Translated from English to Slovak - www.onlinedoctranslator.com

electricity

MDPI

Článok

Stanovenie svetlej výšky pre nadzemné elektrické vedenia EVN 400 kV na základe limitov elektromagnetického poľa

Jozef Bendík *, Matej Cenký a Žaneta Eleschová

Fakulta elektrotechniky a informačných technológií, Slovenská technická univerzita v Bratislave, Ilkovičova 3, 81 219 Bratislava, Slovensko; matej.cenky@stuba.sk (MC); zaneta.eleschova@stuba.sk (Ž.E.)

* Korešpondencia: jozef.bendik@stuba.sk

Abstrakt

Plánovanie a projektovanie nadzemných elektrických vedení s veľmi vysokým napätím (EHV) vyžaduje prísne dodržiavanie limitov vystavenia elektromagnetickému poľu, aby sa zabezpečila verejná bezpečnosť. Tento dokument predstavuje komplexnú analýzu minimálnej svetlej výšky požadovanej pre štandardné prenosové stožiare 400 kV, aby boli v súlade s medzinárodnými bezpečnostnými smernicami. Prehľad legislatívnych rámcov v 37 krajinách naznačuje všeobecný konsenzus o limitných hodnotách 5 kV/m pre elektrické pole a 100µT pre hustotu magnetického toku. Pomocou analytických metód boli vypočítané elektrické a magnetické polia pre štyri bežné geometrie stožiarov (Cat, Portal, Danube a Barrel) pri rôznych zemných výškach a fázových konfiguráciách. Výsledky ukazujú, že hustota magnetického toku nie je limitujúcim faktorom, pretože zostáva hlboko pod bezpečnostnými prahmi aj pri štandardných technických vzdialenostiach. Naopak, intenzita elektrického poľa sa ukazuje ako kritické konštrukčné obmedzenie, ktoré často vyžaduje vzdialenosti výrazne vyššie, ako sú tie, ktoré sú dané koordináciou izolácie. Štúdia zistila, že optimalizácia fázovej postupnosti v dvojokruhových stožiaroch môže znížiť požadovanú zemnú výšku až o 28 %, čo ponúka nákladovo efektívnu stratégiu zmierňovania. Tieto zistenia poskytujú projektantom elektrického vedenia základné rozhodovacie údaje pre fázu predbežného návrhu, čo umožňuje optimalizáciu geometrie stožiarov a usporiadania fáz bez potreby výpočtovo náročných simulácií.

Kľúčové slová:účinky elektrického poľa; elektromagnetické polia; svetlá výška; nadzemné prenosové vedenia; fázové usporiadanie; plánovanie energetickej sústavy

1. Úvod

Nadzemné elektrické vedenia (OPL) sú významným zdrojom nízkofrekvenčných elektromagnetických polí (EMF), konkrétne pri sieťovej frekvencii 50 Hz alebo 60 Hz. Tieto polia s extrémne nízkou frekvenciou (ELF) sú klasifikované ako neionizujúce žiarenie, čo znamená, že nemajú dostatok energie na to, aby spôsobili ionizáciu v biologickom tkanive. Štúdium ELF-EMF sa vo všeobecnosti delí na dve hlavné kategórie: potenciálne účinky na zdravie a problémy s technickým rušením.

Zdravotné dopady vystavenia sa ELF zostávajú predmetom rozsiahleho výskumu a verejnej diskusie. Súčasné stanovisko CIGRE je, že napriek rozsiahlemu celosvetovému štúdiu neboli jasne identifikované žiadne nepriaznivé účinky na zdravie. CIGRE uvádza, že je rozumné dospieť k záveru, že kauzálna súvislosť s chorobami, ako je detská leukémia, môže... výskyt ochorení alebo neurodegeneratívnych porúch je veľmi nepravdepodobný a že súčasné limity ICNIRP sú primerané [1]. Podobne ICNIRP poznamenala, že existujúce dôkazy o dlhodobom vystavení magnetickým poliam sú príliš slabé na to, aby tvorili základ pre smernice o vystavení, pričom potvrdené účinky sú obmedzené na akútne interakcie s elektrickými poľami.

Check for updates

Akademický redaktor: Andreas Sumper

Prijaté: 2. februára 2026

Revidované: 5. marca 2026

Schválené: 1. apríla 2026

Publikované: 1. mája 2026

Autorské práva:© 2026 autori. Držiteľ licencie MDPI, Bazilej, d. Švajčiarsko. Tento článok je článok s e otvoreným prístupom distribuovaný podľa podmienokLicencia Creative na Comm Attribution (CC BY).

Napriek tomu, že sa národné a medzinárodné vedecké organizácie zhodujú v tom, že pri štandardných úrovniach životného prostredia neexistujú žiadne nepriaznivé zdravotné následky, verejné obavy zostávajú značné [2–5Je však dôležité poznamenať, že elektromagnetické pole z optických lúčov môže spôsobiť závažné zdravotné riziká pri interakcii s aktívnymi implantovateľnými zdravotníckymi pomôckami (AIMD), ako sú kardiostimulátory [1].

Z technického hľadiska ELF polia indukujú napätia a prúdy vo vodivých objektoch v blízkosti priestranstva. Tieto indukované veličiny môžu mať za následok:

• Korózia podzemných alebo nadzemných potrubí [6,7].
• Porucha plne dielektrických samonosných (ADSS) optických káblov [8].
• Rušenie železničných signalizačných systémov [9].
• Z vozidiel alebo budov pri kontakte preteká nebezpečný prúd [9].

1.1. Legislatíva a limity expozície

Tento dokument sa zameriava predovšetkým na vystavenie širokej verejnosti limitným hodnotám. V roku 1999 Európsky parlament vydal odporúčanie 1999/519/ES [10], ktorá definuje limity vystavenia verejnosti elektromagnetickému žiareniu (0 Hz až 300 GHz). Následne v roku 2010 ICNIRP aktualizovala referenčné úrovne pre vystavenie verejnosti hustote magnetického toku [11]. Tieto hodnoty, ako je uvedené v tabuľke1, sú odvodené z odporúčaní ICNIRP, ktoré sú určené na ochranu pred akútnymi účinkami [11]. V prípade expozície na pracovisku sa uplatňuje smernica 2013/35/EÚ.

Tabuľka 1. Limitné hodnoty pre verejné ožiarenie a akčné hodnoty pre ožiarenie v práci pri 50 Hz.

Typ expozície	**Elektrické pole Intenzita (V_{RMS}) kVm^{-1}]**	**Magnetické Hustota toku ($B_{.RMS}$) [μT]**
Verejná expozícia – odporúčanie ICNIRP z roku 2010 [11]	5	200
Expozícia na pracovisku – smernica 2013/35/EÚ [5]	10	1000

1.2. Globálne porovnanie regulačných rámcov

Hoci európske štáty sa vo všeobecnosti riadia usmerneniami ICNIRP, konkrétne národné legislatívy sa výrazne líšia. V roku 2018 Národný inštitút pre verejné zdravie a životné prostredie v Holandsku (RIVM) vykonal porovnanie základných veličín (V_{RMS} a$B_{.RMS}$) v 37 krajinách s využitím údajov z národných ministerstiev zdravotníctva a nemeckého Federálneho úradu pre ochranu pred žiarením [2Tabuľka2zhŕňa tieto zistenia.

