

# Numerični izračun vpliva odpada žlednih obtežb z daljnovodnih vodnikov na medfazne distančnike

Borut Zemljarič

*Elektro Gorenjska d.d., Ul. Mirka Vadnova 3a, 4000 Kranj, Slovenija  
E-pošta: borut.zemljarič@elektro-gorenjska.si*

**Povzetek.** V članku je predstavljen pristop k analizi mehanskega odziva daljnovodnega sistema z montiranimi medfaznimi distančniki (MD) v zahtevnih zimskih razmerah, ko sta prisotna oprijem in odpad žlednih obtežb z vodnikov. Medtem ko so električne karakteristike daljnovodne opreme določene z napetostnim nivojem, mehanske karakteristike zahtevajo individualno analizo. Analiza je izvedena kot numerični eksperiment z uporabo metode absolutnih vozliščnih koordinat na tipskem primeru daljnovodnega polja. Numerični rezultati poleg vpogleda v oblike dinamskega odziva vodnikov daljnovoda omogočajo tudi določitev mehanskih karakteristik medfaznih distančnikov in s tem optimalno dimenzioniranje daljnovodne opreme.

**Ključne besede:** daljnovodi, vodniki, dinamika, medfazni distančniki, numerična simulacija, AVK

## A numerical calculation of the impact of ice-shedding from overhead line conductors on interphase spacers

The paper presents an analysis of the mechanical dynamical response of the transmission overhead line with installed interphase spacers in demanding winter conditions in the presence of ice accretion and ice-shedding on conductors. While the electrical characteristics of the transmission line equipment are determined by the voltage level, the mechanical characteristics require a special analysis. The analysis is performed as a numerical experiment using the method of the absolute nodal coordinates on a typical example of the transmission line. The numerical results give an insight into the forms of the dynamic response of the transmission-line conductors and interphase spacers and determine the mechanical characteristics of the interphase spacers and thus an optimal dimensioning of the transmission line equipment.

**Keywords:** power lines, conductors, dynamics, interphase spacers, numerical simulation, AVK

## 1 UVOD

Zmanjševanje dimenzij stebrov visokonapetostnih daljnovodov se lahko v praksi izvede na dva načina. Prvi način je uporaba novejših cevne tehnologije pri izvedbi daljnovodnih stebrov, ki pripomore k zmanjšanju dimenzij stebra. Drugi način je uporaba novejših kompozitnih izolacijskih materialov, ki nadomestijo obstoječe nosilne kovinske daljnovodne konzole. Inženirsko gledano gre za zavestno zmanjševanje dimenzij stebrov in s tem tudi medsebojnih razdalj med vodniki.

Med časovno kratkimi, a zahtevnimi zimskimi razmerami, ko so prisotne intenzivne snežne padavine, je močno povečana verjetnost tvorbe in oprijema žlednih obtežb na vodnikih. Oprijemi žledu na vodnike so običajno neenakomerni, lokalnega značaja, predvsem

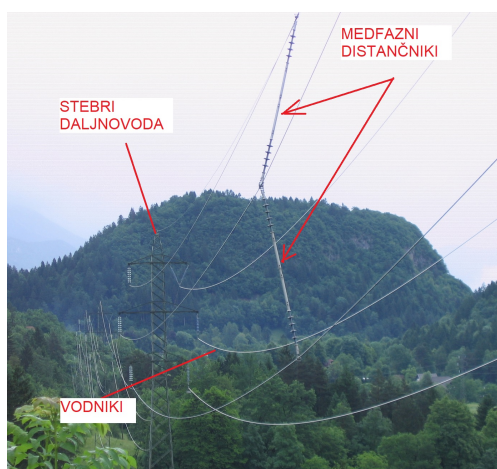
pa so težko vnaprej predvidljivi. Ko je žledna obtežba oprijeta na vodniku, pride do spremembe medsebojnega položaja vodnikov z vzpostavitvijo novega mehanskega ravnovesnega stanja. Enako velja ob odpadu žledne obtežbe z vodnikov. Do težav pride, ko so med obratovanjem zaradi izrednih vremenskih razmer, izpolnjeni pogoji, ki privedejo do medsebojnega dotika vodnikov. To pomeni nezaželeni kratki stik, delovanje zaščite daljnovoda in prekinitev prenosa električne energije.

