

MODELOVANIE VONKAJŠÍCH SILOVÝCH VEDENÍ NA ZÁKLADE VYUŽITIA SKENOVANÝCH DÁT

Alena OTČENÁŠOVÁ

*Katedra výkonových elektrotechnických systémov
Žilinská univerzita v Žiline
Alena.Otcenasova@fel.uniza.sk*

Marek HÖGER

*Katedra výkonových elektrotechnických systémov
Žilinská univerzita v Žiline
Marek.Hoger@fel.uniza.sk*

Juraj ALTUS

*Katedra výkonových elektrotechnických systémov
Žilinská univerzita v Žiline
Juraj.Altus@fel.uniza.sk*

Miroslav HOLUBEC

*YMS, a.s.
miroslav.holubec@yms.sk*

Abstrakt

V súvislosti s otváraním možností zberu údajov prostredníctvom nových technológií sa objavili nové perspektívne oblasti, ako napr. zber údajov technológiou lidar, kde za použitia lietadla alebo helikoptéry je možné získať rýchly a vysoko kvalitný obraz zemského povrchu a objektov na ňom. Článok rozoberá možnosti použitia lidarových technológií pri mapovaní koridorov elektrického vedenia. Na konkrétnom príklade demonštruje tieto postupy v podmienkach Slovenskej republiky. Na základe získaných výsledkov konštatuje, že kvalita výstupných dát, najmä získavaná hustota bodov je dostatočná pre účely monitoringu a analýzy stavu vedení a ich ochranných pásiem.

Kľúčové slová

Letecký LIDAR; monitorovanie vzdušného vedenia; ochranné pásmo; TerraScan, vodič, priehyb vodiča.

1. Úvod

Prenos a distribúcia elektrickej energie je v súčasnosti realizovaná predovšetkým prostredníctvom vonkajších vzdušných vedení. Tieto vedenia sú počas svojej životnosti vystavené rôznym nepriaznivým klimatickým podmienkam ako silný vietor, námraza, vysoké teploty,... Súčasne sa menia aj mechanické vlastnosti použitých vodičov tým, že starnú, čo má za následok zväčšovanie ich priehybov v jednotlivých rozpätiach vedenia. Všetky tieto faktory sa časom prejavajú na stave vedení a môžu spôsobiť ich nespoľahlivosť v dodávke elektrickej energie, ako aj ohrozenie ľudí pohybujúcich sa pod vedením. Taktiež sú tieto vedenia ohrozené dorastajúcou vegetáciou, či už pod samotným vedením alebo v jeho blízkosti, napríklad pádom vysokého stromu na vodiče. Preto sú okolo vedení udržiavané ochranné pásma, ktoré sú čistené od dorastajúcej vegetácie jej výrubom [1].

Nielen z týchto dôvodov je vhodné, aby boli vedenia pravidelne kontrolované. Nevýhodou nutnej kontroly je, že ide o rozsiahle líniové stavby, ktorých kontrola je technicky ako aj časovo náročná. V prípade prenosových vedení (vedenia 400 kV a 220 kV) sa pre niektoré úseky vedení využíva kontrola prostredníctvom vrtuľníka, kedy je realizovaná vizuálna kontrola a prípadné snímanie vedenia termovíznou kamerou. U distribučných vedení (110 kV a menej) sa kontrola vykonáva najmä pochôdzkou technikou pod vedením. Veľkou nevýhodou sú značné nároky na čas a zároveň nie vždy sú dostatočne získané informácie o stave vedenia a jeho ochranného pásma.

Výhodnejšou metódou pre kontrolu elektrických vedení je použitie leteckých laserových skenerov. Tieto skenery vďaka vysokej odrazivosti a ľahkej definovateľnosti tvaru vodičov vedení oveľa rýchlejšie a výhodnejšie poskytujú obraz o aktuálnom stave skenovaného vedenia a jeho ochranného pásma. Výstupom

takéhoto skenovania je veľké množstvo bodov, ktoré je možné spracovať na digitálny model skenovaného územia (obr. 1).

Následne je možné pomocou nástrojov rôznych softvérov (BLUH, SCOP++, TerraScan) daný model spracovať a získať požadované údaje ako napr.:

- presnú polohu vodičov v rámci sledovaných rozpätí a ich priechyby,
- výšku a polohu stožiarov, prípadne ich náklon,
- stav ochranného pásma a vzdialenosť vodičov vedenia od vegetácie, prípadne iných predmetov a objektov.

Taktiež je táto technológia vhodná pri prieskume nových území, ktoré by boli vhodné na výstavbu elektrických vedení, či už z dôvodu posilnenia existujúcej infraštruktúry alebo zaistenia prenosu výkonu vyrábaného napríklad z obnoviteľných zdrojov elektrickej energie.



Obr. 1. Digitálny model skenovaného

2. Využitie leteckého skenovania pre analýzu stavu vonkajších silových vedení

Pre analýzu a názorné spracovanie údajov získaných leteckým laserovým skenovaním bola vybraná časť územia medzi elektrickou stanicou Varín a obcou Stráňavy (obr. 2). Táto oblasť bola zvolená z toho dôvodu, že ju križujú elektrické vedenia rôznych napäťových úrovní ako 400 kV, 110 kV, 22 kV a časť elektrifikovanej železničnej trate s jednosmerným trakčným systémom 3 kV. Zároveň sa tieto vedenia v danom území rôzne križujú a prechádzajú rozličným terénom, ktorý je tvorený poľnohospodárskou pôdou, oblasťami s vyššou vegetáciou a vodnou nádržou vodného diela Žilina. Taktiež sú na tomto území vedenia s rôznymi typmi stožiarov. Typy stožiarov sú väčšinou priehradových konštrukcií rôznych vyhotovení závislých od napäťových úrovní vedení a ohraňovaných stožiarov pre jednoduché 110 kV vedenie. Z týchto dôvodov je táto oblasť vhodná na testovanie možnosti danej technológie pri skenovaní masívnych prenosových vedení ako aj jednoduchých distribučných vedení a ich ochranných pásiem.



