme. Výsledkom je, že pre vlastnú rezistanciu vodiča  $k$  platí:

$$R_{kk} = R_k + \Delta R = R_k + \text{Re} \left\{ j\omega \frac{\mu_0}{2\pi} \ln \frac{2(h_k + \bar{p})}{r_{e,k}} \right\} \quad (\Omega \cdot \text{m}^{-1}) \quad (3)$$

Imaginárna časť charakterizuje vlastnú indukčnú reaktanciu, resp. vlastnú indukčnosť vodiča  $k$ :

$$L_{kk} = \frac{\text{Im}\{\bar{Z}_{kk}\}}{j\omega} \quad (\text{H} \cdot \text{m}^{-1}) \quad (4)$$

Vzájomná impedancia je charakterizovaná prvkami mimo hlavnej diagonály impedančnej matice, pričom reprezentuje impedanciu medzi slučkami vodiča  $k$  - zem a vodiča  $m$  - zem. Je určená vzťahom:

$$\bar{Z}_{km} = j\omega \frac{\mu_0}{2\pi} \ln \frac{a_{km}}{a'_{km}} \quad (\Omega \cdot m^{-1}) \quad (5)$$

pričom

$$a_{km} = \sqrt{(h_k - h_m)^2 + x_{km}^2} \quad (m) \quad (6)$$

a

$$a'_{km} = \sqrt{(h_k + h_m + 2\bar{p})^2 + x_{km}^2} \quad (m) \quad (7)$$

kde

$\bar{p}$  je komplexná hĺbka (m),

$h_k$  je výška vodiča  $k$  nad zemou (m),

$h_m$  je výška vodiča  $m$  nad zemou (m),

$x_{km}$  je horizontálna vzdialenosť medzi vodičom  $k$  a  $m$  (m)

Impedancia  $\bar{Z}_{km}$  má rovnako reálnu aj imaginárnu zložku. Reálna časť  $R_{km}$  vyjadruje fázový posun indukovaného napätia v dôsledku nedokonalé vodivej cesty zeme. Pre vzájomnú indukčnosť uvažujúcu vplyv zeme platí:

$$L_{km} = \frac{\text{Im}\{\bar{Z}_{km}\}}{j\omega} \quad (H \cdot m^{-1}) \quad (8)$$

a

$$\bar{Z}_{km} = \bar{Z}_{nk} \quad (9)$$

### III. ANALÝZA ÚROVNE NAPÄŤOVEJ NESYMETRIE NA MODELI VIACSYSTÉMOVÉHO VZDUŠNÉHO VEDENIA

Analýza vplyvu elektrických parametrov (impedancie) vzdušného vedenia na úroveň nesymetrie napätia bola realizovaná na matematickom modeli štvorsystémového vedenia 2×400 kV a 2×110 kV zobrazenom na Obr. 2. Matematický model bol vytvorený na základe  $\pi$ -článku, pričom priečne impedancia bola tvorená kapacitnými vetvami a pozdĺžna impedancia bola určená pomocou vzťahov uvedených v kapitole II. Dĺžka vedenia bola uvažovaná 18 km a na začiatku každého vedenia V1 až V4 bolo uvažované ideálne symetrické napätie (bez vnútornej impedancie napätového zdroja):

- Fázové hodnoty napätí v jednotlivých fázach vedení V1 a V2:

$$\bar{U}_{L1} = \frac{415}{\sqrt{3}} \cdot e^{j0^\circ} \quad (kV)$$

$$\bar{U}_{L2} = \frac{415}{\sqrt{3}} \cdot e^{-j120^\circ} \quad (kV)$$

$$\bar{U}_{L3} = \frac{415}{\sqrt{3}} \cdot e^{j120^\circ} \quad (kV)$$

- Fázové hodnoty napätí v jednotlivých fázach vedení V3 a V4:

$$\bar{U}_{L1} = \frac{117}{\sqrt{3}} \cdot e^{j\alpha} \quad (kV)$$

$$\bar{U}_{L2} = \frac{117}{\sqrt{3}} \cdot e^{-j(120^\circ+\alpha)} \quad (kV)$$

$$\bar{U}_{L3} = \frac{415}{\sqrt{3}} \cdot e^{j(120^\circ+\alpha)} \quad (kV)$$

kde  $\alpha$  je fázový posun medzi napätím 400 kV a 110 kV sústavy.