Porovnávacia analýza legislatívnych rámcov pre elektromagnetické polia s frekvenciou 50 Hz v 37 krajinách je uvedená v tabuľke2Zistilo sa, že zatiaľ čo niektoré krajiny (ako napríklad Andorra, Kazachstan, Ukrajina a Bielorusko) nemajú špecifické legislatívne obmedzenia, a preto nie sú uvedené, skúmané krajiny vykazujú značné rozdiely. Väčšina štátov dodržiava štandardné limity 5 kV/m a 100μT. V špecifických kontextoch sa však presadzujú prísne konzervatívne limity. Ako je uvedené v tabuľke, Litva a Rusko presadzujú limit 0,5 kV/m pre vnútorné prostredie, zatiaľ čo Slovinsko uplatňuje rovnaký limit 0,5 kV/m pre citlivé oblasti. Podobne Srbsko a nové inštalácie v Chorvátsku definujú prísnu referenčnú úroveň 2 kV/m [12]. Naproti tomu krajiny ako Lotyšsko, Poľsko a Turecko povoľujú výrazne vyššie intenzity elektrického poľa, v rozmedzí od 10 do 15 kV/m. Okrem toho krajiny ako Taliansko, Švajčiarsko a Holandsko zaviedli systémy s dvojitým limitom, ktoré rozlišujú medzi okamžitou expozíciou a prísnejšími dlhodobými priemermi (dennými alebo ročnými) na zmiernenie chronickej expozície. Napokon, krajiny označené kurzívou, ako napríklad Holandsko, Austrália a Spojené kráľovstvo, používajú skôr nezáväzné odporúčania ako zákonné limity, hoci verejný tlak často nariaďuje ich dodržiavanie.

Tabuľka 2. Legislatívne porovnanie (vystavenie verejnosti) elektrického poľa s frekvenciou 50 Hz (V_{RMS}) a hustota magnetického toku ($B_{.RMS}$) limity v 37 krajinách [2Krajiny kurzívou označujú nezáväzné predpisy.

Štát	V_{RMS} kVm^{-1}]	$B_{.RMS}$[μT]
Albánsko	5	100
Austrália	5	100
Rakúsko	5	100
Belgicko	5	100
Čína	4	100
Chorvátsko	5	100
Chorvátsko (Nové inštalácie)	2	40
Cyprus	5	100
Česká republika	5	100
Estónsko	5	100
Fínsko	5	100
Francúzsko	5	100
Nemecko	5	100
Grécko	5	100
Maďarsko	5	100
Taliansko	5	100
Taliansko (denný priemer)	–	10
Japonsko	3	200
Lotyšsko	10	640
Lichtenštajnsko	5	100
Litva (Interiér)	0,5	20
Luxembursko	5	100
Malta	5	100
Holandsko	8	120
Holandsko (ročný priemer)	–	0,4
Nový Zéland	5	100
Nórsko	5	200
Poľsko	10	75
Portugalsko	5	100
Rumunsko	5	100
Rusko	–	100
Rusko (verejné vnútorné	0,5	5
priestory) San Maríno	5	100
Srbsko	2	40
Slovensko	5	100
Slovinsko	10	100
Slovinsko (citlivé)	0,5	10
Švajčiarsko	5	100
Švajčiarsko (denný priemer)	–	1
Turecko	15	200
Spojené kráľovstvo	5	100
USA (regionálne sa líšia)	1–11,8	15 – 20

1.3. Dôsledky návrhu pre vedenia EHV

Pre vedenia veľmi vysokého napätia (EVN), najmä pre štandardnú sieť 400 kV, technické normy ako STN EN 50341-1 zvyčajne vyžadujú minimálnu zemnú výšku 8 m, aby sa zabezpečila koordinácia izolácie a fyzická bezpečnosť [13]. V praxi však na dodržanie štandardného limitu verejného ožiarenia V_{RMS}≤Pri 5 kV/m – čo je regulačný prah na Slovensku, v Českej republike a mnohých ďalších európskych krajinách – sú projektanti často povinní zvýšiť výšku stožiarov.

V našej predchádzajúcej práci [14] sme rozsiahlo analyzovali elektrické a magnetické polia pre štandardné vzdialenosti predpísané národnými normami (8 m pre 400 kV a 6 m pre 110 kV). Táto štúdia preukázala, že zatiaľ čo klasické vzdialenosti sú vo všeobecnosti postačujúce pre vedenia 110 kV, často sú nedostatočné pre vedenia 400 kV EVN, čo vedie k úrovniam polí, ktoré prekračujú limity vystavenia verejnosti. V dôsledku toho musia byť vodiče často zdvihnuté na úrovne presahujúce 12 m v najnižšom bode rozpätia, aby sa zabezpečil súlad s predpismi.

Zatiaľ čo nižšie úrovne napätia (110 kV a 220 kV) vo všeobecnosti nie sú obmedzené úvahami o elektromagnetickom poli [14], optimalizácia 400 kV vedení predstavuje významnú inžiniersku výzvu. Vychádzajúc z zistení v [14], tento článok demonštruje, že pomocou optimálneho fázového sledu je možné minimálnu svetlú výšku pre vedenia 400 kV primerane znížiť z konzervatívnej hodnoty pod 12 m vo väčšine rozpätí.

Výpočtový rámec tejto štúdie je založený na všeobecnom analytickom riešení pre elektromagnetické polia obklopujúce viacfázové elektrické vedenia, ako ho opísal Olsen [9].

Tradične sa overovanie zhody s EMF vykonáva počas záverečných fáz validácie inžinierskeho procesu. Stanovenie minimálnej svetlej výšky je však základným parametrom, ktorý významne ovplyvňuje geometriu veže a ekonomiku projektu; preto by sa malo stanoviť už počas fázy predbežného návrhu, aby sa predišlo nákladným iteratívnym úpravám.

Na riešenie tohto problému článok predstavuje praktický nástroj na rozhodovanie, ktorý umožňuje projektantom elektrického vedenia definovať minimálnu požadovanú zemnú výšku a optimálny sled fáz na začiatku projektu. Tento prístup eliminuje potrebu vlastných štúdií [15], výpočtovo náročné simulácie, ako napríklad analýza konečných prvkov [16–18 rokov] alebo umelé neurónové siete [19] pre štandardné konfigurácie veží. Analýza a výsledné pokyny sú prispôsobené tak, aby spĺňali najbežnejšie medzinárodné bezpečnostné limity, V_{RMS}= 5 kV/m a B_{RMS}= 100μT.

1.4. Praktické využitie a novosť štúdie

Hoci je fyzika elektromagnetických polí v blízkosti elektrického vedenia dobre zdokumentovaná – ako je vidieť v základných prácach, ako napríklad CIGRE TB 373 [20] a 795 [21]—pretrváva značná priepasť medzi technickou teóriou na vysokej úrovni a okamžitými potrebami projektantov prenosových vedení. V súčasnej inžinierskej praxi neexistuje štandardizovaný, univerzálny návod, ktorý by definitívne spájal konkrétnu geometriu stožiarov a fázovú postupnosť s vopred určenou minimálnou výškou. V dôsledku toho sú projektanti zvyčajne nútení vykonávať vlastné, iteratívne výpočty pre každý nový projekt, aby zabezpečili súlad s normami 5 kV/m a 100μT limity.

Táto práca sa odlišuje od predchádzajúcich vysoko presných 3D numerických metód, ktoré využívajú tvar reťaze vodičov [22]. Aj keď sú takéto 3D modely nevyhnutné pre konečné overenie konkrétnych existujúcich rozpätí, často sú príliš výpočtovo náročné na fázu predbežného návrhu. Pre praktické inžinierske účely potrebujú projektanti predovšetkým hodnoty špičkového poľa vyskytujúce sa v bode maximálneho priehybu vodiča. V tomto scenári poskytuje 2D analytický model spoľahlivý, konzervatívny odhad, ktorý zefektívňuje proces rozhodovania.

Táto práca rieši tento praktický nedostatok poskytnutím nástroja na priame rozhodovanie pre expresné určenie minimálnych svetlých výšok. Kategorizáciou štandardných konfigurácií veží a optimalizáciou fázových postupností táto štúdia prekladá zložité 2D rovnice poľa do rámca pripraveného na použitie. To umožňuje inžinierom stanoviť kritické parametre svetlých výšok v najskorších fázach procesu návrhu bez potreby opakovaných simulácií špecifických pre projekt. Prínos tejto práce teda nespočíva v odvodení nových fyzikálnych zákonov, ale vo vytvorení optimalizovaného inžinierskeho riešenia.

metodika, ktorá zefektívňuje prechod od regulačných bezpečnostných limitov k návrhu fyzických veží.