Ukrepi za preprečevanje medfaznih stikov so različni. Eden izmed možnih ukrepov je uporaba medfaznih distančnikov, s katerimi se zagotavlja stalen razmik med vodniki. Gre za palični izolacijski element, imenovan medfazni distančnik (MD), ki se namesti med dva vodnika. Primer uporabe prikazuje slika 1. Električne lastnosti, ki jih mora izpolniti MD, so splošno določene z izbiro električnega napetostnega nivoja, na katerem element daljnovoda obratuje. Določitev mehanskih lastnosti MD je zahtevnejša naloga. Čeprav je MD kot element elektroenergetskega sistema poznan že vrsto let [1], je v literaturi zaslediti predvsem obravnave razmer obvladovanja galopiranja vodnikov z MD, naprimer [2] in [3]. Drugi sklop literature obsega proučevanje vpliva MD na gibanje vodnikov [4]. Manj obdelana je obravnava mehanskih obremenitev MD, ki jim je izpostavljen med obratovanjem zaradi zahtevnih vremenskih razmer. To vrzel poskuša zapolniti predmetni prispevek.

Medtem ko je statična obravnava mehanskih sil v vodnikih za samostojni vodnik v napenjalnem polju daljnovoda izračunljiva preko klasičnih enačb verižnice, naprimer [5], je treba v primeru statične obravnave dveh vodnikov, med seboj povezanih z enim ali več MD, poseči po eni izmed metod končnih elementov. V tem primeru gre namreč za mehansko med seboj povezan sistem prožnih teles. Eden izmed možnih pristopov je

metoda absolutnih vozliščnih koordinat (AVK) [6]. V predmetni obravnavi gre za razširitev metode, ki je bila uspešno uporabljena pri proučevanju dinamičnih razmer kompaktnih daljnovodov [7].

V prvem delu članka je posplošen opis uporabljenega numeričnega modela AVK za proučevanje statičnih in dinamičnih razmer. Sledijo predstavitev numeričnega eksperimenta, njegove postavitve in karakteristike uporabljenih materialov. S postavitvijo numeričnega eksperimenta se simulira karakteristične odzive daljnovodnega sistema, ki vsebuje MD, na zunanjo motnjo. Zanimivejši poteki odzivov sistema, pomembnejši za inženirsko prakso, so predstavljeni v poglavju rezultati, ki mu sledi navedba pomembnejših zaključkov, pridobljenih na podlagi numeričnih izračunov.



Slika 1: Primer aplikacije medfaznih distančnikov na daljnovodnih vodnikih.

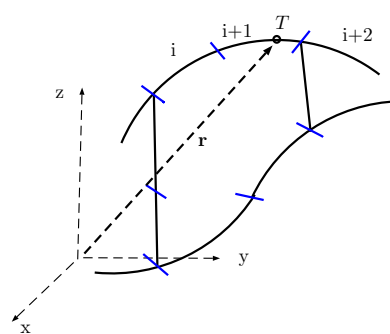
## 2 OPIS NUMERIČNEGA MODELA

Obravnavano mehansko strukturo, v predmetnem primeru daljnovod, razdelimo na končne elemente AVK, kot prikazuje slika 2. Metoda AVK je posebna metoda končnih elementov, ki ne omejuje velikosti zasukov in deformacij elementov. Vozliščne koordinate končnih elementov so podane v globalnem koordinatnem sistemu s krajevnim vektorjem  $\mathbf{r}$  in prav tako tudi krajevni gradienti koordinat. Posledično se prednost takega zapisa izkaže v konstantni masni matriki, ničelnih centrifugalnih silah in ničelnih Coriolisovih silah.

Opraviti imamo s paličnimi končnimi elementi. Velja predpostavka, da je razmerje dolžina proti premeru elementa veliko večje od ena. To omogoča uporabo končnih elementov, ki imajo 12 prostostnih stopenj. Na vsak končni element delujejo različne sile, ki so izražene skozi skupni vektor posplošene sile  $\mathbf{Q} = \mathbf{Q}_e + \mathbf{Q}_g + \mathbf{Q}_{ice} + \mathbf{Q}_w + \mathbf{Q}_{dam}$ , katerega komponente so vezane na absolutne vozliščne koordinate. Na desni strani enačbe so zbrani vektorji zunanjih in notranjih posplošenih sil, ki vplivajo na gibanje posameznih končnih elemen-

tov sestavljenega sistema teles. To so posplošena sila notranjih elastičnih sil  $\mathbf{Q}_e$ , posplošena sila gravitacije  $\mathbf{Q}_g$ , posplošena sila žledne obtežbe  $\mathbf{Q}_{ice}$ , posplošena sila aerodinamičnega delovanja vetra  $\mathbf{Q}_w$  in posplošena sila dušenja  $\mathbf{Q}_{dam}$ . Posamezni matematični izrazi posplošenih sil so zbrani v [7].