Koeficient nesymetrie napätia bol vypočítaný na základe vzťahu:

$$k_U = \frac{U_{(2)}}{U_{(1)}} \cdot 100\% \quad (10)$$

kde

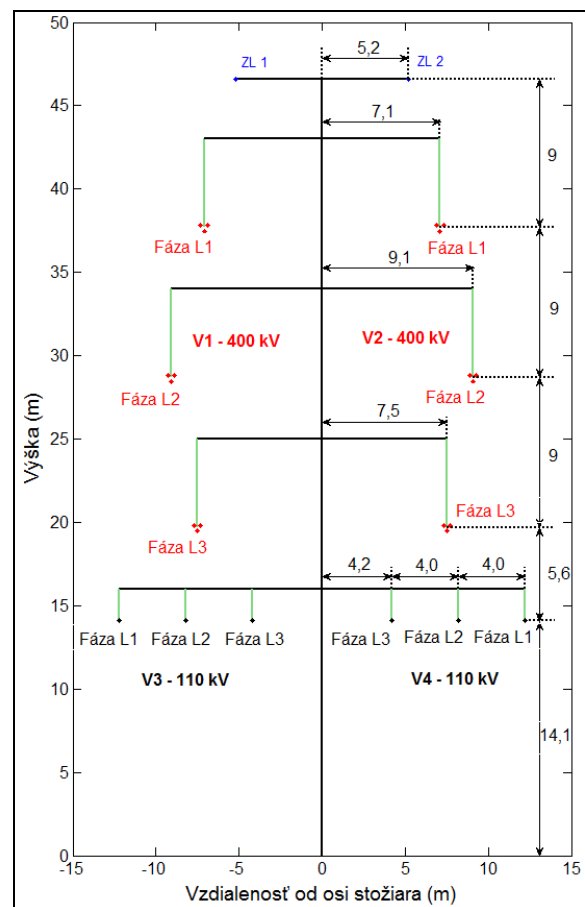
$k_U$  je koeficient nesymetrie napätia (%),

$U_{(1)}$  je efektívna hodnota súradnej zložky napätia (kV),

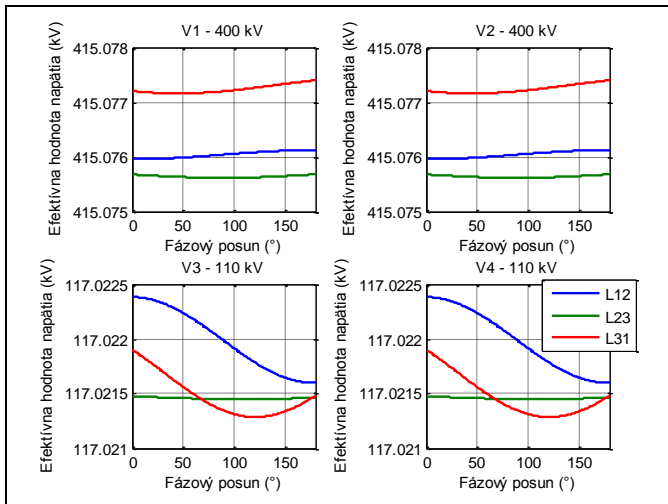
$U_{(2)}$  je efektívna hodnota spätnej zložky napätia (kV).

Keďže v rámci vyšetřovaného vedenia boli uvažované dve rôzne napät'ové hladiny (400 kV a 110 kV), bola ako prvá realizovaná analýza vplyvu fázového posunu medzi týmito dvoma napät'ovými sústavami na veľkosť nesymetrie napätia. Na Obr. 3 je zobrazená závislosť veľkosti efektívnej hodnoty napätia na konci každého vedenia od fázového posunu medzi oboma systémami v prípade všetkých vedení v stave naprázdno. Z obrázka je zrejmé, že hoci úroveň napät'ovej nesymetrie v prípade vedení naprázdno závisí od  $R$ ,  $L$  a  $C$  parametrov štvorsystémového vedenia ako aj fázového posunu medzi oboma systémami, jej úroveň v tomto prípade je v rámci všetkých štyroch vedení zanedbateľná.