Obr. 2. Tvar a umiestnenie skenovanej oblasti

Oblasť bola skenovaná z výšky cca 650 m nad terénom pri rýchlosti okolo 210 km·h⁻¹ pomocou leteckého systému LiDAR Trimble Harrier 68i upevneného do leteckého nosiča PA-34 Seneca. Základné parametre zariadenia Harrier 68i sú uvedené v tab. 1 [2].

Tab. 1. Parametre zariadenia Harrier 68i.

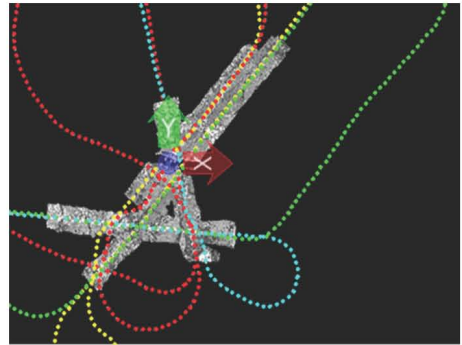
Frekvencia pulzov (PRR)	80 kHz – 400 kHz
Frekvencia skenovania	10 Hz – 200 Hz
Zorný uhol	45 ° – 60 °
Operačná výška	30 – 1600 m AGL
Uhlové rozlíšenie	0.001 °
Hustota bodov (50 m/s)	5.8 pt·m ⁻² @800 m AGL
Presnosť vertikálna	< 0.25 m
Presnosť horizontálna	< 0.15 m

Oblasť bola nalietaná niekoľko krát z dôvodu získania vyššej hustoty skenovaných bodov, aby bolo možné posúdiť, aké množstvo bodov na m² je potrebné pre správne rozpoznanie jednotlivých objektov na zemskom povrchu. Na obr. 3 je znázornená trajektória letu lietadla pri jednotlivých nalietavaniach danej oblasti.

Na prácu s naskenovanými bodmi bol využitý program TerraScan, ktorý je produktom fínskej spoločnosti TerraSolid a predstavuje nadstavbu pre program MicroStation, ktorému umožňuje spracovávať veľké množstvá bodov.

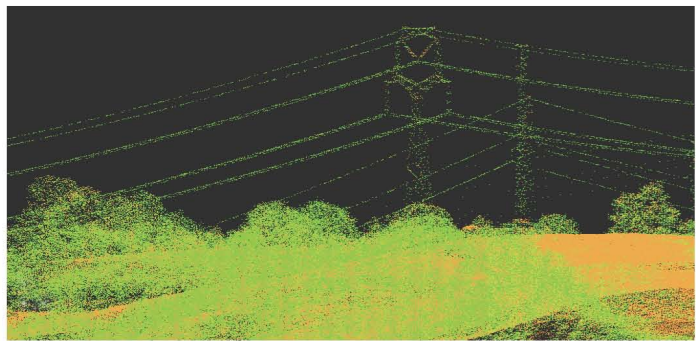
3. Tvorba objektov a ich modelovanie na základe zoskenovaných dát

Po naskenovaní bodov a vytvorení digitálneho modelu daného územia je nutné jednotlivé získané body zatriediť do tried, ktoré predstavujú zem, vysokú a nízku vegetáciu, prípadne iné objekty. Program sám na základe počtu odrazov laserového lúča po dopade na povrch zeme stanoví, ktoré body predstavujú zem a ktoré vegetáciu. Body odrazov, ktoré po vyslaní laserového lúča sú detekované v prijímači ako posledné sú klasifikované ako body predstavujúce zem. Ostatné odrazy, ktoré sa vrátia do prijímača skôr, predstavujú vegetáciu. Táto klasifikácia bodov a ich zatriedenie do príslušných tried predstavujúcich zem a vegetáciu je iba orientačná, pretože obsahuje aj značné množstvo chybne klasifikovaných bodov. Pre lepšiu klasifikáciu bodov a následnú prácu s digitálnym modelom je vhodné niektoré úseky, ako napr. trasu elektrických vedení, dodatočne preklasifikovať. Na tento účel je vhodné využiť nástroje programu TerraScan, ktoré umožňujú jednoduchú a rýchlu klasifikáciu takýchto bodov.



Obr. 3. Trajektórie letu lietadla pri skenovaní.

Nevýhodou tejto klasifikácie ako aj celého programu je neschopnosť automaticky rozlíšiť body, ktoré patria stožiarom alebo vodičom, prípadne iným objektom. Všetky tieto objekty sú považované za vegetáciu, pretože sa nachádzajú v určitej výške nad zemou (obr. 4).



Obr. 4. Bočný náhľad na úsek 400 kV vedenia.

Preto je nutné, pomocou ďalších funkcií programu TerraScan preklasifikovať tieto body, napr. u elektrického vedenia, na vodiče a stožiare. Táto klasifikácia je čiastočne automatizovaná a po jej dokončení je možné využívať ďalšie nástroje programu napr. pre určovanie minimálnej výšky vodičov nad zemou, stavu ochranného pásma a iné.

3.1. Klasifikácia vodičov

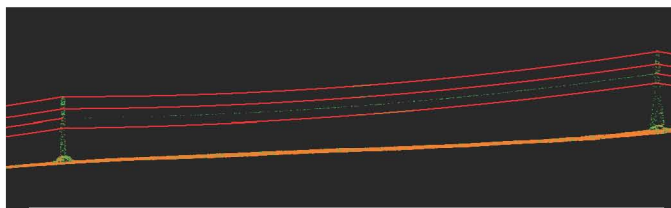
Pri klasifikácii vodičov patriacich vedeniu je nutné najskôr vyhľadať trasu vedenia a zadať definovať čiaru, ktorá prechádza vrcholmi každého stožiara vedenia. Po zadefinovaní tejto čiary (definičná čiara) program automaticky okolo nej v určených hraniciach prehľadá priestor a vyhľadá body patriace vodičom. Tieto body sú zároveň automaticky vektorizované na tvar vodiča. Pri vyhľadávaní bodov patriacich vodičom musia body zodpovedať tvaru krivky, ktorá je opísaná rovnicou nepružnej reťazovky v tvare [1]

$$y = c \cdot \cosh \frac{x}{c}, \quad (1)$$

kde c je parameter reťazovky v (m) a x, y sú súradnice jednotlivých bodov krivky nepružnej reťazovky.