Medsebojne odnose končnih elementov v vozliščih je treba opisati z enačbami kinematičnih omejitev. Matrika sistema gibalnih enačb ima potemtakem velikost produkta števila izbranih elementov, pomnoženo s številom absolutnih koordinat, ki opredeljujejo posamezen element, ter številom enačb kinematičnih omejitev gibanja, ki nastopajo v sistemu. V končnem koraku je treba numerično rešiti sistem algebrsko diferencialnih enačb, ki ga opisuje enačba 1.



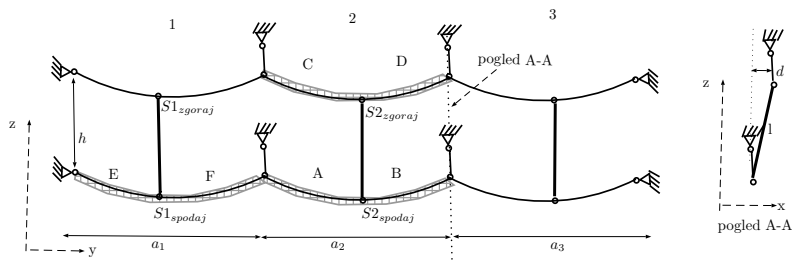
Slika 2: Opis mehanskega sistema z metodo končnih elementov AVK.

$$\begin{bmatrix} \mathbf{M} & \mathbf{C}_e^T \\ \mathbf{C}_e & \mathbf{0} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \ddot{\mathbf{e}} \\ \lambda \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \mathbf{Q}_e \\ \mathbf{Q}_d \end{bmatrix}. \quad (1)$$

Na levi strani enačbe nastopa  $\mathbf{M}$  kot masna matrika elementov,  $\mathbf{C}_e$  kot Jakobijeva matrika kinematičnih omejitev,  $\mathbf{0}$  ničelna matrika,  $\mathbf{Q}_d$  vektor pospeškov koordinat ter  $\lambda$  vektor Lagrangeevih množiteljev. Izkaže se, da v primeru, ko so kinematične omejitve časovno konstantne in krajevno enostavne, vektor  $\mathbf{Q}_d$  v enačbi 1 postane ničelni vektor  $\mathbf{0}$ , po dimenziji enak velikosti števila enačb omejitev. Večina omejitev v daljnovodni tehniki je enostavnih, ker so časovno neodvisne.

## 3 OPIS NUMERIČNEGA EKSPERIMENTA

Numerični eksperiment, s katerim raziskujemo značilnost odziva daljnovodnega sistema, predvsem pa določitev velikosti sil, ki delujejo na MD, je izveden na modelu daljnovodnega polja, ki ga prikazuje slika 3. Daljnovod je predstavljen kot med seboj povezana mehanska struktura iz treh daljnovodnih razpetin, s po dvema navpično razporejenima paralelnima vodnikoma. Vodnika sta med seboj povezana z enim medfaznim distančnikom dolžine treh metrov v sredini vsake razpetine. Vodnik srednje razpetine je obešen na klasične nosilne izolatorske verige. Mehanske lastnosti posameznih elementov modela so podane v tabeli 1.



Slika 3: Model daljnovidnega polja dveh paralelnih vodnikov.

Tabela 1: Lastnosti elementov modela.

Lastnost	vodnik	MF	izolator
dolžina [m]	150	0.15	3
premer [mm]	15.5	22	19
masa [kg/m]	0.49	1	0.4
modul elastičnosti [MPa]	77000	37000	37000

Vodnik tipa ACSR 120/20 je napet z mehansko silo 4.85 kN. Razpetine daljnovidnega polja  $a_1, a_2, a_3$  so enake. Vsaka ima dolžino 150 metrov in je v modelu simulirana s po štirimi končnimi elementi. Da se zagotovi nadzorovana smer pomika vodnikov, je med zgornjim in spodnjim vodnikom izbrana vodoravna razdalja  $d$ , ki je enaka 20 milimetrov. Konstanti Rayleightovega dušenja vodnika sta  $\alpha = 0.177$  in  $\beta = 1.210^{-3}$ , izbrani na podlagi ocene lastne frekvence razpetine [8] in dvoodstotnega kritičnega dušenja.

## 4 IZVEDBA IN REZULTATI

### 4.1 Statična obravnava

Prvi korak sta izračun in analiza statičnih razmer. Za postavljen numeričen model daljnovidnega polja, prikazan na sliki 3, je izbrano pet karakterističnih obtežnih primerov. Poimenovanje ustreza lokaciji statične žledne obtežbe in je naslednje: primer A, AB, C, CD in EF.