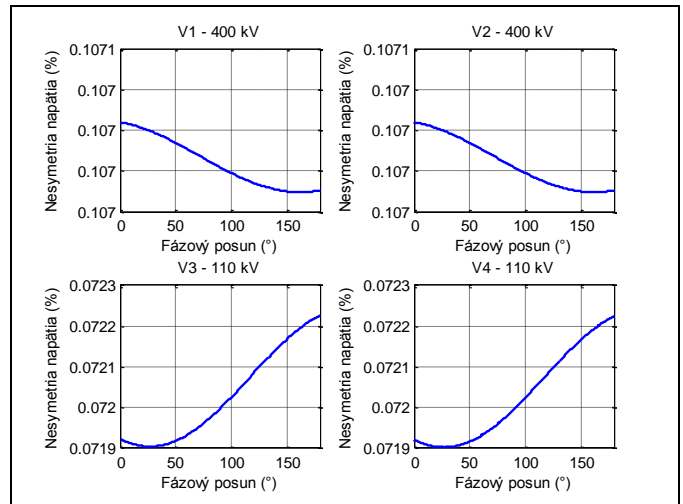
Na Obr. 5 je zobrazená veľkosť efektívnej hodnoty združeného napätia na konci jednotlivých vedení v prípade zaťaženia 400 kV vedení na 250 MVA (s účinníkom 0,98 indukčných) a vedení 110 kV v stave naprázdno, v závislosti od fázového posunu medzi napätím 400 kV a 110 kV sústavy. Z obrázka je zrejmé, že úroveň nesymetrie napätia je v tomto prípade vždy väčšia na zaťaženom vedení, bez ohľadu fázový posun medzi dvoma napät'ovými sústavami. Tento fakt potvrdzuje Obr. 6, na ktorom je zobrazená úroveň nesymetrie napätia na konci každého vedenia pre tento prípad. Dôvodom tohto javu je, že úroveň nesymetrie napätia na 400 kV vedeniach závisí najmä od konfigurácie (vzdialenosti) jednotlivých vodičov 400 kV vedení. Úroveň nesymetrie napätia je v prípade 400 kV vedení zapríčinená najmä nesymetrickými indukčnosťami týchto vedení.



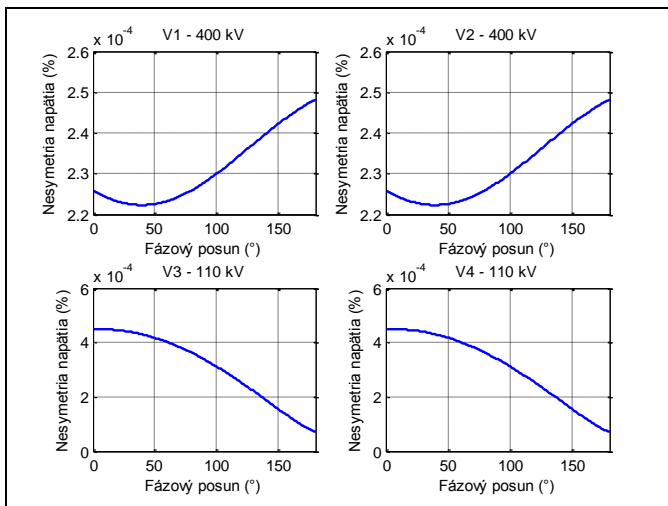
Obr. 2. Príklad analyzovaného štvorsystémového vedenia 2×400 kV a 2×110 kV