Ak tomu tak nie je, napr. vodiče nemajú dostatočný priehyb pri kotevnom stožiaru alebo vstupe či výstupe z elektrickej stanice, tak takéto body nie sú preklasifikované na vodiče. Taktiež môže nastať prípad, že hustota naskenovaných bodov je príliš malá a program nie je schopný automaticky klasifikovať všetky vodiče v jednotlivých rozpätiach (obr. 5). V tomto prípade je možnosť zadať nové konštanty reťazovky alebo zadať vodiče ručne. Takýto spôsob je ale náročný na čas, nakoľko vedenia sú rozsiahle (napr. 1 km dvojitého 110 kV vedenia môže obsahovať 5 až 6 rozpätí, v ktorých by bolo treba klasifikovať okolo 40 vodičov). Ručná klasifikácia vodiča je vykonávaná v každom rozpätí zvlášť. Z tohto dôvodu je vhodnejšie

využívať automatickú klasifikáciu vodičov. Na to, aby bola takáto klasifikácia úspešná, je potrebné poznať minimálne množstvo skenovaných bodov na m^2 , pre úspešné definovanie vodičov jednotlivých napäťových hladín.



Obr. 5. Chybná klasifikácia vodiča v jednom rozpätí dvojitého 110 kV vedenia.

3.1.1 Určenie minimálneho množstva naskenovaných bodov pre úspešnú klasifikáciu vodičov jednotlivých napäťových hladín

Na určenie minimálneho množstva bodov potrebného pre automatickú klasifikáciu bola umelo znižovaná hustota skenovaných bodov a následne realizovaná klasifikácia vodičov na rôznych napäťových hladinách. Hustota naskenovaných bodov bola znižovaná až po hodnotu $5 \text{ pt} \cdot m^{-2}$, ktorú je možné považovať za bežnú hodnotu, získavanú použitým typom skenera pri jednom prelete lietadla. Percentuálna úspešnosť klasifikácie vodičov rôznych napäťových hladín pri odlišnej hustote bodov na m^2 je zobrazená v tab. 2.

Tab. 2. Percentuálna úspešnosť klasifikácie vodičov rôznych napäťových hladín.

Napäťová hladina (kV)	Veľkosť oblasti (m^2)	Načítaný bod	Počet načítaných bodov (pt)	Hustota načítaných bodov ($pt \cdot m^{-2}$)	Úspešnosť detekcie (%)
400	38607,53	každý	632138	16,37	100
		každý 2.	316049	8,19	94
		každý 3.	210754	5,46	77
110 (dvojitý)	13623,54	každý	220043	16,15	80
		každý 2.	110085	8,08	55
		každý 3.	73293	5,38	20
110 (jednoduchý)	9456,72	každý	153162	16,19	91,6
		každý 2.	76516	8,09	87,5
		každý 3.	51053	5,39	70,03
22	6863,95	každý	91084	13,27	100
		každý 2.	45575	6,64	75
		každý 3.	30338	4,42	66

Klasifikácia vodičov bola vykonaná na siedmich rozpätiach vedenia č. V445 (400 kV), dvojitého vedenia č. 7733/7704 a na šiestich rozpätiach jednoduchého vedenia č. 7844 (110 kV). Klasifikácia 22 kV vedenia bola realizovaná iba na

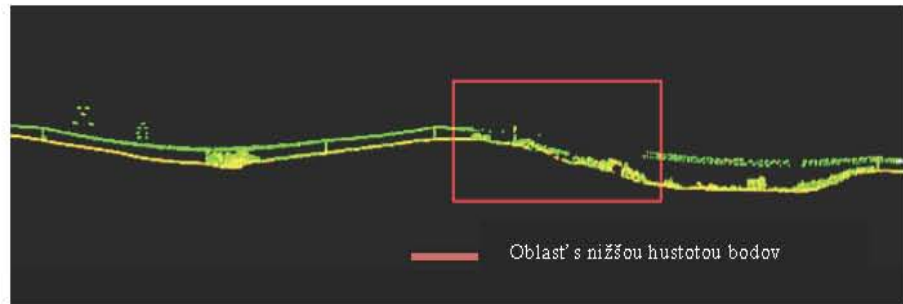
štyroch rozpätiach, nakoľko celková dĺžka tohto vedenia zasahuje iba z časti do skenovanej oblasti s potrebnou hustotou bodov. Časť vedenia prechádza územím s nižšou hustotou naskenovaných bodov, ktorá neumožňuje automatickú klasifikáciu vodičov ani pri maximálnej možnej hustote načítaných bodov. Táto oblasť s nižšou hustotou bodov vznikla medzi dvoma dráhami (trajektóriami) lietadla pri skenovaní, pretože skenovaná oblasť nebola rovnomerne nalietavaná (obr. 6).

Program umožňuje znižovať hustotu bodov iba násobkami celých čísiel tým, že načíta do oblasti napr. každý druhý či každý tretí bod. Táto vlastnosť, kedy maximálny počet bodov dosahuje hodnotu cca $16 \text{ pt} \cdot \text{m}^{-2}$, umožňuje iba obmedzené znižovanie bodov do hodnoty $5 \text{ pt} \cdot \text{m}^{-2}$, pretože táto hodnota je približne získaná už pri načítaní každého tretieho bodu.