Rezultati izračuna statičnih razmer so prikazani v tabeli 2 za lokacijo distančnika  $S1$  in v tabeli 3 za lokacijo distančnika  $S2$ . V referenčnem stanju so vodniki paralelni in napeti z enako mehansko silo, na MD deluje le lastna sila teže. Referenčno stanje lege vodnikov v prostoru, glede na katero se računa relativni pomik, je stanje golih vodnikov brez oprijete žledne obtežbe. Ko je na odseku vodnika oprijeta žledna obtežba, je ta lokacija v tabelah označena z oznako X. Oznaka 0 predstavlja goli vodnik brez obtežbe. V kolonah so za obravnavane primere izpisane izračunane statične vrednosti absolutnih sil, ki delujejo na zgornjem ( $F_{zgoraj}$ ) in spodnjem ( $F_{spodaj}$ ) koncu MD. V naslednjih kolonah sledijo izpisi relativnih pomikov prostorskih koordinat MD, nameščenega v srednji razpetini na lokaciji  $S1$  in  $S2$ .

Iz tabele 2 in tabele 3 izhaja, da je s stališča statičnih mehanskih sil, ki se pojavijo v MD, najneugodnejši

primer AB. Gre za primer, ko se žledna obtežba oprime na srednji spodnji razpetini. Podoben rezultat podaja primer EF, le da je žledna obtežba v tem primeru v prvi robni razpetini napenjalnega polja daljnovidnega. V obeh primerih na sosednji MD delujejo nekaj manjše statične sile. Pričakovano se prostorski premik MD izvrši v navpični Z-smeri izbranega koordinatnega sistema in v primeru AB doseže velikost 2,20 metra. Za toliko se poveča poves vodnika v sredini razpetine.

Oprijem žledne obtežbe na zgornjem vodniku obravnava drug sklop scenarijev. V tem primeru je za nadaljnjo obravnavo merodajen primer CD. Glede na primer AB so velikosti sil, ki delujejo v primeru CD na MD, prepolovljene. Ne smemo pa spregledati, da v tem primeru pride do večje spremembe prostorskega položaja MD. Vizualno se izkaže v smislu prevrnitve faznega distančnika, iz začetne navpične referenčne lege v vodoravno lego, ki mu sledi tudi vodnik vpet na koncih MD. Grafično je pomik predstavljen na sliki 9. S črtkano črto je vrisan MD v referenčnem stanju in s polno črto za čas pred simulacijo  $t \leq 0$  s. Ob prevrnitvi pride do izriva vodnika v prečni smeri za 2,06 metra ob sočasno povečanem povesu vodnika za 0,66 metra. V primeru montaže drugih daljnovidnih vodnikov, vzporedno sistemu vodnikov z montiranimi MD, je torej treba paziti tudi na ustrezno medsebojno vodoravno razdaljo med vodniki.

Iz statične analize je razvidno, da distančniki opravijo svojo nalogo, saj zagotavljajo medsebojne razdalje med vodnikoma, to je točkama  $S2_{zgoraj}$  in  $S2_{spodaj}$ . Izračunane statične sile na MD so relativno majhne. Sile je treba obravnavati pazljivo, ker lahko statični rezultati vodijo do mehanskega poddimenzioniranja opreme, kot bo razvidno iz dinamične obravnave problematike v nadaljevanju.

### 4.2 Dinamična obravnava

V drugem koraku so za najneugodnejše statične primere AB, CD in EF izvedeni numerični izračuni dinamičnih razmer za scenarij odpada oprijete žledne obtežbe z vodnika. Odpad žledne obtežbe je v numerični simulaciji predstavljen kot strma linearno padajoča funkcija, ki jo prikazuje slika 4.

V vseh primerih je skupni čas numerične simulacije  $T_{sim}$  enak 5 s. V začetku simulacije je kratek statičen

Tabela 2: Rezultati statičnega izračuna na lokaciji S1.

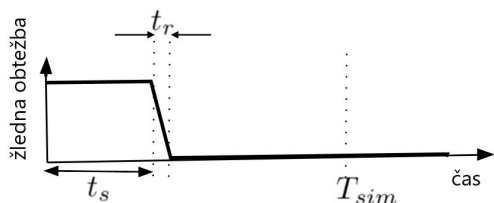
primer	žledna obtežba						$F1_{spodaj}$	$F1_{zgoraj}$	$S1_{spodaj}$		$S1_{zgoraj}$	
	A	B	C	D	E	F	[N]	[N]	X [m]	Z [m]	X [m]	Z [m]
A	X	0	0	0	0	0	71	59	0	0.70	0.02	0.70
AB	X	X	0	0	0	0	64	52	0	1.03	0.02	1.02
C	0	0	X	0	0	0	63	75	0	0.70	0.02	0.70
CD	0	0	X	X	0	0	125	134	0	0.91	0.02	0.90
EF	0	0	0	0	X	X	591	579	0	-1.70	0	-1.71