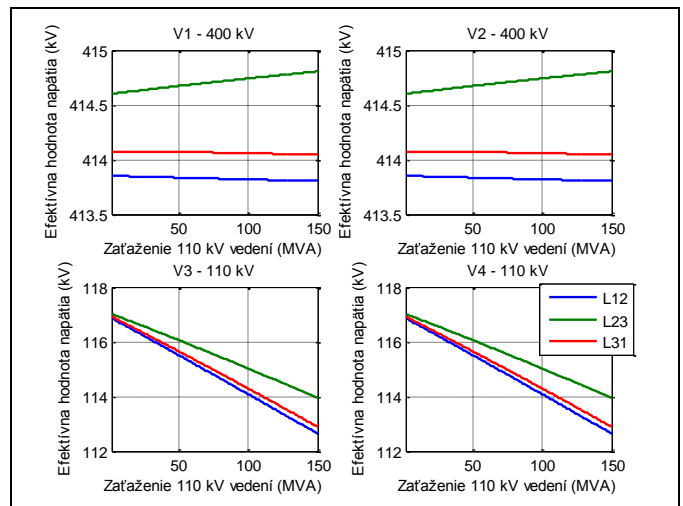
Obr. 3 Veľkosť efektívnej hodnoty zrušeného napätia na konci každého vedenia v prípade všetkých vedení v stave naprázdno v závislosti od uhla natočenia medzi 110 kV a 400 kV zdrojmi napätia



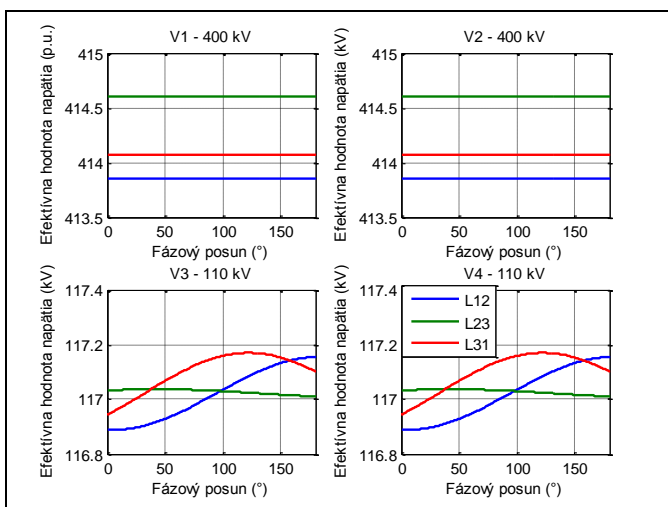
Obr. 6 Veľkosť nesymetrie napätia na konci každého vedenia v prípade zaťaženia 400 kV vedení na 250 MVA a vedení 110 kV v stave naprázdno v závislosti od uhla natočenia medzi 110 kV a 400 kV zdrojmi napätia



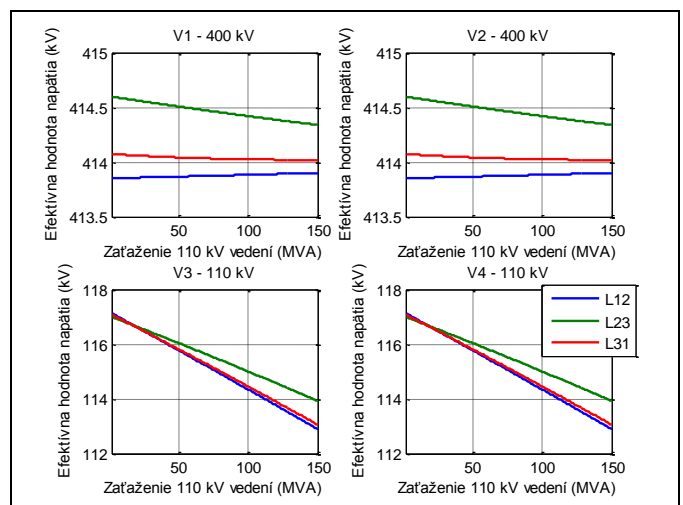
Obr. 4 Veľkosť nesymetrie napätia na konci každého vedenia v prípade všetkých vedení v stave naprázdno v závislosti od uhla natočenia medzi 110 kV a 400 kV zdrojmi napätia