Pri správnom určení konštánt reťazovky a nastavení minimálnej horizontálnej a vertikálnej tolerancie pre klasifikáciu vodičov je program schopný rozoznať aj jednotlivé laná vo zväzkových vodičoch prenosových vedení (obr. 7.). Takáto klasifikácia je možná iba pri vyššej hustote naskenovaných bodov, pretože pri nižšej hustote bodov (hustota bodov odpovedajúca jednému preletu lietadla nad skenovanou oblasťou) dochádza k značným chybám pri klasifikácii.

3.2. Klasifikácia stožiarov

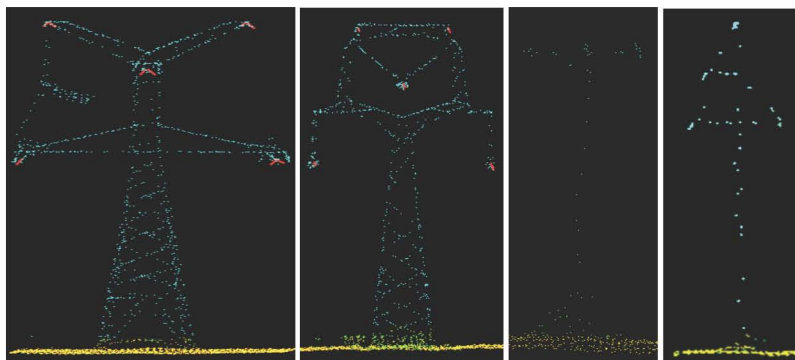
Z naskenovaných bodov je pomerne jednoduché určiť typ stožiara priehradovej konštrukcie. Laserový lúč po dopade na členitú konštrukciu takéhoto stožiara býva viacnásobne odrážaný a tým vytvára viacero bodov pre zostavenie tvaru stožiara. Problém pri určovaní typu stožiara môže nastať pri ohraňovaných stožiaroch a stožiaroch s predpätého betónu. Tieto stožiare majú užšiu konštrukciu a menej členitý povrch, čo má za následok znemožnenie viacnásobného odrazu laserového lúča. Ale aj napriek uvedeným nevýhodám je možné tieto stožiare rozpoznať najmä vďaka možnosti zobrazenia objektov vo viacerých rezoch. Na obr. 8 sú zobrazené niektoré typy stožiarov zaznamenaných v skenovanej oblasti.



Obr. 6. Oblasť 22 kV vedenia pri plnej hustote načítaných bodov.



Obr. 7. Stožiar 400 kV vedenia – typ mačka.

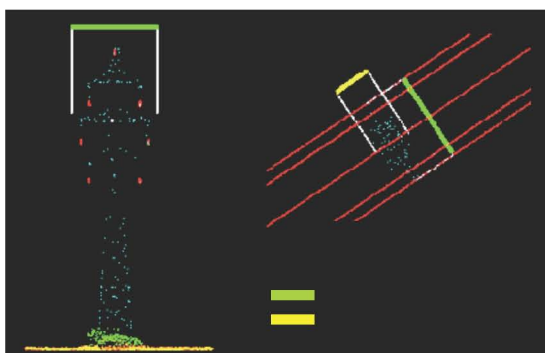


Obr. 8. Rôzne typy stožiarov, zľava kotevný stožiar 400 kV, nosný stožiar 400 kV.

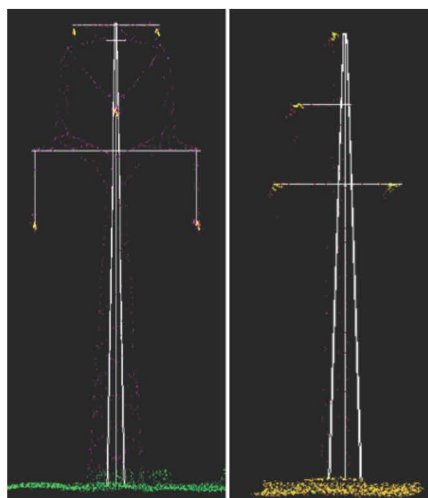
Body stožiarov je nutné klasifikovať najmä z dôvodu použitia ďalšieho nástroja programu TerraScan pre automatické určovanie voľnosti ochranného pásma. V prípade neklasifikovania bodov predstavujúcich stožiar sú tieto body považované za vegetáciu. Pri určovaní voľnosti ochranného pásma by boli stožiare považované za nebezpečné objekty (stromy) zasahujúce do ochranného pásma.

Program je schopný automaticky vyhľadať body patriace stožiaru (obr. 9) po zadefinovaní šírky vedenia (rozpätie stožiaru) a rozmeru šírky stožiaru. Následne sa pomocou čiary definovanej pri klasifikácii vodičov vyhľadajú body patriace stožiarom a sú preklasifikované z triedy Vegetácia na triedu Stožiar.

Program umožňuje aj vektorizáciu stožiarov, táto funkcia, ale nie je automatizovaná na rozdiel od vektorizácie vodičov. Vektorový model je automaticky umiestnený do stredu stožiaru, následne je ale nutné nastavovať výšku stožiaru, rozloženie ramien, ich dĺžku a uchytenie vodičov. Takýto model len v malej miere odpovedá skutočnému tvaru stožiaru, najmä ak ide o iný typ ako jednovežový stožiar s ramenami po stranách. Avšak táto vektorizácia nie je vôbec nutná pre správnu činnosť programu (obr. 10.).



Obr. 9. Určenie šírky a rozpätia stožiaru.