2. Metodika

2.1. Výpočet hustoty magnetického toku

Hustota magnetického toku pod nadzemnými prenosovými vedeniami sa vyhodnocuje pomocou princípov teórie elektromagnetického poľa. Analýza využíva magnetické pole generované vodičmi s prúdom, pričom každý vodič sa považuje za nekonečne dlhý priamy prvok prúdu v 2D súradnicovom systéme.

Pre zaistenie matematickej prehľadnosti je definovaný karteziánsky súradnicový systém, kde *x*-os predstavuje horizontálnu vzdialenosť od stredovej čiary veže, *y*-os predstavuje vertikálnu výšku nad plochou Zemou (*y*=0 na úrovni zeme).

Pre nekonečne dlhý priamy vodič, ktorým tečie prúd *Ja*, hustota magnetického toku v ktoromkoľvek bode priestoru sa riadi obvodovým zákonom odvodeným z Ampèrovho zákona. Intenzita magnetického poľa *H* okolo vodiča je daný vzťahom

$$\oint H \cdot dl = Ja_{\text{encyklopédia}} \tag{1}$$

kde $\oint$ označuje priamkový integrál okolo uzavretej slučky, *dl* je diferenciálny vektorový prvok cesty a $Ja_{\text{encyklopédia}}$ je čistý elektrický prúd ohraničený dráhou.

Pre špecifický prípad kruhovej dráhy so stredom v jednom vodiči, ktorým preteká prúd *Ja*, uzavretý prúd je jednoducho $Ja_{\text{encyklopédia}} = Ja$ To vedie k veľkosti hustoty magnetického toku:

$$|B| = \frac{\mu_0 Ja}{2\pi r} \tag{2}$$

kde *r* je kolmá vzdialenosť od osi vodiča k bodu pozorovania a $\mu_0 = 4\pi \times 10^{-7}$ H/m je priepustnosť voľného priestoru.

V karteziánskom súradnicovom systéme sú zložky vektora hustoty magnetického toku pre vodič nachádzajúci sa v polohe ($x_{\text{podvod}}, y_{\text{podvod}}$) s prúdom *Ja* sú

$$B.(P) = \frac{\mu_0 Ja}{2\pi(r_{2x} + r_{2\ y})} \left[\quad \right] - r_Y \tag{3}$$

kde $B.(P)$ je vektor hustoty magnetického toku v pozorovacom bode $P(x_P, y_P)$ a zložky vektora polohy sú

$$r_x = x_P - x_{\text{podvod}} \tag{4}$$

$$r_y = y_P - y_{\text{podvod}} \tag{5}$$

Pre nadzemné prenosové vedenia s viacerými vodičmi platí princíp superpozície. Hustota magnetického toku v ktoromkoľvek bode je vektorovým súčtom príspevkov jednotlivých vodičov

$$B.(P) = \sum_{k=1}^{N} B.k(P) \tag{6}$$

kde *N* je celkový počet vodičov a $B.k(P)$ je príspevok magnetického poľa *k*-tý dirigent.

https://doi.org/10.3390/electricity7020039

Pre časovo premenné prúdy charakteristické pre striedavé napájacie systémy sa každý vodičový prúd vyjadruje ako

$$J_{ak}(t) = \hat{I}_k \cos(\omega t + \varphi_k) \tag{7}$$

kde $\hat{I}_k$ je amplitúda prúdu, $\omega = 2\pi f$ je uhlová frekvencia (f pričom systémová frekvencia) a φ_k je fázový uhol prúdu pretekajúceho vodičom k.

Celková časovo závislá hustota magnetického toku sa stáva

$$B_{\text{spolu}}(P,t) = \sum_{k=1}^{N} \frac{\mu_0 \hat{J}_{ak} \cos(\omega t + \varphi_k)}{2\pi} \left[\frac{r_{y,k}}{r_{x,k}^2 + r_{y,k}^2} \right] \tag{8}$$

kde $r_{x,k}$ a $r_{y,k}$ zodpovedajú zložkám vzdialenosti definovaným v (4) a (5) vzhľadom na k-tý dirigent.

Hodnota RMS pre posúdenie expozície sa vypočíta ako

$$B_{\text{RMS}} = \sqrt{\frac{1}{T_0} \int_T |B_{\text{celkový}}(P,t)|^2 dt} \tag{9}$$

kde $T = 1/f$ je perióda cyklu striedavého prúdu.

2.2. Výpočet intenzity elektrického poľa

Analýza elektrického poľa pre nadzemné prenosové vedenia vyžaduje zohľadnenie elektrostatického poľa vytváraného nabitými vodičmi nad vodivou uzemňovacou rovinou. Na splnenie okrajovej podmienky nulového potenciálu na úrovni zeme sa používa metóda snímok.

V 2D probléme je každý vodič modelovaný ako nekonečný čiarový náboj s lineárnou hustotou náboja λ [C/m]. Elektrostatický potenciál v ktoromkoľvek bode sa riadi vzťahom:

$$\mathbf{V} = -\nabla V. \tag{10}$$

kde $\mathbf{V}$ je vektor intenzity elektrického poľa a $\nabla V.$ je gradient skalárneho elektrického potenciálu $V.$ Pre čiarový náboj je potenciál vo vzdialenosti r je

$$V.(r) = -\frac{\lambda}{2\pi\varepsilon_0} \mathrm{v}(r) \tag{11}$$

kde $\epsilon_0 = 8{,}854 \times 10^{-12}$ F/m je permitivita voľného priestoru.

Prítomnosť vodivej uzemňovacej roviny na $y=0$ je modelovaná pomocou metódy obrazov. Pre každý vodič v polohe (x_{ja}, y_{ja}) s hustotou náboja v čiare λ_{ja}, vodič obrazu je umiestnený v $(x_{ja}, -y_{ja})$ s hustotou náboja $-\lambda_{ja}$ Matica potenciálových koeficientov vzťahujúcich sa na fázové napätie vodiča k napätiu uzemnenia [U] hustoty náboja v čiare sú

$$[P][\lambda] = [U] \tag{12}$$

kde [P] je matica potenciálnych koeficientov (Maxwellove potenciálne koeficienty), [λ] je stĺpcový vektor lineárnych hustôt náboja na vodičoch a [U] je stĺpcový vektor potenciálov (napätí) vodičov vzhľadom na zem.

https://doi.org/10.3390/electricity7020039

Pre k-vodičový systém, matica koeficientov plného potenciálu $[P]$ je daný

$$[P] = \frac{1}{2\pi\varepsilon_0} \begin{pmatrix} \ln\left(\frac{2h_1}{R_1}\right) & \ln\left(\frac{D_{\text{obrázok}\,12}}{D_{\text{skutočný}\,12}}\right) & \cdots & \ln\left(\frac{D_{\text{obrázok}\,1k}}{D_{\text{skutočný}\,1k}}\right) \\ \ln\left(\frac{D_{\text{obrázok}\,21}}{D_{\text{skutočný}\,21}}\right) & \ln\left(\frac{2h_2}{R_2}\right) & \cdots & \ln\left(\frac{D_{\text{obrázok}\,2k}}{D_{\text{skutočný}\,2k}}\right) \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ \ln\left(\frac{D_{\text{obrázok}\,k1}}{D_{\text{skutočný}\,k1}}\right) & \ln\left(\frac{D_{\text{obrázok}\,k2}}{D_{\text{skutočný}\,k2}}\right) & \cdots & \ln\left(\frac{2h_k}{R_k}\right) \end{pmatrix} \tag{13}$$