X - žledna obtežba 2,6 kg/m prisotna, 0 - brez žledne obtežbe

Tabela 3: Rezultati statičnega izračuna na lokaciji S2.

primer	žledna obtežba						$F2_{spodaj}$	$F2_{zgoraj}$	$S2_{spodaj}$		$S2_{zgoraj}$	
	A	B	C	D	E	F	[N]	[N]	X [m]	Z [m]	X [m]	Z [m]
A	X	0	0	0	0	0	290	302	0	-1.41	0.01	-1.43
AB	X	X	0	0	0	0	622	633	0	-2.20	0.01	-2.20
C	0	0	X	0	0	0	287	276	-0.54	-1.33	0.34	-1.47
CD	0	0	X	X	0	0	304	304	-2.06	-0.66	0.72	-0.39
EF	0	0	0	0	X	X	25	13	0	0.71	0	0.70

X - žledna obtežba 2,6 kg/m prisotna, 0 - brez žledne obtežbe



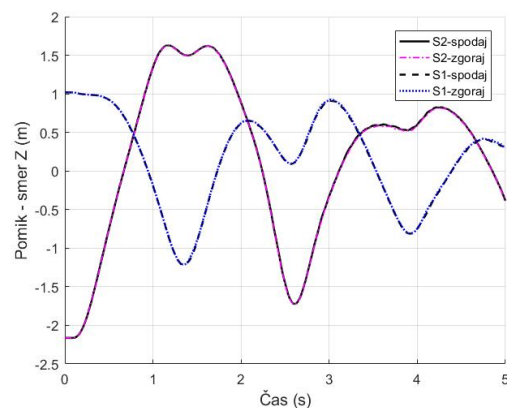
Slika 4: Časovni potek odpada žledne obtežbe z vodnika.

interval  $t_s$  dolžine 0.1 s. Žledna obtežba, oprijeta na vodniku linearno v času  $t_r$ , ki je enak 0.1 s, odpade z vodnika. Rezultati numeričnih simulacij so opisani v nadaljevanju.

### 4.3 Primer AB

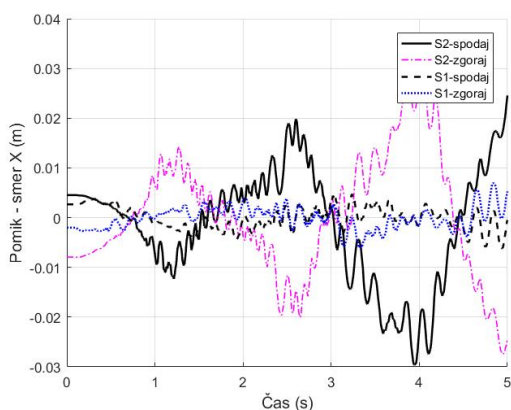
Primer AB predstavlja odpad oprijete žledne obtežbe s spodnjega vodnika, z lokacij A in B. Iz statičnega izračuna sledi, da je to najneugodnejši primer, tako s stališča povečanega povesa vodnika kot s stališča velikosti sil na MD. Na sliki 5 je predstavljen relativni pomik obeh koncev (zgoraj in spodaj) MD v navpični Z-smeri za točko S1, ki se nahaja sredi prve razpetine, in točko S2, ki se nahaja v sosednji razpetini. Iz začetne lege pri odpadu žledu MD zaniha navzgor do amplitudne vrednosti, ki je nekaj manjša od začetne vrednosti in nadaljuje v iznihanje. Nihanje v prečni X-smeri je majhno in ga prikazuje slika 6. S časom to malenkost narašča. Razvidno je, da se konca MD gibljeta protifazno, v smislu oscilacije levo-desno v presečni ravnini XZ.

Za mehansko dimenzioniranje so pomembne notranje sile MD. Na sliki 7 so prikazane izračunane dinamične sile, ki delujejo na obeh straneh MD na lokaciji S1. Na naslednji sliki 8 so prikazane sile na MD v točki S2.

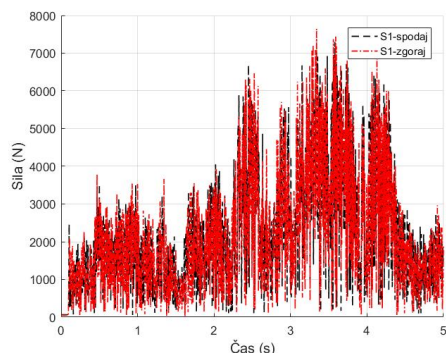


Slika 5: Dinamični pomik vodnikov v točkah S1 in S2 za primer AB v navpični Z-smeri.