Obr. 10. Vektorizované modely

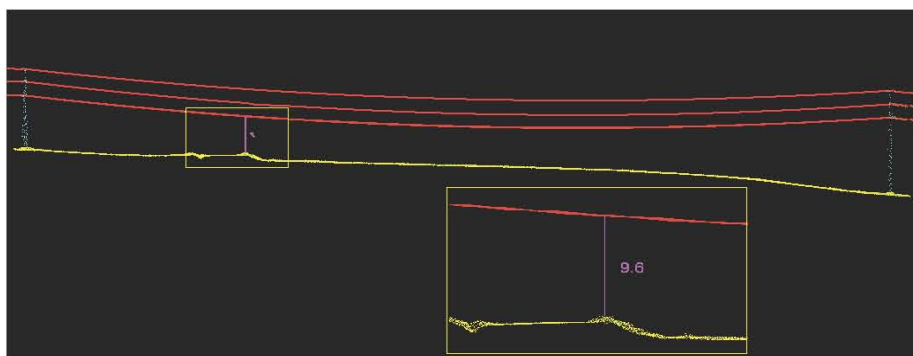
3.3. Určenie priehybov vodičov a ich minimálnej výšky nad zemou

Pre určenie minimálnej výšky vodičov nad zemou je nutné najskôr vektorizovať vodiče a body patriace stožiarom preklasifikovať do triedy Stožiar. Následne je možné pomocou automatického nástroja programu TerraScan vyhľadať miesto vodiča nachádzajúceho sa najbližšie k zemi alebo k vegetácii, ktorá je pod vedením. Táto vzdialenosť je následne automaticky zakótovaná (obr. 11).

Minimálne vzdialenosti vodičov od zeme sú dané normou STN EN 50341-1: Vonkajšie elektrické vedenia so striedavým napätím nad 45 kV. Tieto hodnoty nemôžu byť prekročené a sú rozdielne v závislosti od veľkosti

napät'ových hladín a typu terénu, ktorým vedenie prechádza (poľnohospodárska pôda, rieky, dopravné komunikácie,...) [1].

Hodnoty minimálnych vzdialeností sú definované pomocou koeficientu D_{el} . Tento koeficient vyjadruje najkratšiu možnú vzdušnú vzdialenosť v metroch, požadovanú na zabránenie výboja medzi fázovými vodičmi a objektmi s potenciálom zeme. Hodnoty D_{el} zodpovedajú najvyšším napätiam v sieti a sú uvedené v tab. 3. Na základe tohto koeficientu je možné vyjadriť minimálne vzdialenosti medzi vzdušnými vedeniami a príslušnými objektmi ako napr. minimálne vzdialenosti od obytných a ostatných budov, minimálne vzdialenosti od križovaných pozemných komunikácií, železníc a vodných ciest [1].



Obr. 11. Najbližšie miesta vodiča k zemi.

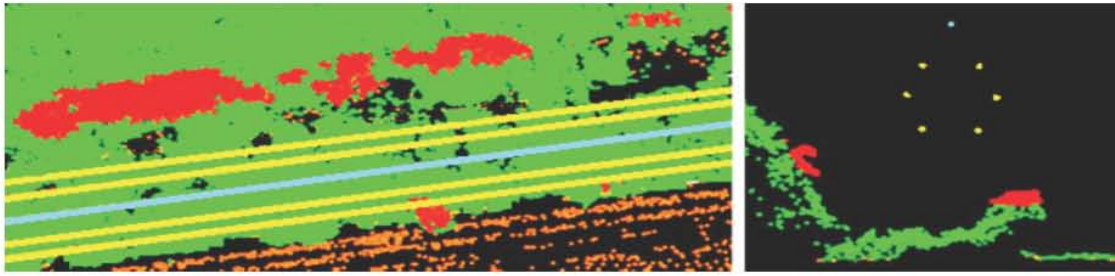
Tab. 3. Najkratšie vzdušné vzdialenosti pri menovitých napätíach siete.

Menovité napätie siete (kV)	Najvyššie napätie siete (kV)	D_{el} (m)
45	52	0,6
50	72,5	0,7
66	72,5	0,7
110	123	1
220	245	1,7
400	420	2,8
700	765	4,9

4. Kontrola ochranného pásma vedenia

Ochranné pásma vedení sú definované ako zvislé roviny po oboch stranách vedenia vo vodorovnej vzdialenosti od stredu vedenia. Tieto vzdialenosti sú dané v závislosti od menovitých napätí vedení, kde od 35 kV do 110 kV vrátane je táto hodnota 15 m a od 110 kV do 220 kV vrátane je 20 m [1]. Tieto pásma sú čistené od prípadnej dorastajúcej vegetácie a je zakázané v nich zriaďovať stavbu alebo iné konštrukcie bez súhlasu vlastníka vedenia.

Pre túto kontrolu program disponuje nástrojom, ktorý umožňuje vyhľadávanie nebezpečných objektov zasahujúcich do ochranného pásma. Nutnosťou pre použitie je správna klasifikácia bodov vodičov a stožiarov. Najskôr je nutné nastaviť vzdialenosť od vedenia, v ktorej majú byť nebezpečné objekty vyhľadávané. Po zadaní tejto vzdialenosti program automaticky vyhľadá body zasahujúce do tohto pásma a zaradí ich do triedy nebezpečných objektov, aby boli lepšie viditeľné (obr. 12). Následne užívateľ vizuálnou kontrolou rozhodne, či ide o nebezpečné objekty, alebo prípadne zlú klasifikáciu bodov patriacich vodičom alebo stožiarom. Vzdialenosti nebezpečných objektov od vodičov je možné zakótovať. Program taktiež umožňuje vypísanie textovej správy, ktorá obsahuje informácie o počte nebezpečných objektov vyskytujúcich sa v kontrolovanom pásme.



Obr. 12. Zobrazenie nebezpečných objektov v ochrannom pásme 110 kV.

Ďalším využitím takejto kontroly je možná predikcia stavu ochranného pásma po určitom časovom období. Nakoľko je možné na základe rýchlosti dorastania drevín vyskytujúcich sa v ochrannom pásme a aktuálneho stavu ochranného pásma získaného touto technológiou stanoviť obdobie, v ktorom môže dôjsť k prekročeniu minimálnych vzdialeností stromov od vodičov.