Diagonálne prvky (koeficienty vlastného potenciálu) sú

$$P_{jj} = \frac{1}{2\pi\varepsilon_0} \ln\left(\frac{2h_j}{r_j}\right) \tag{14}$$

a prvky mimo diagonály (koeficienty vzájomného potenciálu) sú

$$P_{jk} = \frac{1}{2\pi\varepsilon_0} \ln\left(\frac{D_{\text{obrázok}\,jk}}{D_{\text{skutočný}\,jk}}\right) \tag{15}$$

V týchto výrazoch, P_{jj} a P_{jk} označujú prvky potenciálnej matice $[P]$ (odlišný od pozorovacieho bodu P). Okrem toho, h_j je výška vodiča j nad zemou, R_j je polomer vodiča, $D_{\text{skutočný}\,jk}$ je vzdialenosť medzi skutočnými vodičmi j a k dané

$$D_{\text{skutočný}\,jk} = \sqrt{(x_j - x_k)^2 + (y_j - y_k)^2} \tag{16}$$

a $D_{\text{obrázok}\,jk}$ je vzdialenosť od vodiča j k obrazu dirigenta k dané

$$D_{\text{obrázok}\,jk} = \sqrt{(x_j - x_k)^2 + (y_j + y_k)^2} \tag{17}$$

Keď sú hustoty náboja v čiare určené riešením (12), elektrické pole v pozorovacom bode $P = (x_P, y_P)$ sa vypočíta superpozíciou príspevkov od reálnych aj obrazových vodičov:

$$V_{\text{spolu}}(P) = \sum_{j=1}^{k} V_{\text{skutočný}\,j}(P) + \sum_{j=1}^{k} V_{\text{obrázok}\,j}(P) \tag{18}$$

Pre skutočný vodič s hustotou čiarového náboja λ_k na pozícii (x_k, y_k), príspevok elektrického poľa je

$$V_{\text{skutočný}\,k}(P) = \frac{\lambda_k}{2\pi\varepsilon_0 (r_{\text{skutočný}\,k})^2} \begin{bmatrix} x_P - x_k \\ y_P - y_k \end{bmatrix} \tag{19}$$

kde $r_{\text{skutočný}\,k} = \sqrt{(x_P - x_k)^2 + (y_P - y_k)^2}$.

Pre zodpovedajúci obrazový vodič s hustotou náboja $-\lambda_k$ na pozícii $(x_k, -y_k)$, príspevok elektrického poľa je

$$\mathbf{V}_{\text{obrázok}\,k}(\mathbf{P}) = \frac{-\lambda_k}{2\pi\varepsilon_0 (r_{\text{obrázok}\,k})^2} \begin{bmatrix} x_P - x_k \\ y_P - (-y_k) \end{bmatrix} \tag{20}$$

https://doi.org/10.3390/electricity7020039

kde $r_{obrázok} = \sqrt{(x_P - x_k)^2 + (y_P + y_k)^2}$.

V striedavých systémoch sa napätie na vodičoch mení sínusoidne:

$$U_k(t) = \hat{U}_k \cos(\omega t + \varphi_{U,k}) \tag{21}$$

kde $\hat{U}_k$ je amplitúda napätia vodiča k a $\varphi_{U,k}$ je fázový uhol napätia pre vodič k.

Hustoty náboja v sieti sa stávajú časovo závislými prostredníctvom vektora napätia v (12). Riešenie časovo premenných nábojov na vedení dáva $\lambda_j(t)$ a celkové elektrické pole sa stáva

$$\begin{aligned} V_{spolu}(P,t) &= \sum_{j=1}^{k} V_{skutočný\ j}(P,t) + \sum_{j=1}^{k} V_{obrázok\ j}(P,t) \\ &= \sum_{j=1}^{k} \frac{\lambda_j(t)}{2\pi\varepsilon_0 (r_{j\ skutočný})^2} \begin{bmatrix} x_P - x_j \\ y_P - y_j \end{bmatrix} \\ &\quad + \sum_{j=1}^{k} \frac{-\lambda_j(t)}{2\pi\varepsilon_0 (r_{j\ obrázok})^2} \begin{bmatrix} x_P - x_j \\ y_P + y_j \end{bmatrix} \end{aligned} \tag{22}$$

kde $r_{skutočný\ j} = \sqrt{(x_P - x_j)^2 + (y_P - y_j)^2}$ a $r_{obrázok\ j} = \sqrt{(x_P - x_j)^2 + (y_P + y_j)^2}$, ako je definované predtým v (19) a (20).

RMS veľkosť elektrického poľa pre posúdenie expozície je

$$V_{RMS} = \sqrt{\frac{1}{T_0} \int_T |V_{spolu}(P,t)|^2 dt} \tag{23}$$

Táto metodika poskytuje komplexný rámec pre výpočet magnetických aj elektrických polí pod vplyvom OPL, pričom zohľadňuje viacvodičové konfigurácie a vplyvy uzemňovacej roviny.

3. Vlastnosti modelu

Elektrické pole V a hustota magnetického toku B. Rozloženie pod trolejovým vedením bolo vyhodnotené pre štyri štandardné geometrie stožiarov EVN 400 kV. Prieskum zohľadňuje dve jednoobvodové konfigurácie: stožiar Cat (obrázok 1), ktorá sa vyznačuje trojuholníkovým fázovým usporiadaním a portálovou vežou (obrázok 2), ktorý využíva horizontálnu planárnu konfiguráciu. Okrem toho sa porovnávajú dva dvojokruhové návrhy: veža Dunaja (obrázok 3), ktorá sa vyznačuje širokými požiadavkami na prednosť pri cestnej premávke a vežou Barrel (obrázok 4), ktorý využíva vertikálne fázové usporiadanie.

Všetky výpočty ELF boli vykonané pomocou softvéru EMFTsim2 2.2, ktorý implementuje vyššie opísanú metodiku na určenie V a B. EMFTsim2 je druhou generáciou balíka priemyselných simulácií pôvodne vyvinutého v spoločnosti SAG Elektrovod. Počiatočná verzia, EMFTsim1 1.0, bola vyvinutá v roku 2015 pomocou jazyka Fortran 90, zatiaľ čo súčasný EMFTsim2 bol v roku 2018 prepísaný v jazyku Java s cieľom zvýšiť výpočtovú efektivitu a integráciu. Spoľahlivosť tohto softvéru bola rozsiahlo overená porovnaním s meraniami in situ a výsledkami z iných zavedených simulačných nástrojov, ako je zdokumentované v [23] Od svojho overenia bol softvér použitý v desiatkach profesionálnych projektov hodnotenia EMF pre siete 400 kV a 110 kV na Slovensku a v Českej republike, čím preukázal svoju robustnosť v priemyselnej praxi.

Na riešenie zložitých konfigurácií vodičov uvedených v tabuľke 3 EMFTsim2 rozširuje teoretický rámec pre jeden vodič odvodený v časti 2 prostredníctvom princípu superpozície. Zatiaľ čo teoretická časť popisuje oblasť generického

prúdový prvok, softvérové vstupy využívajú tieto parametre na modelovanie zväzkových vodičov rozložením každej fázy na n jednotlivé vedľajšie vodiče. Pre konfigurácie trojitého zväzku použité v tejto štúdii je zväzok modelovaný ako tri odlišné paralelné vodiče usporiadané v obrátenom trojuholníku (jeden vedľajší vodič dole), pričom celkový fázový prúd je medzi ne rovnomerne rozdelený. Geometrické parametre polohy vodičov pre všetky stožiare sú uvedené v tabuľke4.

Pokiaľ ide o geometriu vodiča, simulácia predpokladá 2D prierez v strede rozpätia, kde je priehyb vodiča maximálny. Konfigurácie zväzkov sú modelované ako samostatné, paralelné čiastkové vodiče udržiavané v pevnom priestorovom usporiadaní (obrátený trojuholník pre trojité zväzky) pomocou dištančných vložiek. Štúdia hodnotí polia v tomto špecifickom priereze, pretože vzdialenosť v strede rozpätia je kritickým faktorom určujúcim maximálnu expozíciu elektromagnetickému poľu na úrovni zeme [14]. V dôsledku toho EMFTsim2 pracuje s použitím analytických vzorcov (8) a (22) sčítané cez všetky vedľajšie vodiče, namiesto použitia diferenciálnych vzorcov spojených s metódami numerickej integrácie. To potvrdzuje, že prezentovaný teoretický rámec je priamym matematickým nástrojom simulácie, čím sa zabezpečí, že nedochádza k žiadnym rozporom medzi teóriou a implementáciou.

