

Primljen / Received: 26.4.2024.

Ispravljen / Corrected: 13.8.2024.

Prihvaćen / Accepted: 2.9.2024.

Dostupno online / Available online: 10.10.2024.

Numerička analiza titrajnog odziva dalekovoda velikog raspona prijenosnih vodova izazvanog vjetrom

Autori:



¹Mr.sc. **Xianxin Li**, dipl.ing.građ.
52026030@qq.com



²Mr.sc. **Binghao Ding**, dipl.ing.građ.
dingbinghao-heny@powerchina.cn



¹Daokun Qi, dipl.ing.građ.
qidaokun@126.com



²Mr.sc. **Kaixin Zhang**, dipl.ing.građ.
zhangkaixin-heny@powerchina.cn
Autor za korespondenciju



²Mr.sc. **Miaomiao Wang**, dipl.ing.građ.
wangmiaomiao-heny@powerchina.cn

¹Institut za ekonomska i tehnološka istraživanja državne mreže Henan, Kina

²PowerChina Henan - Institut za istraživanje i projektiranje električne energije

Prethodno priopćenje

Xianxin Li, Binghao Ding, Daokun Qi, Kaixin Zhang, Miaomiao Wang

Numerička analiza titrajnog odziva dalekovoda velikog raspona prijenosnih vodova izazvanog vjetrom

Na temelju inženjerskih spoznaja o dalekovodima ultravisokog napona ± 800 kV koji se protežu preko rijeke Huang razvijeni su modeli konačnih elemenata za pojedinačni stup i dalekovod te su simulirani i analizirani njihovi odzivi uslijed pobude vjetrom. Ispitan je i učinak međudjelovanja stupa i voda u dalekovodu velikog raspona prijenosnih vodova. Na temelju rezultata utvrđeno je da je vlastita frekvencija dalekovoda bila nešto niža od one pojedinačnog stupa, a torzijska vlastita frekvencija bila je najviše smanjena. Najveći pomak dalekovoda je za 1,92 puta veći od pomaka jednog stupa pri upadnome kutu vjetra od 0° . Najveća uzdužna sila i naprezanje u dalekovodu su 1,6 puta i 1,37 puta veći od onih u jednome stupu. Međudjelovanje između stupa i vodova znatno utječe na odziv stupa izazvanog vjetrom. Zato je pri projektiranju stupa važno uzeti u obzir učinak dinamičkog međudjelovanja stupa i voda u sustavu dalekovoda.

Ključne riječi:

dalekovod, veliki raspon, titrajni odziv, učinak međudjelovanja, model konačnih elemenata

Research Paper

Xianxin Li, Binghao Ding, Daokun Qi, Kaixin Zhang, Miaomiao Wang

Numerical analysis on wind-induced vibration response of long-span transmission tower-line system

Based on the engineering background related to ± 800 kV ultra-high voltage (UHV) transmission lines spanning the Yellow River, finite element models were developed for single-tower and transmission tower-line systems, with their wind-induced responses under wind loads were simulated and analysed. In addition, the coupling effect in a large-span transmission tower line system was investigated. The results showed that the natural vibration frequency of the tower-line system was slightly lower than that of a single tower and that the torsional natural frequency was the most significantly reduced. The transmission tower-line system has a maximum displacement of 1.92 times that of a single tower when the wind angle is 0° . The maximum axial force and stress in the tower-line system are 1.6 times and 1.37 times higher than those in a single tower. The interaction between the tower and wires significantly affects the wind-induced response of the tower body. Hence, considering the dynamic coupling effect of the tower-line transmission system is important when designing a tower.

Key words:

tower-line system, long span, vibration response, coupling effect, finite element model