5. Príklad využitia modelovania vodičov pre prevádzkovú prax

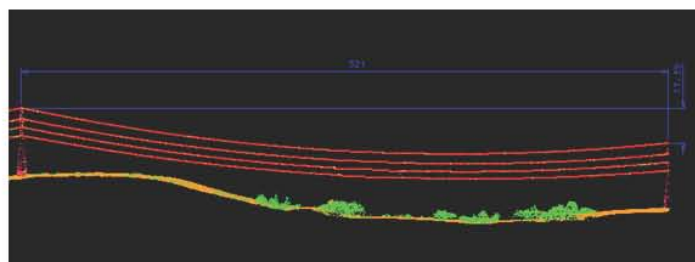
V súlade s teoretickými predpokladmi platí, že zmena vonkajšej teploty počas dňa, ročného obdobia, ako aj prevádzkový prúd, spôsobí zmenu veľkosti priehybov vodičov a následne sa mení aj ich minimálna výška nad zemou. Pre určenie bodov, ktoré by zodpovedali týmto rôznym stavom, je potrebné definovať mechanické napätia a konkrétne priehyby vodičov v definovanom okamihu, napr. v čase skenovania vedenia. Pre účely analýzy bolo zvolené 110 kV vedenie č. 7733 vyúsťujúce zo stanice Varín, ktoré bolo uvedené do prevádzky v roku 1944. Ako fázové vodiče sú použité AlFe lano 240/39 a pre uzemňovací vodič lano AlFe 185/31. Keďže toto vedenie má takmer 70 rokov, sú vodiče oproti montážnemu stavu pri výstavbe dlhšie o predĺženie spôsobené tzv. metalurgickým tečením, čo predstavuje zmeny v molekulárnej štruktúre materiálu, ktorý je vystavený dlhodobému mechanickému zaťaženiu.

Závislosť mechanického namáhania vodiča od teploty je definovaná v tzv. montážnych tabuľkách, ktoré sú odvodené z maximálneho dovoleného namáhania vodiča pri kritických podmienkach. Kritické podmienky podľa normy predstavujú situáciu pri teplote -5°C za súčasného zaťaženia námrazou. Veľkosť dovoleného mechanického namáhania sa však mení v súvislosti so starnutím materiálu, a preto montážne tabuľky toho istého vedenia dnes a pred 70 rokmi sú dosť rozdielne. Na stanovenie závislosti a sledovanie zmien za predpísaných podmienok je nutné riešiť tzv. stavovú rovnicu [1].

S využitím reálnych zoskenovaných dát je možné v programe TerraScan vektorizovať polohu vodičov dnes a na základe teoretických prepočtov vygenerovať ich polohu pred 70 rokmi, ale aj aký bude predpokladaný stav napr. za 10 rokov.

5.1 Vedenie č. 7733 v čase skenovania

Na základe zoskenovaných dát spracovaných pomocou programu TerraScan (obr. 13) je možné určiť priehyby jednotlivých vodičov vedenia a ich minimálne výšky nad zemou, ktoré zodpovedajú reálnemu stavu vedenia v čase skenovania za príslušnej teploty vonkajšieho prostredia. V tab. 4 sú zaznamenané veľkosti rozpätí a výškové rozdiely stožiarov v jednotlivých poliach časti vedenia č. 7733 [5].

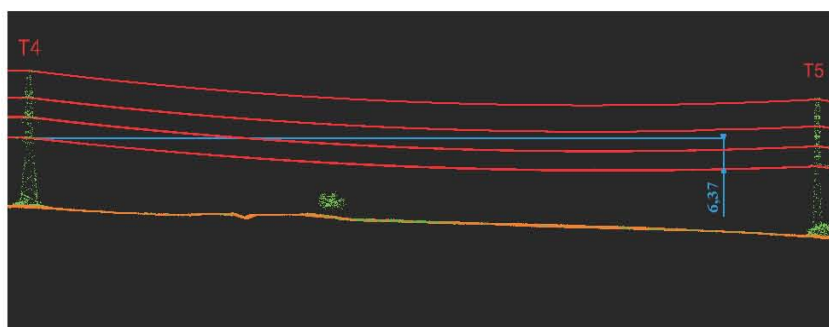


Obr. 13. Zobrazenie poľa číslo 6 v programe TerraScan

Tab. 4. Veľkosti rozpätí (a) a výškové rozdiely stožiarov (h).

Pole	1.	2.	3.	4.	5.	6.
a (m)	250	281	170	220	200	321
h (m)	2,3	2,4	5,85	23,03	19,54	17,39

Tab. 5 je montážna tabuľka pre všetky rozpätia sledovanej časti vedenia v čase skenovania a vypočítaná z priehybov f najnižšie umiestnených vodičov 3-fázových vedení. V tabuľke σ_{H1} je mechanické namáhanie pri príslušnej teplote okolia vodiča, f_{150} je priehyb vodiča vo vzdialenosti 150 m od ľavého stožiaru príslušného poľa (rozpätia a).



Obr. 14. Priehyb vodiča vo vzdialenosti 150 m od ľavého stožiaru T4 v poli č.

Tab. 5. Predpokladaný stav mechanických napätí a priehybov v čase skenovania.

v_M (°C)		2,2	12,2	22,2	27,2	32,2	42,2	52,2	62,2	72,2	
a (m)	v (°C)	-30	-20	-10	-5	0	10	20	30	40	-5+ námraza
250	σ_{H1} (MPa)	54,58	51,13	48,15	46,73	45,55	43,27	41,27	39,48	37,89	81,41
	f_{150} (m)	6,09	6,41	6,72	6,88	7,03	7,32	7,61	7,89	8,16	7,73
281	σ_{H1} (MPa)	52,96	50,24	47,84	46,75	45,71	43,81	42,1	40,56	39,12	83,1
	f_{150} (m)	7,64	7,98	8,32	8,48	8,65	8,97	9,28	9,58	9,89	9,43
170	σ_{H1} (MPa)	62,07	55,21	49,52	46,92	44,84	41	37,83	35,18	32,96	74,98
	f_{150} (m)	5,99	6,09	6,2	6,26	6,31	6,42	6,52	6,62	6,72	6,54
220	σ_{H1} (MPa)	56,72	52,29	48,54	46,88	45,34	42,61	40,24	38,18	36,37	79,39
	f_{150} (m)	18,87	19,14	19,41	19,54	19,67	19,92	20,17	20,41	20,65	20,26
200	σ_{H1} (MPa)	58,56	53,29	48,87	46,69	45,17	42,05	39,4	37,13	35,16	77,81
	f_{150} (m)	16,85	17,07	17,28	17,41	17,5	17,71	17,92	18,12	18,31	17,97
321	σ_{H1} (MPa)	51,47	49,41	47,55	61,51	45,87	44,33	42,92	41,63	40,44	84,84
	f_{150} (m)	16,67	17,02	17,37	15,27	17,71	18,04	18,37	18,68	18,99	18,54