Tabuľka 3. Elektrické a geometrické parametre vodičov a predpoklady prostredia pre prúdovú zaťažiteľnosť.

Parameter	**Hodnota**
Elektrické a geometrické údaje	
Fázové napätie U Prúd na fázu Ja Typ fázového vodiča	420 kV 2715 A 476-AL1/62-ST1A
Fázový priemer $deň_{pH}$	30,2 mm
Konfigurácia zväzku	n=3, a=0,4 m 183-AL1/43-ST1A
Typ uzemňovacieho vodiča	
Priemer uzemňovacieho drôtu $deň_{gw}$	19,05 mm
Poveternostné podmienky pre výpočet prúdovej zaťažiteľnosti	
Teplota okolia	+ 35 °C
Priemerná rýchlosť vetra	0,6 ms^{-1}
Globálna intenzita slnečného žiarenia	1000 Wm^{-2}
Uhol vetra k osi vodiča	90°
Koeficient absorpcie	0,5
Emisný koeficient	0,5
Maximálna teplota vodiča	80 °C

Numerická analýza je založená na predpoklade dokonale rovného terénu a symetrického rozpätia medzi závesnými stožiarmi na oboch koncoch, pričom každý je vybavený 5 m dlhými izolačnými reťazcami (predpokladá sa, že ide o keramické izolátory). V prípade nadzemných vedení VVN sa používajú aj 4 m dlhé kompozitné izolátory, ale táto prax nie je v regióne slovenských a českých prevádzkovateľov prenosových sústav veľmi bežná. Všetky výpočty boli vykonané pozdĺž priečneho profilu kolmého na os rozpätia v strede rozpätia, čo sa zhoduje s miestom maximálneho priehybu vodiča. Model predpokladá rovnaké charakteristiky priehybu pre zemné vodiče aj fázové vodiče, pričom fázové vodiče využívajú trojuholníkové usporiadanie zväzkov orientovaných s jedným vrcholom smerom nadol. V dôsledku toho je svetlá výška definovaná ako vertikálna vzdialenosť od zeme k najnižšiemu vedľajšiemu vodiču fázového zväzku. Na účely tejto analýzy sa svetlá výška menila od 8 do 14 m v krokoch po 0,01 m. Výsledná $V a B$.Polia predstavujú maximálne hodnoty RMS vypočítané vo výške 1,8 m nad zemou, čo zodpovedá priemernej výške ľudskej hlavy špecifikovanej v smernici 1999/519/ES [10].

Obrázok 1. Geometria mačacej veže 1 ×400 kV.

Obrázok 2. Geometria portálovej veže 1 ×400 kV.

Obrázok 3. Geometria Dunajskej veže 2 ×400 kV.

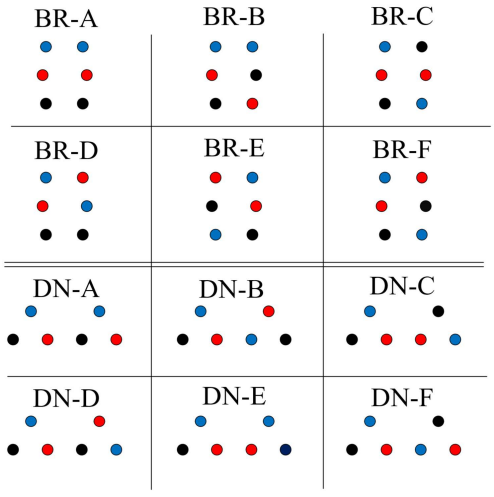
https://doi.org/10.3390/electricity7020039

Obrázok 4. Geometria sudovej veže 2 ×400 kV.

V dvojokruhových a viacokruhových systémoch konfigurácia fázových vodičov významne ovplyvňuje výsledný *V*a *B*.pole. Následne boli pre tieto systémy analyzované všetky možné fázové usporiadania, ako je znázornené na obrázku5Analýza bola obmedzená iba požiadavkou na zachovanie praktického oddelenia s odlišnými obvodmi umiestnenými na opačných stranách telesa veže.

Tabuľka 4. Geometrický popis veží na základe schém.

Názov veže	A [m]	B [m]	C [m]	D [m]	K [m]	L [m]	M [m]	N [m]
Kat. 1 ×400 kV	23,60	3,80	4,90	–	6,80	3,50	–	–
Dunaj 2 ×400 kV	23.24	11,21	2,00	–	6.30	7.30	9,60	12,10
valec 2 ×400 kV	24,00	9,00	9,00	3,60	7,50	9.10	7.10	5.20
Portál 1 ×400 kV	23,00	7.15	–	–	6,00	–	–	–



Obrázok 5. Konfigurácia fázových vodičov pre veže Barell (Br) a Danube (Dn). Fáza 1 je zobrazená červenou farbou, fáza 2 modrou farbou a fáza 3 čiernou farbou.

Všetky skúmané prenosové systémy 400 kV zdieľajú spoločný súbor elektromechanických a geometrických vstupných parametrov vodičov, ktoré sú podrobne uvedené v tabuľke3Efektívne fázové napätie bolo nastavené na hornú hranicu napätia *U*=420 kV a efektívny prúd na fázu bol definovaný ako*Ja*=2715 A.

Podmienky prostredia určujúce maximálny prúd (ampacitu) v Slovenskej republike (SR) sú definované v STN EN 50341-2-23:2016 [24]. Pre typ vodiča 476-AL1/62-ST1A tieto špecifické podmienky vedú k menovitému prúdu 800 A na vodič. Väčšina ostatných krajín EÚ však používa menej konzervatívne hodnoty, konkrétne rýchlosť vetra 0,6 m/s (namiesto 0,5 m/s) a uhol vetra 90◦(namiesto 45◦) [25]. Za týchto štandardných predpokladov, vypočítaných na základe CIGRE TB 601 [26], maximálny prúd na vodič by bol 905 A.

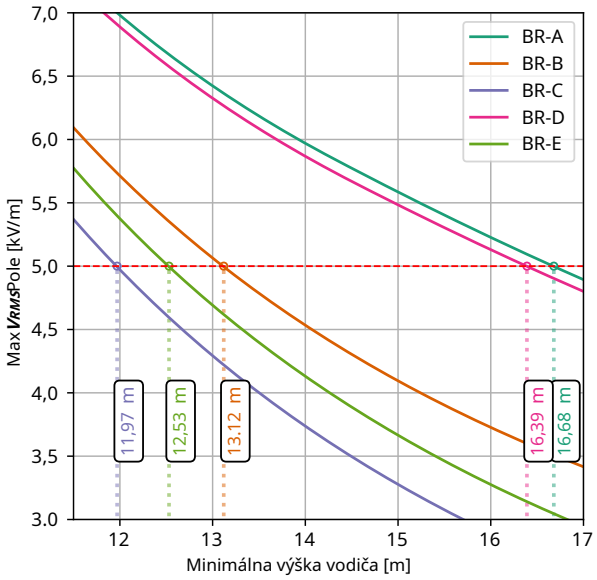
Pre zabezpečenie konzervatívneho posúdenia bezpečnosti boli vypočítané hodnoty pre *V*a*B*. predstavujú najhorší možný scenár. Tento scenár predpokladá maximálne možné prehnutie vodiča, ku ktorému dochádza na konci neelastického predĺženia (tečenia) vodiča približne 40 rokov po inštalácii pri maximálnom tepelnom zaťažení.