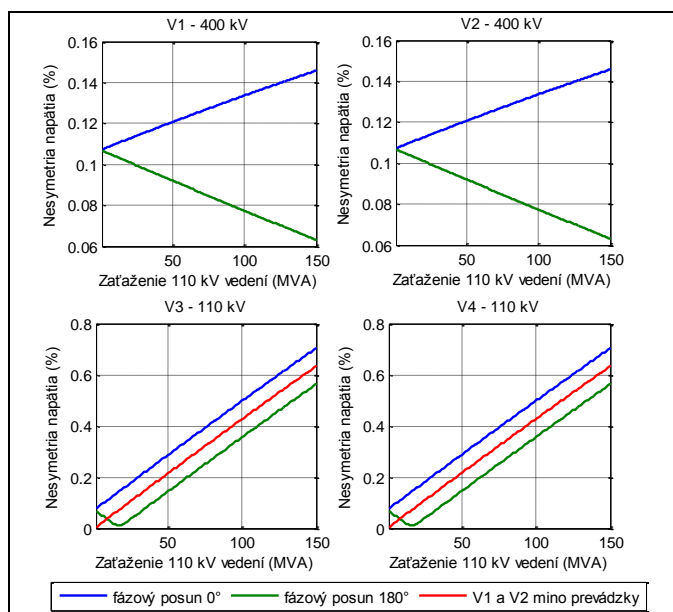
Obr. 7 Veľkosť efektívnej hodnoty zrušeného napätia na konci každého vedenia v závislosti od zaťaženia 110 kV vedení v prípade uhla natočenia medzi 110 kV a 400 kV o veľkosti 0° (vedenia V1 a V2 zaťažené konštantným výkonom 250 MVA)



Obr. 5 Veľkosť efektívnej hodnoty zrušeného napätia na konci každého vedenia v prípade zaťaženia 400 kV vedení na 250 MVA a vedení 110 kV v stave naprázdno v závislosti od uhla natočenia medzi 110 kV a 400 kV zdrojmi napätia



Obr. 8 Veľkosť efektívnej hodnoty zrušeného napätia na konci každého vedenia v závislosti od zaťaženia 110 kV vedení v prípade uhla natočenia medzi 110 kV a 400 kV o veľkosti 180° (vedenia V1 a V2 zaťažené konštantným výkonom 250 MVA)



Obr. 9 Veľkosť nesymetrie napätia na konci každého vedenia v prípade všetkých vedení v závislosti od zaťaženia 110 kV vedení (vedenia V1 a V2 zaťažené konštantným výkonom 250 MVA)

Na Obr. 7, resp. Obr. 8 je zobrazená veľkosť efektívnej hodnoty napätia na konci každého vedenia v závislosti od zaťaženia 110 kV vedení v prípade fázového posunu medzi 110 kV a 400 kV zdrojmi rovnému  $0^\circ$ , resp.  $180^\circ$ . Vedenia V1 a V2 (400 kV sústava) boli zaťažené konštantným výkonom o veľkosti 250 MVA (s účinníkom 0,98 indukčných). V prípade zaťaženia vedení V3 a V4 (110 kV sústava) bol uvažovaný vždy účinník 0,97 indukčných. Úroveň nesymetrie napätia na konci každého vedenia v závislosti od zaťaženia 110 kV vedení na základe Obr. 7 a Obr. 8 je zobrazená na Obr. 9. Rozdiel medzi fázovým posunom  $0^\circ$ , resp.  $180^\circ$  predstavuje vektory napätí a prúdov vo fáze, resp. v protifáze. Ako je možné vidieť z Obr. 9, v prípade fázového posunu medzi oboma systémami rovnému  $180^\circ$  (korešpondujúce vektory napätí a prúdov v protifáze) je úroveň napäťovej nesymetrie na konci každého vedenia vždy menšia ako v prípade fázového posunu  $0^\circ$  (korešpondujúce vektory napätí a prúdov vo fáze) bez ohľadu na veľkosť zaťaženia 110 kV vedení. Pomerne dôležitý je fakt, že v prípade maximálneho zaťaženia (250 MVA v prípade vedení V1 a V2 a v prípade 150 MVA v prípade V3 a V4) bola úroveň nesymetrie napätia na konci vedení V3 a V4 v prípade fázového posunu  $0^\circ$  o veľkosti 0,70 % a v prípade fázového posunu  $180^\circ$  o veľkosti 0,56 %. Veľkosť nesymetrie napätia na konci vedení V1 a V2 v prípade fázového posunu  $0^\circ$  o veľkosti 0,15 % a v prípade fázového posunu  $180^\circ$  o veľkosti 0,06 %. Červená krivka na Obr. 9 predstavuje úroveň nesymetrie napätia na konci vedení V3 a V4 v prípade oboch 400 kV vedení mimo prevádzky. Úroveň nesymetrie napätia na konci vedení V3 a V4 v prípade 400 kV vedení mimo prevádzky bola 0,63 %. Opačný smer prúdov a vektory napätí v protifáze znižujú úroveň nesymetrie na konci všetkých vedení.