Na overenie hodnôt v tab. 5 boli zo skenovaných údajov pomocou programu získané hodnoty priehybov vo vzdialenosti 150 m od ľavého stožiaru príslušného poľa (obr. 14), z ktorých potom nie je problém vypočítať aktuálne mechanické napätie v najnižšom vodiči každého poľa vedenia č. 7733 (tab. 6) pri vonkajšej teplote v čase skenovania vedenia.

Tab. 6. Aktuálne mechanické napätia v jednotlivých poliach.

Pole	1.	2.	3.	4.	5.	6.
a (m)	250	281	170	220	200	321
h (m)	2,3	2,4	5,85	23,03	19,54	17,39
f_{150} (m)	7,8	9,46	6,37	20,21	17,55	19,22
σ_{HI} (MPa)	40,04	41,17	42,55	39,92	44,39	39,62

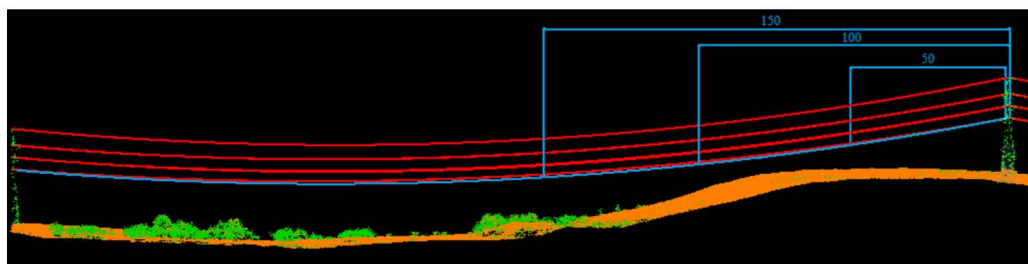
3.2. Vedenie č. 7733 pri teoretickej teplote +40°C

K najväčším priehybom vodičov a teda k ich najmensej vzdialenosti od zeme dochádza pri teplote +40°C, najvyššej teplote sledovanej na základe požiadaviek normy [1]. Preto je táto teplota zvolená pri ďalšom výpočte a posúdení, či nedochádza k prekročeniu minimálnych vzdialeností vodičov od zeme. Pre túto teplotu vodičov sú dopočítané priehyby vo vzdialenosti 50 a 100 m od ľavého stožiaru príslušného poľa. Výsledky výpočtu sú zhrnuté v tab. 7. Premenná c uvedená v tab. 7 je parameter reťazovky [1].

Tab. 7. Priehyby vodičov v jednotlivých rozpätiach pri teplote +40°C.

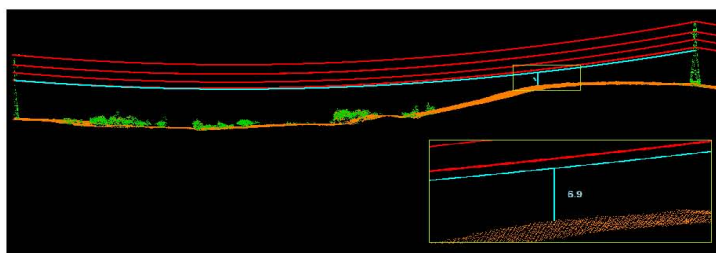
Pole	1.	2.	3.	4.	5.	6.
a (m)	250	281	170	220	200	321
h (m)	2,3	2,4	5,85	23,03	19,54	17,39
c (m)	1038,81	1085,21	986,58	1008,17	1068,57	1069,45
f_{50} (m)	5,3	5,75	4,76	9,45	8,39	9,09
f_{100} (m)	8,19	9,2	6,98	16,42	14,45	15,82
f_{150} (m)	8,65	10,34	6,68	20,91	18,16	20,20

Následne boli pomocou priehybov uvedených v tab. 7 v programe TerraScan vykreslené nové priehyby vodičov, ktoré zodpovedajú polohe jednotlivých vodičov vedenia pri analyzovanej teplote +40°C (obr. 15).



Obr. 15. Určenie bodov a vykreslenie nového priehybu vodičov.

Poloha vodičov bola následne overená pomocou funkcie programu TerraScan na vyhľadávanie najnižšieho bodu vodiča od zeme a táto vzdialenosť bola zisťovaná. Hodnoty najmensej vzdialenosti od zeme pri teplote 40°C sú zaznamenané v tab. 8 a sú porovnané so vzdialenosťami vodičov od zeme pri skenovaní, teplote +10°C.



Obr. 16. Miesto, v ktorom je vodič najbližšie k zemi pri vykreslení novej polohy vodičov.

Tab. 8. Najmenšie vzdialenosti vodičov od zeme.

Pole		1.	2.	3.	4.	5.	6.
a (m)		250	281	170	220	200	321
h (m)		2,3	2,4	5,85	23,03	19,54	17,39
Minimálna vzdialenosť od zeme (m)	10°C	12,7	11,4	10,6	11,2	11,4	7,6
	40°C	12,1	10,9	9,9	10,4	10,7	6,9
Rozdiel (m)		0,6	0,5	0,7	0,8	0,7	0,7

Po porovnaní výsledkov v tab. 8 je možné si všimnúť, že pri zmene teploty vodičov z +10°C na +40°C dochádza k zmenšeniu vzdialenosti vodičov od zeme vo všetkých poliach v rozsahu od 0,5 do 0,8 m.