Iz primerjave obeh slik je razvidna večja razlika, tako v časovnem poteku sil kot v velikosti. V srednji razpetini, na MD v točki S2, so maksimalne sile za okoli 1/3 večje od sil v S1. Največje sile nastopijo v začetni fazi dinamičnega pojava na mestu vira motnje. Maksimalne absolutne vrednosti sil dosežejo vrednost 12 kN, kar je za faktor 20 večje od izračunanih začetnih statičnih sil. Za mehansko dimenzioniranje je torej merodajen dinamični odziv sistema. Zaradi valovnega prenosa gibanja vodnika na sosednje razpetine nastopi maksimum sile v sosednjih razpetinah s časovnim zamikom, vrednosti sil pa so manjše od vrednosti na lokaciji vira motnje.



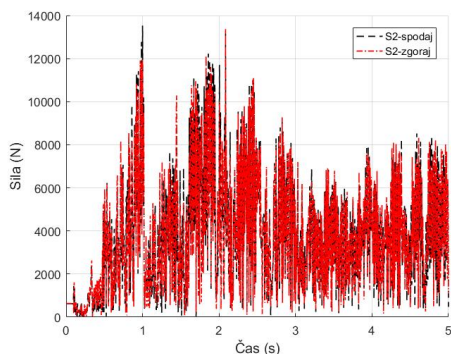
Slika 6: Dinamični pomik vodnikov v točkah S1 in S2 za primer AB v vodoravni X-smeri.



Slika 7: Dinamična sila na medfazni distančnik S1 za primer AB.

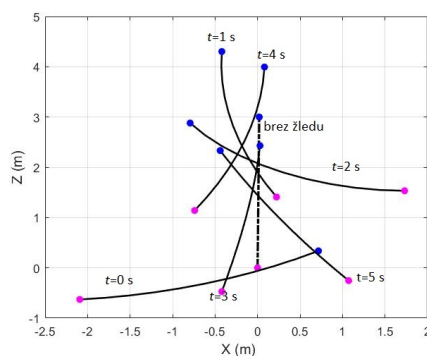
#### 4.4 Primer CD

Sledi obravnava primera CD. Pri njem se predpostavi žledna obtežba, oprijeta na zgornjem vodniku na odsekih C in D, kot prikazuje slika 3. Začetne statične sile so približno polovico manjše od sil v primeru AB, kar izhaja iz tabel 2 in 3. Največja razlika je v prostorskem položaju vodnikov, ki se vzpostavi po oprijemu žledu. V tem primeru zaradi MD, ki zagotavlja razdaljo med



Slika 8: Dinamična sila na medfazni distančnik S2 za primer AB.

vodnikoma, pride do prevrnitve pozicije MD in vodnikov iz navpične lege proti vodoravni legi. Primer pozicije MD v prostoru in ukrivljenosti MD zaradi lastne elastičnosti za izbrane časovne trenutke simulacije, prikazuje slika 9. Položaj zgornjega spoja vodnika in MD v točki  $S2_{zgoraj}$  je prikazana s piko modre (temnejše) barve, medtem ko je pozicija spodnjega spoja v točki  $S2_{spodaj}$  prikazana s piko vijoličaste (svetlejšje) barve. Ko na vodniku ni žledne obtežbe, je MD v referenčnem (navpičnem) položaju. Tik pred začetkom simulacije, ko je oprijeta žledna obtežba, stanje MD predstavlja krivulja, izrisana za časovni trenutek  $t = 0$  s. Razvidno je, da pride do izriva spodnjega vodnika v levo smer ob sočasnem spustu zgornjega vodnika levo navzdol. Vseskozi po odpadu žledne obtežbe MD drži vodnika na medsebojni razdalji, a je zaradi svoje dolžine in majhnega premera uklonjen. Na sliki 9 so prikazani izrisi stanj skozi presečne ravnine distančnika ob izbranih časovnih trenutkih po 1 sekundo. Poudariti velja, da je izrisan uklon dejanski uklon MD. Skozi omenjeni prikaz je mogoče opazovati vpliv premera MD na velikost uklona MD med dinamičnim pojavom.

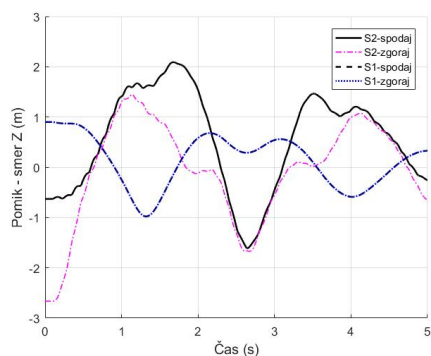


Slika 9: Dinamični pomik vodnikov in medfaznega distančnika v točki S2 za primer CD v preznalni ravnini XZ.