#### IV. ZÁVER

Výsledky výpočtov prezentované v tomto článku poukazujú na skutočnosť, že prevádzka viacsystémového vzdušného vedenia zobrazeného na Obr. 2, ktoré je svojou konfiguráciou podobné štvorsystémovému vzdušnému vedeniu inštalovanému na východnom Slovensku na trase Lemešany - Bukovec vplyva na úroveň nesymetrie napätia v závislosti od prevádzkových podmienok. Úroveň napäťovej nesymetrie zapríčinená nesymetrickými parametrami vedení je spôsobená hlavne nesymetrickými indukčnosťami, t.j. závisí od veľkosti efektívnej hodnoty prúdu tečúceho daným vedením. Vplyv ostatných vedení na úroveň nesymetrie napätia daného vedenia môže byť pozitívny ako aj negatívny v závislosti na fázovom posune napätí a prúdov jednotlivých vedení (sústav). Na druhej strane, nesymetrické kapacity v prípade takéhoto viacsystémového vzdušného vedenia neovplyvujú významne na úroveň nesymetrie napätia.

#### POĎAKOVANIE

Túto prácu podporila Vedecká grantová agentúra Ministerstva školstva, vedy, výskumu a športu Slovenskej republiky a Slovenskej akadémie vied grantom VEGA č. 1/0388/13.

#### LITERATÚRA

- [1] A. Margitová „Výpočet elektrických parametrov silových vedení“, Bakalárska práca. Košice: Technická univerzita v Košiciach, Fakulta elektrotechniky a informatiky, 2015.
- [2] C. Dubanton „Calcul Approché des Paramètres Primaires et Secondaires d'Une Ligne de Transport“. In: EDF Bulletin de la Direction des Études et Recherches, Série B-Réseaux Électriques Matériels Électriques, č. 1, s. 53-62, 1969
- [3] C. Gary „Approche complète de la propagation multifilaire en haute fréquence par utilisation des matrices complexes“. In: EDF Bulletin de la Direction des Études et Recherches, Série B-Réseaux Électriques Matériels Électriques, s. 5-20, 1976
- [4] A. Deri, G. Tevan, A. Semleyen, A. Castanheira “The Complex Ground Return Plane, a Simplified Model for Homogeneous and Multi-layer Earth Return“. In: IEEE Transactions on Power Apparatus and Systems. roč. PAS-100, s. 3686-3693, 1981
- [5] J. R. Carson “Wave Propagation in Overhead Wires with Ground Return” Bell Systems Technical Journal, roč. 5, s. 539-554, 1926.
- [6] D. E. Hedman “Propagation on Overhead Transmission Lines II-Earth-Conduction Effects and Practical Results”, Power Apparatus and Systems, IEEE Transactions on, roč. 84, s. 205-211, marec 1965.
- [7] Z. Emin, D.S. Crisford “Negative phase-sequence voltages on E&W transmission system”, Power Delivery, IEEE Transactions on, roč. 21, s.1607-1612, júl 2006.
- [8] H. Wayne Beaty “Handbook of Electric Power Calculations”. The McGraw-Hill Companies, 529 s. ISBN 0-07-136298-3, 2000

#### ADRESA AUTORA

Ing. Martin Kanálik, PhD., Technická Univerzita v Košiciach, Katedra elektroenergetiky, Mäsiarska 74, 040 01 Košice, Slovenská Republika, [Martin.Kanalik@tuke.sk](mailto:Martin.Kanalik@tuke.sk)