Na overenie získaných výsledkov a posúdenie, či je takýto spôsob spoľahlivý a získané výsledky zodpovedajú reálnym stavom na vedeniach, by bolo vhodné opakovane naskenovať danú oblasť pri rozličných teplotných podmienkach, aby boli zaznamenané situácie v súlade s rozsahom teplôt uvedeným v montážnej tabuľke (tab. 5) a následne tieto rôzne stavy bolo možné porovnať. Ideálne by boli údaje, kedy je teplota okolia vodičov -5 °C za súčasnej námrazy na vedení a potom pri najvyšších možných teplotách okolia, kde teória hovorí až o +40 °C. Jedna z týchto situácií je totiž rozhodujúca z hľadiska najväčšieho priehybu na vedení a teda najnižšie položeného bodu vodiča. Pri všetkých ostatných teplotách je priehyb vodiča menší.

Taktiež by bolo vhodné tie isté vedenia naskenovať viac krát s dlhším časovým rozmedzím, aby bolo možné posúdiť vplyv metalurgického tečenia na veľkosť priehybu použitých vodičov. Zároveň by bolo možné takto získané informácie použiť na overenie správnosti výpočtu trvalého predĺženia vodičov pomocou teplotného posunu. Pretože aj pomerne malá zmena mechanického napätia vo vodičoch sa prejaví na zmene priehybu vodiča o niekoľko desiatok centimetrov [1].

Na základe takto získaných hodnôt by mohli byť v dostatočnom časovom predstihu realizované opatrenia, ktoré zamedzia prekročeniu normou stanovených hodnôt a tým predísť ohrozeniu samotného vedenia ako aj osôb pohybujúcich sa pod vedením.

Možnosti opatrení na dodržanie normou stanovených hodnôt minimálnych výšok vodičov nad zemou sú viaceré. Nutnosťou je zohľadniť stav týchto vedení v súčasnosti, nakoľko môžu byť na hranici svojej životnosti. Aj samotná realizácia opravných prác by mohla viesť k poškodeniu konštrukcie stožiarov a vodičov vedenia, čo vedie k ohrozeniu prevádzky a bezpečnosti samotného vedenia.

Opravy je možné realizovať dodatočným napnutím fázových vodičov alebo výmenou vodičov za vodiče s nízkou rozťažnosťou, prípadne inštaláciou prizmatických závesov na nosné stožiare alebo výmenou nosných izolátorových reťazcov za polokotevné závesy. Ďalšou možnosťou je aj vloženie výškových dielov do pôvodnej konštrukcie stožiarov nevyhovujúceho rozpätia a tým zvýšiť ich výšku ako aj výšku vodičov nad zemou. Následný výber vhodného riešenia pre jednotlivé vedenia je založený na zhodnotení celkového technického stavu vedenia ako aj finančných nákladov jednotlivých opráv.

6. Záver

Na základe doterajších analýz ohľadne využitia skenovaných dát pre potreby elektroenergetiky je možné konštatovať, že použité zariadenie Trimble Harrier 68i je vhodné pre potreby identifikácie elektrických vedení aj pri hustote bodov získanej počas jedného preletu lietadlom nad skenovaným vedením prenosových alebo distribučných sietí, s pripomienkou, že so znižovaním množstva skenovaných dát sa náročnosť ich ďalšieho spracovania zvyšuje. Zároveň sa osvedčilo aj použitie automatizovaných nástrojov programu TerraScan pri detekcii vodičov, stožiarov, následnej kontrole ochranného pásma a zisťovania minimálnej výšky vodičov od zeme. Výsledky pri tvorbe objektov a ich modelovaní sú uspokojivé pre potreby definované v príspevku.

V prípade dostupnosti údajov z opakovaného skenovania elektrických vedení v rôznych teplotných podmienkach, ako aj vo väčšom časovom odstupe by bolo možné vykonávať aj analýzu ich technického stavu a predikovať ich životnosť.

Článok je publikovaný ako jeden z výstupov projektu: "Brokerské centrum leteckej dopravy pre transfer technológií a znalostí do dopravy a dopravnej infraštruktúry ITMS 26220220156".



Podporujeme výskumné aktivity na Slovensku / Projekt je spolufinancovaný zo zdrojov EÚ.

Literatúra

- [1] Otčenášová, A.: *Mechanika vonkajších silových vedení*, EDIS, ŽU v Žiline, 2010, ISBN 978-80-554-0181-2, 245 strán
- [2] Höger, M., Holubec, M., Otčenášová, A., Szabová, M.: *Overenie možností mapovania koridorov vonkajších elektrických vedení leteckým lidarom v podmienkach SR*. [online]. Sympóziu GIS: Ostrava, 27. – 29. 1. 2014. [cit: 2013-04-10]. Dostupné na internete: http://gis.vsb.cz/GIS_Ostrava/GIS_Ova_2014/sbornik/papers/gis20145287a926c9675.pdf
- [3] THE SANBORN MAP COMPANY, Inc. Electric transmission corridor mapping. [online]. Colorado springs: USA, 2010. [cit: 2013-04-10]. Dostupné na internete: <http://www.sanborn.com/sites/default/files/files/SANBORN_NERCv3.0.pdf>
- [4] Otčenášová, A., Höger M., Altus, J.: *Possible use of airborne LiDAR for monitoring of power lines in Slovak Republic*, In: Proceedings of the 2014 15th International Scientific Conference on Electric Power Engineering (EPE), Brno, University of Technology, Czech republic, 2014, 05, str.: 477-481, 978-1-4799-3806-3
- [5] Horčíčák, R.: *Modelovanie vonkajších silových vedení*, Diplomová práca 2014, ŽU v Žiline, EF, KVES, školiteľ: Otčenášová A., 43 strán.