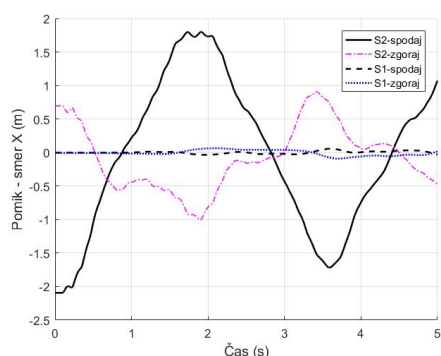
Za popolnejši prikaz oblike gibanja obeh strani MD na lokacijah S1 in S2, slika 10 prikazuje gibanje v navpični Z-smeri in slika 11 potek gibanja v prečni X-smeri. Pričakovano je odziv v prečni smeri v primeru CD večji od AB. Navedeno pomeni, da je pri dimenzioniranju medsebojnih oddaljenosti med vodniki na daljnovodnem stebru pri uporabi MD potrebna pazljivost, saj lahko zaradi vpliva MD prihaja do večjega pomika vodnikov tudi v prečni smeri.

Analizo primera CD zaključuje prikaz absolutnih sil, ki delujejo na MD. Prikazane so na sliki 12 le za lokacijo S2, kjer so sile največje. Glede na to, da so začetne statične vrednosti nižje kot v primeru AB, so tudi dinamične sile ustrezno nižje. Dosežejo približno polovico vrednosti sil primera AB. Rezultati so poučni, saj bi najbrž intuitivno podana ocena velikosti sil dala prednost primeru CD pred primerom AB, sklicujoč se na močno porušeno lego MD pred začetkom simulacije.





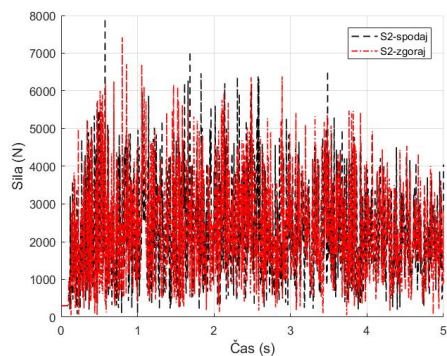
Slika 10: Dinamični pomik vodnikov v točkah S1 in S2 za primer CD v navpični Z-smeri.



Slika 11: Dinamični pomik vodnikov v točkah S1 in S2 za primer CD v vodoravni X-smeri.

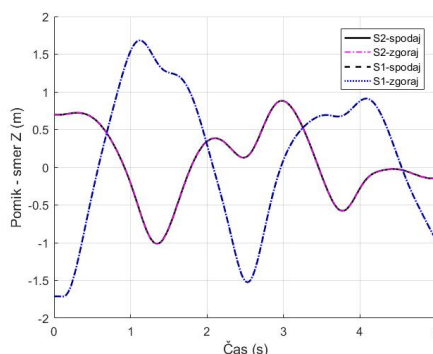
#### 4.5 Primer EF

V nadaljevanju sledi analiza razmer, ko je oprijeta žledna obtežba prisotna v robni razpetini napenjalnega polja. Na eni strani je v tem primeru gibanje vodnika omejeno z vpetjem neposredno v fiksno točko, na drugi strani razpetine z vpetjem v nosilni izolator. Izolator ima lastno dolžino in omogoča določen pomik v prostoru. Na podlagi predhodnih dveh primerov je opisan najneugodnejši primer oprijete žleda na spodnjem vodniku



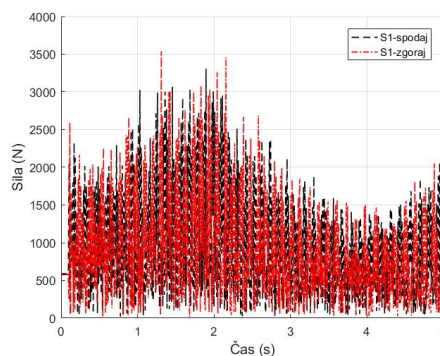
Slika 12: Dinamična sila na medfazni distančnik S2 za primer CD.

na lokacijah E in F, kot prikazuje slika 3. Podobno kot v primeru AB je nihanje vodnika v prečni X-smeri za inženirsko prakso zanemarljivo. Gibanje v navpični Z-smeri v opazovanih točkah S1 in S2 prikazuje slika 13. Vrednosti pomikov MD v primeru EF, ki jih prikazuje slika 13, je podobna primeru AB, podanem na sliki 5, z nekaj manjšimi amplitudami pomika. Tudi v tem primeru MD opravi svojo vlogo in drži medsebojno razdaljo med vodniki. To je razvidno iz prekrivanja izrisanih krivulj za posamezne opazovane točke S1 in S2 na sliki.