4. Výsledky

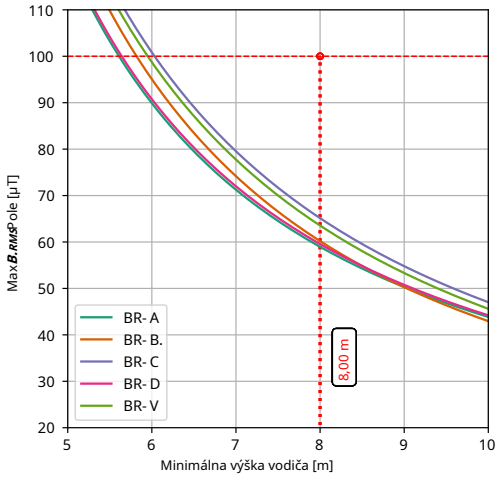
V nasledujúcej časti sú uvedené výsledky všetkých výpočtov *V*a*B*.pre každú zo štyroch konfigurácií veží a fázových usporiadaní ako funkcia svetlej výšky. Minimálna svetlá výška (limitná výška) predstavovala hodnotu, pri ktorej boli dosiahnuté limity expozície definované v tabuľke1(limity vystavenia verejnosti) sú stále splnené. Pre dvojokruhové veže, Barrel a Danube sú číselné hodnoty poľa zhrnuté v tabuľkách.5a6 Zodpovedajúce rozdelenia polí pre obe *V*a*B*.polia sú zobrazené na obrázkoch6a7pre sudovú vežu, ako aj na obrázkoch8a9pre Dunajskú vežu.

Pre jednookruhové veže Cat a Portal sú kompletné vypočítané hodnoty poľa uvedené v tabuľke.7Okrem toho, reprezentatívny graf *V*pre veže Cat aj Portal je znázornená na obrázku10, zatiaľ čo zodpovedajúce*B*.grafy sú znázornené na obrázku11.

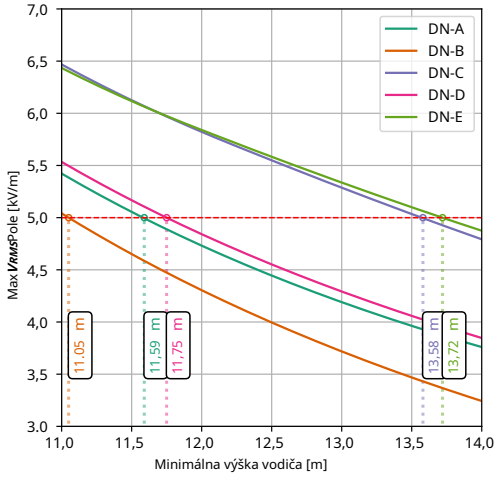
Grafy pre fázové sekvencie Barrel BR-F a Danube DN-F nie sú zobrazené, pretože výsledky sú identické so sekvenciami BR-D a DN-D.



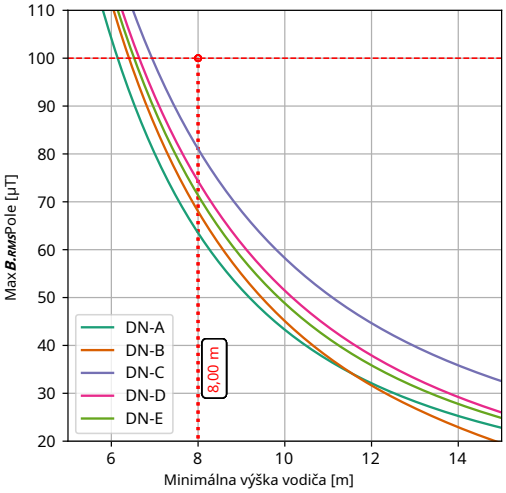
Obrázok 6. Maximálna hodnota V_{RMS}menej ako 2 roky ×400 kV valcová veža ako funkcia svetlej výšky vodiča.



Obrázok 7. Maximálna hodnota B_{RMS} menej ako 2 roky × 400 kV valcová veža ako funkcia svetlej výšky vodiča.

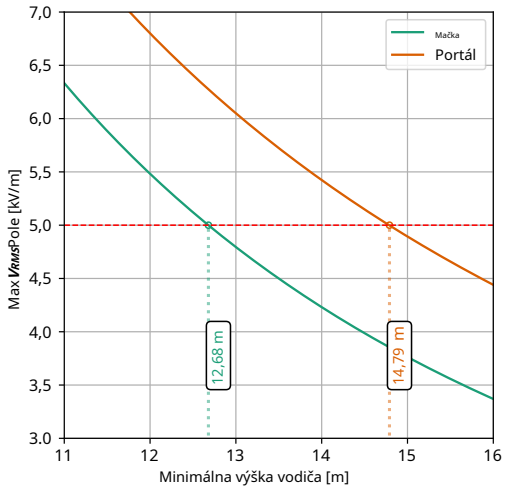


Obrázok 8. Maximálna hodnota V_{RMS} menej ako 2 roky × 400 kV veža Dunaj ako funkcia svetlej výšky vodiča.

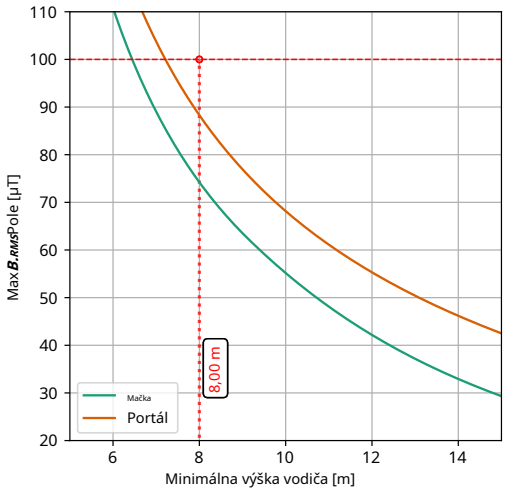


Obrázok 9. Maximálna hodnota B_{RMS} menej ako 2 roky × 400 kV veža Dunaj ako funkcia svetlej výšky vodiča.

https://doi.org/10.3390/electricity7020039



Obrázok 10. Maximálna hodnota V_{RMS} pod 1 × Stožiare Cat a Portal 400 kV v závislosti od svetlej výšky vodičov.



Obrázok 11. Maximálna hodnota B_{RMS} pod 1 × Stožiare Cat a Portal 400 kV v závislosti od svetlej výšky vodičov.

Tabuľka 5. Výsledky analýzy výšky pre 2 osoby × 400 kV veža Dunaj vo všetkých fázových konfiguráciách.

Model	E Medzná výška [m]	B Limitná výška [m]
DN-A	11,59	6.15
DN-B	11.05	6,41
DN-C	13,58	6,94
DN-D	11,75	6,65
DN-E	13,72	6,53
DN-F	11,75	6,65

Tabuľka 6. Výsledky analýzy výšky pre 2 osoby × 400 kV valcová veža vo všetkých fázových konfiguráciách.

Model	E Medzná výška [m]	B Limitná výška [m]
BR-A	16,68	5,62
BR-B	13.12	5,82
BR-C	11,97	6,04
BR-D	16,39	5,65
BR-E	12,53	5,96
BR-F	12,53	5,96

Tabuľka 7.Výsledky analýzy výšky pre 1 ×400 kV Cat a portálové stožiare.

Model	E Medzná výška [m]	B Limitná výška [m]
Mačka	12,68	6,45
Portál	14,79	7.22

5. Diskusia

Výsledky numerickej analýzy naznačujú, že pre všetky skúmané konfigurácie stožiarov 400 kV bola intenzita elektrického poľa *E* je kritickým limitujúcim faktorom určujúcim minimálnu svetlú výšku. Hustota magnetického toku *B*. splnil bezpečnostné limity vo všetkých simulovaných scenároch, a to aj pri štandardnej regulačnej vzdialenosti 8 m. Vypočítané limitné výšky pre *B*. pohybovala sa medzi 5,62 m a 7,22 m, čo je výrazne pod typickou fyzickou vzdialenosťou vedení EVN. V dôsledku toho je zmiernenie elektrického poľa primárnym cieľom pri návrhu a optimalizácii fázových konfigurácií.

Je dôležité zdôrazniť, že tieto výsledky predstavujú najhorší možný scenár. Simulácie predpokladajú, že vodiče sú v maximálnom priehybe po neelastickom predĺžení (tečení) a pracujú pri maximálnej povolenej teplote. V praktickej prevádzke sa takéto podmienky vyskytujú zriedkavo. Okrem toho je elektrické pole funkciou napätia, ktoré zostáva relatívne stabilné. Magnetické pole je však úmerné sieťovému prúdu, ktorý počas 24-hodinového zaťažovacieho cyklu výrazne kolíše. Okrem toho je v reálnych prostrediach elektrické pole často prirodzene zmiernené tieniacimi účinkami vegetácie, budov a nerovností terénu, čo sú faktory, ktoré neboli zahrnuté v tomto modeli rovinatého terénu.

5.1. Dvojokruhové konfigurácie

Pri dvojokruhových vežiach priestorové usporiadanie fáz významne ovplyvňuje rozloženie elektrického poľa na úrovni zeme. Veža typu Donau vo všeobecnosti vytvára nižšie intenzity elektrického poľa v porovnaní s vežou typu Barrel. Tento rozdiel vo výkone sa pripisuje geometrii veží. Najlepšie a najhoršie fázové sekvencie vybraných dvojokruhových vedení z hľadiska svetlej výšky sú znázornené na obrázku.12Dunajský dizajn má štyri fázy umiestnené na spodných priečkach, zatiaľ čo sudový dizajn má iba dve. Blízkosť štyroch fáz v najnižšom bode dunajskej konfigurácie umožňuje efektívnejšie vektorové zrušenie (superpozíciu) elektrických polí generovaných jednotlivými vodičmi, čím sa znižuje výsledná magnitúda poľa vo výške 1,8 m nad zemou.

Obrázok 12. Najlepšie a najhoršie fázové sledy vybraných dvojokruhových vedení z hľadiska svetlej výšky. Fáza 1 je zobrazená červenou farbou, fáza 2 modrou farbou a fáza 3 čiernou farbou.

Optimalizácia fázových postupností ponúka značný potenciál na zníženie požadovaného priestranstva alebo výšky veží. V prípade veže Barrel bola najhorším prípadom konfigurácia BR-A, ktorá si na splnenie bezpečnostných limitov vyžadovala svetlú výšku 16,68 m. Naproti tomu

Optimálna konfigurácia BR-C vyžadovala iba 11,97 m. Prepnutím z fázovej konfigurácie BR-A na BR-C sa požadovaná svetlá výška znížila približne o 28,2 %.

Veža na Dunaji vykazovala podobnú citlivosť na fázové usporiadanie. Optimálna konfigurácia bola DN-B (11,05 m), zatiaľ čo najmenej priaznivá bola DN-E (13,72 m). Taktiež sa pozorovalo, že konfigurácie D a F priniesli rovnaké výsledky pre oba typy veží (BR-D sa rovná BR-F a DN-D sa rovná DN-F) v dôsledku symetrickej povahy elektromagnetických interakcií v týchto špecifických fázových konfiguráciách.

5.2. Jednoobvodové konfigurácie

V analýze jednoobvodových návrhov preukázala veža Cat lepší výkon v porovnaní s portálovou vežou. Portálová veža s horizontálnym rovinným usporiadaním vyžadovala minimálnu svetlú výšku 14,79 m. Veža Cat s využitím trojuholníkového fázového usporiadania (konfigurácia Delilah) spĺňala limity vo výške 12,68 m. Použitie geometrie Cat namiesto geometrie Portal vedie k zlepšeniu svetlej výšky približne o 14,3 %. To naznačuje, že kompaktné trojuholníkové usporiadania sú pri obmedzovaní elektrického poľa účinnejšie ako široké horizontálne konfigurácie.

6. Závery

Táto štúdia poskytuje systematické hodnotenie požiadaviek na svetlú výšku pre nadzemné elektrické vedenia 400 kV na základe obmedzení elektromagnetického poľa. Prehľad medzinárodných regulačných rámcov ukazuje, že väčšina európskych krajín a skúmaných krajín dodržiava štandardné limity expozície 5 kV/m pre elektrické pole a 100μT pre hustotu magnetického toku. Táto legislatívna jednotnosť podčiarkuje širokú použiteľnosť prezentovaných výsledkov v celej kontinentálnej energetickej sieti.

Numerická analýza potvrdzuje, že pre prenosové vedenia EVN je intenzita elektrického poľa*V* je rozhodujúcim konštrukčným obmedzením. V každom simulovanom scenári je hustota magnetického toku*B.*zostal výrazne pod hranicou 100μPrahová hodnota T, a to aj pri minimálnej technickej vzdialenosti 8 m. Preto musia bezpečnostné posúdenia a zmierňovacie opatrenia uprednostňovať elektrické pole, ktoré si často vyžaduje výšky stožiarov presahujúce štandardné mechanické požiadavky.

Kľúčové je, že tento výskum zdôrazňuje vplyv optimalizácie polohy fázovej postupnosti ako primárnej techniky zmierňovania. Pri dvojobvodových konfiguráciách môže výber optimálneho usporiadania fáz znížiť požadovanú svetlú výšku o niekoľko metrov – najmä v konfigurácii veže Barrel – bez toho, aby vznikli dodatočné stavebné náklady.

Údaje uvedené v tomto článku slúžia ako dôležitý nástroj pre projektantov elektrických vedení. Integráciou týchto zistení do fázy predbežného návrhu môžu inžinieri určiť optimálnu geometriu stožiarov a postupnosť fáz už v ranej fáze životného cyklu projektu. Tento proaktívny prístup zabraňuje potrebe nákladných iteratívnych úprav alebo zložitých vlastných simulácií neskôr v procese, čím sa zabezpečuje súlad s predpismi a ekonomická efektívnosť pri vývoji prenosovej infraštruktúry 400 kV.

Príspevky autorov: Konceptualizácia, JB a MC; metodológia, JB; validácia, Ž.E a MC; formálna analýza, Ž.E.; skúmanie, JB; zdroje, MC; písanie – príprava pôvodného návrhu, JB; písanie – kontrola a úprava, MC; vizualizácia, Ž.E.; supervízia, Ž.E.; administrácia projektu, JB Všetci autori si prečítali a súhlasia s publikovanou verziou rukopisu.

Financovanie:Túto prácu podporila agentúra VEGA MŠVVaŠ SR v rámci grantu č. VEGA 1/0390/23 a Agentúra na podporu výskumu a vývoja na základe zmluvy č. APVV-23-0025.

Vyhlásenie o dostupnosti údajov:Údaje sú obsiahnuté v článku.

Poďakovanie: Počas prípravy tohto rukopisu autori použili Geminy na účely gramatickej korekcie angličtiny. Autori skontrolovali a upravili výstup a preberajú plnú zodpovednosť za obsah tejto publikácie.

Konflikty záujmov: Autori vyhlasujú, že nemajú žiadny konflikt záujmov.