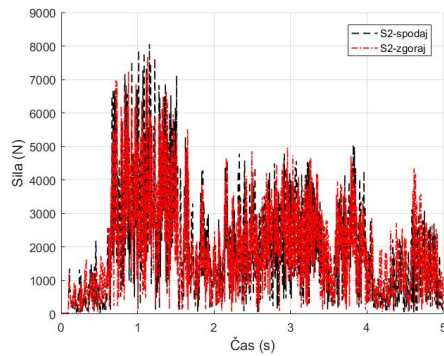


Slika 13: Dinamični pomik vodnikov v točkah S1 in S2 za primer EF v navpični Z-smeri.

Zanimiv rezultat izhaja iz analize notranjih sil MD. Te prikazujeta slika 14 za MD na lokaciji S1 in slika 15 za MD na lokaciji S2. Razvidno je, da kljub dejstvu, da se odpad žledne obtežbe dogodi v robni razpetini, sile ne sledijo temu vzorcu. Maksimalne sile, ki so pomembne za mehansko dimenzioniranje, se pojavijo na sosednjem distančniku S2, in ne, kot bi pričakovali, na S1. So pa te sile manjše od tistih, s katerimi je obremenjen isti MD v primeru AB. Gre torej za pomembno razliko proti dinamičnemu odzivu v primeru AB. Tam je maksimalna sila sovpadala z lokacijo odpada žledne obtežbe.



Slika 14: Dinamična sila na medfazni distančnik S1 za primer EF.



Slika 15: Dinamična sila na medfazni distančnik S2 za primer EF.

## 5 ZAKLJUČEK

Predstavljen je primer uporabe metode AVK za potrebe analize specifičnega primera dinamskega sistema – daljnovoda – z montiranimi medfaznimi distančniki, ki se pojavlja v daljnovodni prenosni tehniki kot ukrep za zagotavljanje zadostne razdalje med vodniki. Z modelom so izračunani statični in dinamični mehanski pomiki ter sile, ki delujejo na medfazni distančnik. Potrjeno je, da je za optimalno mehansko dimenzioniranje medfaznih distančnikov potreben vpogled v dinamične razmere, ki vladajo ob različnih scenarijih oprijemov in odpadov žlednih obtežb z vodnikov. Dinamične sile so za faktor 20 večje od statičnih sil. S podobno analizo je za poljuben daljnovodni sistem mogoče vnaprej določiti vrednosti mehanskih sil, ki jim morajo MD ustrezati in se s tem izogniti pod- ali predimenzioniranju daljnovodne opreme.

## LITERATURA

- [1] K. Papailiou, F. Schmuck, *Interphase Spacers*, Springer Berlin Heidelberg, Berlin, Heidelberg, 2013, pp. 127–163. doi:10.1007/978-3-642-15320-4-5.
- [2] D. Havard, *Interphase spacer strength requirements for conductor galloping*, Presentation to CIGRÉ AG06 Cape Town (2015).
- [3] J. L. Lilien, et al, *State of the art of conductor galloping*, Cigre SCB2 WG11 Task Force 02.11.06 (2007) Electra No 322.
- [4] L. E. Kollar, M. Farzaneh, P. Van Dyke, *Modeling ice shedding propagation on transmission lines with or without interphase spacers*, IEEE Transactions on Power Delivery 28 (1) (2013) 261–267. doi:10.1109/TPWRD.2012.2212918.
- [5] F. Kiessling, P. Nefzger, U. Kaintzyk, J. Nolasco, *Overhead Power Lines: Planning, Design, Construction*, Engineering online library, Springer, 2003.
- [6] A. Shabana, J. Rismantab Sany, *An augmented formulation for mechanical systems with non-generalized coordinates: Application to rigid body contact problems*, Nonlinear Dynamics 24 (2001) 183–204. doi:10.1023/A:1008362309558.
- [7] B. Zemljarič, *Absolute nodal coordinate formulation and the dynamic of a compact high-voltage overhead power line*, PhD thesis id=113667 (2020).
- [8] H. Irvine, *Cable Structures*, MIT Press series in structural mechanics, MIT Press, 1981.

**Borut Zemljarič** je leta 1994 diplomiral, leta 2008 magistriral in leta 2020 doktoriral na Fakulteti za elektrotehniko Univerze v Ljubljani. Zaposlen je v gospodarski družbi, kjer se ukvarja z načrtovanjem visokonapetostnih naprav. Težišče njegovega raziskovalnega področja v zadnjem obdobju obsega modeliranje, simulacijo in optimizacijske postopke pri računalniško podprti numerični analizi med seboj povezanih elektro in mehansko dinamičnih pojavov na energetskih napravah.