Referencie

1. Pracovná skupina – C3.19.*TB 806 – Zodpovedné riadenie elektrických a magnetických polí (EMF)*Technické brožúry; Cigre: Paríž, Francúzsko, 2020.
2. Stam, R.*Porovnanie medzinárodných politík v oblasti elektromagnetických polí (polia výkonovej frekvencie a rádiofrekvenčné polia)*Národný inštitút pre verejné zdravie a životné prostredie, RIVM: Bilthoven, Holandsko, 2018.
3. Porsius, JT; Claassen, L.; Smid, T.; Woudenberg, F.; Timmermans, DR Reakcie zdravotníctva na novú trasu vysokonapäťového elektrického vedenia: Návrh kváziexperimentálnej prospektívnej terénnej štúdie v Holandsku.*BMC Verejné zdravie***2014**, *14*, 237. [CrossRef] [ ]PubMed]
4. Porsius, JT; Claassen, L.; Smid, T.; Woudenberg, F.; Petrie, KJ; Timmermans, DRM Hlásenie symptómov po zavedení nového vysokonapäťového vedenia: Prospektívna terénna štúdia.*Environmentálny výskum*.**2015**, *138*, 112–117. [CrossRef] [ ]PubMed]
5. Európsky parlament a Rada. Smernica Európskeho parlamentu a Rady 2013/35/EÚ z 26. júna 2013 o minimálnych požiadavkách na zdravie a bezpečnosť týkajúcich sa vystavenia pracovníkov rizikám vyplývajúcim z fyzikálnych faktorov (elektromagnetických polí) (20. samostatná smernica v zmysle článku 16 ods. 1 smernice 89/391/EHS) a o zrušení smernice 2004/40/ES.*Úradný vestník Európskej únie***2013**,*L 179*, 1–21. Dostupné online:https://eur-lex.europa.eu/eli/dir/2013/35/oj/eng (prístup 2. marca 2026).
6. von Baeckmann, W.; Schwenk, W.; Prinz, W.*Príručka katódovej ochrany proti korózii*Elsevier Science: Amsterdam, Holandsko, 1997.
7. Dein, AZE; Gouda, OE; Lehtonen, M.; Darwish, MMF Zmiernenie elektrických a magnetických polí nadzemných prenosových vedení s napätím 500 kV.*Prístup k IEEE***2022**, *10*, 33900–33908. [CrossRef]
8. Tuominen, MW; Olsen, RG Elektrické konštrukčné parametre plne dielektrického samonosného optického kábla.*IEEE Trans. Power Deliv.* **2000**, *15*, 940–947. [CrossRef]
9. Olsen, RG*Elektromagnetika vysokonapäťového nadzemného prenosového vedenia, zväzok II*, 2. vydanie; Createspace Independent Publishing Platform: North Charleston, SC, USA, 2018; Zväzok 2.
10. Rada Európskej únie. 1999/519/ES: Odporúčanie Rady z 12. júla 1999 o obmedzení vystavenia verejnosti elektromagnetickým poliam (0 Hz až 300 GHz).*Úradný zborník európskych spoločenstiev***1999**,*L 199*, 59–70. Dostupné online: https://eur-lex.europa.eu/eli/reco/1999/519/oj/eng(prístup 2. marca 2026).
11. Medzinárodná komisia pre ochranu pred neionizujúcim žiarením. Pokyny pre obmedzenie vystavenia časovo premenlivým elektrickým a magnetickým poliam (1 Hz až 100 kHz).*Zdravotná fyzika*.**2010**,*99*, 818–836. [CrossRef] [ ]PubMed]
12. Grbic, M.; Pavlović, A. Praktická implementácia a analýza opatrení na zníženie intenzity elektrického poľa v blízkosti nadzemného vedenia 400 kV. In Zborník z 5. medzinárodnej konferencie o elektromagnetických poliach, zdraví a životnom prostredí – EHE2014, Porto, Portugalsko, 24. – 26. apríla 2014.
13.*STN EN 50341-1:2013-12*Nadzemné elektrické vedenia s napätím presahujúcim 1 kV striedavého prúdu. Časť 1: Všeobecné požiadavky. Spoločné špecifikácie. Slovenský normalizačný inštitút (SÚTN): Bratislava, Slovensko, 2013.
14. Bendík, J.; Cenký, M.; Eleschová, Ž.; Beláň, A.; Cintula, B.; Janiga, P. Porovnanie elektromagnetických polí vyžarovaných typickými stožiarmi nadzemného elektrického vedenia.*Elektrotechnik***2020**, *103*, 1019–1030. [CrossRef]
15. Lunca, E.; Ursache, S.; Salceanu, A. Výpočet a analýza extrémne nízkofrekvenčných elektrických a magnetických polí generovaných dvoma návrhmi nadzemných prenosových vedení s napätím 400 kV.*Meranie***2018**, *124*, 197–204. [CrossRef]
16. Lunca, E.; Neagu, BC; Vornicu, S. Analýza elektromagnetických polí vyžarovaných nadzemnými vedeniami vysokého napätia metódou konečných prvkov. In*Numerické metódy pre energetické aplikácie*; Mahdavi Tabatabaei, N., Bizon, N., vyd.; Springer International Publishing: Cham, Švajčiarsko, 2021; s. 795–821. [CrossRef]
17. Osmani, K.; Schulz, D.; Osmani, K.; Schulz, D. Modelovanie magnetických polí okolo lankových elektrických prenosových vedení pomocou metódy konečných prvkov (FEA).*Energie***2024**, *17*, 801. [CrossRef]
18. Khaled Omar Basharahil, M.; Azlinda Ahmad, N. Charakteristiky elektromagnetických polí z nadzemných vedení, podzemných káblov a transformátorov určené metódou konečných prvkov. V zborníku z medzinárodnej konferencie IEEE o vlastnostiach a aplikáciách dielektrických materiálov (ICPADM) z roku 2021, virtuálna, 12. – 14. júla 2021; s. 338 – 341.CrossRef]
19. Alihodžić, A.; Mujezinović, A.; Turajlić, E. Odhad elektrického a magnetického poľa pod nadzemnými prenosovými vedeniami pomocou umelých neurónových sietí.*Prístup k IEEE***2021**,*9*, 105876–105891. [CrossRef]
20. Pracovná skupina – C4.204.*TB 373 – Techniky zmierňovania magnetických polí sieťovej frekvencie pochádzajúce z technických brožúr o elektrických energetických systémoch*Cigre: Paríž, Francúzsko, 2009.

21. Pracovná skupina – C4.203. *Technická príručka TB 375 pre meranie nízkofrekvenčných elektrických a magnetických polí v blízkosti nadzemných elektrických vedení - Technické brožúry* Cigre: Paríž, Francúzsko, 2009.
22. Modrić, T.; Vujevic, S.; Paladin, I. 3D výpočet elektrického poľa nadzemného elektrického vedenia. *Prog. Elektromag. Výzkum M* **2017**, *53*, 17–28. [CrossRef]
23. Bendík, J. Elektromagnetické polia v blízkosti nadzemných elektrických vedení. Dizertačná práca, Slovenská technická univerzita v Bratislave, Bratislava, Slovensko, 2018.
24. *STN EN 50341-2-23:2016* Nadzemné elektrické vedenia presahujúce 1 kV striedavého prúdu Národné normatívne aspekty (NNA) pre SLOVENSKO (na základe EN 50341-1:2012). Slovenský normalizačný inštitút (SÚTN): Bratislava, Slovensko, 2017.
25. Bendík, J.; Cenky, M.; Rácz, L.; Németh, B. Statické hodnotenie nadzemných elektrických vedení v rôznych európskych krajinách. In Zborník z 24. medzinárodnej vedeckej konferencie o elektroenergetike (EPE) 2024, Kouty nad Desnou, Česká republika, 15. – 17. mája 2024. [CrossRef]
26. Pracovná skupina – B2.42. *TB 601 – Príručka pre výpočty tepelnej odolnosti nadzemných vedení* Cigre: Paríž, Francúzsko, 2014.

Vyhlásenie/Poznámka vydavateľa: Vyhlásenia, názory a údaje obsiahnuté vo všetkých publikáciách sú výlučne názormi jednotlivých autorov a prispievateľov a nie názormi MDPI a/alebo redaktora/editorov. MDPI a/alebo redaktor/editori sa zriekajú zodpovednosti za akékoľvek zranenie osôb alebo ujmu na majetku vyplývajúcu z akýchkoľvek nápadov, metód, pokynov alebo produktov uvedených v obsahu.