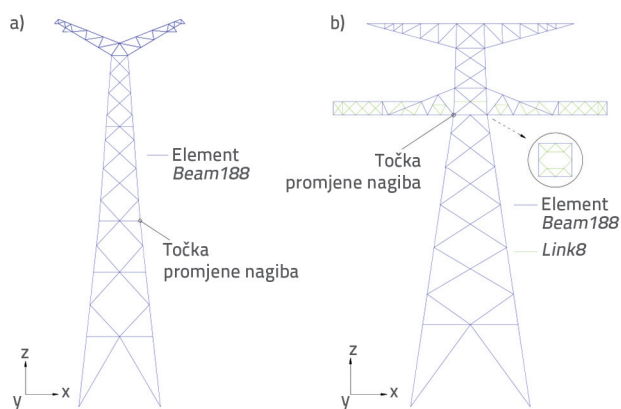
1. Uvod

Prednosti istosmjernih prijenosnih vodova ultravisokog napona (eng. *Ultra-High-Voltage* - UHV) uključuju njihove niske gubitke prijenosa i minimalno zauzimanje zemljišta, zbog čega se naveliko primjenjuju za prijenos električne energije na velike udaljenosti i prijenose velikoga kapaciteta. Budući da se radi o visokim, fleksibilnim konstrukcijama, UHV dalekovodni stupovi skloni su znatnim titranjima izazvanima vjetrom, što izravno utječe na ukupnu razinu sigurnosti dalekovoda. Istraživanja su pokazala da je opterećenje vjetrom znatan čimbenik koji pridonosi urušavanju dalekovodnih stupova [1]. Osim toga geometrijska nelinearnost prijenosnih vodova znatno utječe na odziv dalekovoda uslijed pobude vjetrom. Znanstvenici su proveli opsežna istraživanja na nacionalnoj i međunarodnoj razini. Ozono i Maeda [2] proučavali su dinamička svojstva sustava dalekovoda u ravnini zamjenjujući žice oprugama pri visokim frekvencijama i u više čestica pri niskim frekvencijama. Albermani i Kitipornchai [3] predložili su teoriju nelinearne analize za određivanje graničnog odgovora konstrukcija dalekovodnih stupova. Yasui i sur. [4] usvojili su metodu analize u vremenskoj domeni za usporedbu dinamičkih značajki samostojećih i sidrenih dalekovoda izloženih opterećenju vjetrom. Geng i sur. [5] izveli su pojednostavljenu dinamičku jednadžbu za sustav s dvama stupovima i trima žicama te potvrdili točnost takve približne teorije analizom konačnih elemenata. Guo i sur. [6] razvili su model konačnih elemenata dalekovoda velikog raspona prijenosnih vodova i analizirali njegov odziv na titranje izazvan vjetrom u kombinaciji s ispitivanjem aeroelastičnog modela u zračnome tunelu. Yu i Zhang [7] uspostavili su model konačnih elemenata za proučavanje dinamičkih karakteristika dalekovoda. Otkrili su da je učinak međudjelovanja stupa i vodiča na titranje izvan ravnine dalekovoda veći od učinka na titranje u ravnini. Zhang i sur. [8, 9] razvili su model konačnih elemenata za istraživanje utjecaja smjera vjetra i širine poprečnih nosača na značajke odziva stupa i poprečnih nosača uslijed pobude vjetrom. Zhang i sur. [10] razvili su model konačnih elemenata dalekovoda koji se sastoji od triju stupova i dvaju vodova kako bi proučavali utjecaj parametara dalekovoda na modalne karakteristike. Otkrili su da se frekvencija dalekovodnog stupa znatno povećala s većom ukupnom duljinom raspona prijenosnih vodova, ali na nju su samo neznatno utjecale promjene u omjeru raspona prijenosnog voda sprijeda i straga te kut zbog različitih visina stupova. Zhu i sur. [11] te Wang i sur. [12] istražili su utjecaj različitih upadnih kutova vjetra na vjetrom izazvan odziv dalekovodnih stupova primjenom modela konačnih elemenata ili ispitivanjem aeroelastičnog modela u zračnome tunelu. Lou i sur. [13] te Deng i sur. [14] proveli su ispitivanja u zračnome tunelu kako bi analizirali koeficijente titranja dalekovodnih stupova uslijed vjetra pri normalnim i tajfunskim poljima vjetra. Rezultati su pokazali da je posljedica visoke turbulencije polja tajfuna bila veći koeficijent titranja uslijed vjetra za stup u usporedbi s onima pri normalnome polju vjetra. Yang i sur. [15] primijenili su metodu analize frekvencijske

domene za proučavanje titrajnog odziva dalekovodnih stupova s dugim poprečnim nosačima uslijed pobude vjetrom i izvijestili da je, kada se u obzir uzme statičko torzijsko opterećenje vjetrom, zajamčena stopa dijagonalnih materijala učinkovito poboljšana pod uvjetom blagog povećanja osne sile glavnog materijala. Prethodna istraživanja uglavnom su bila usmjerena na ispitivanje dinamičkih odziva stupova i vodiča pod različitim uvjetima opterećenja vjetrom. Prema važećim propisima, u Kini se dalekovodni stupovi i vodiči smatraju zasebnim cjelinama te se njihove vrijednosti opterećenja vjetrom izračunavaju zasebno. Međutim, međudjelovanje stupa i vodiča na odzive stupova uslijed pobude vjetrom relativno je slabo istraženo. Na temelju UHV dalekovodnih stupova od ± 800 kV preko rijeke Huang He u ovome istraživanju primijenjena je metoda linearnog filtriranja za simulaciju pulsirajućeg opterećenja vjetrom te su uspostavljeni modeli konačnih elemenata u računalnom programu ANSYS za stup i dalekovodni sustav. Numerička simulacija primijenjena je za analizu odziva uslijed pobude vjetrom jednog stupa i dalekovodnog sustava pod opterećenjem vjetrom kako bi se istražilo učinak međudjelovanja stupa i vodiča na odziv dalekovodnih stupova uslijed pobude vjetrom.

2. Model konačnih elemenata

Projekt *Yellow River* (Huang Ho) za ± 800 kV UHV vod velikog raspona ključan je za projekt dalekovodnog prijenosa Hami – Zhengzhou ± 800 kV. *Yellow River* sastoji se od pet stupova označenih oznakama od N1 do N5. Među njima N1 i N5 služili su kao zatezni stupovi, dok su preostala tri bila nosiva. Dalekovodni stupovi bili su visoki 39 m, 100 m, 136 m, 136 m i 48 m, s rasponima prijenosnih vodova od 450 m, 1200 m, 1350 m i 900 m. Osnovi crteži stupova prikazani su na slici 1.



Slika 1. Nosivi stup (N2, N3, N4) i zatezni stup (N1, N5): a) nosivi stup; b) zatezni stup

2.1. Model s jednim stupom

Cijeli nosivi stup simuliran je primjenom elemenata *Beam188*. Za glavni elemente zateznog stupa korišteni su elementi

Beam188, dok su ostali elementi poput pomoćnih elemenata u tijelu stupa i elemenata u dijafragmi, u slučaju kada nije bilo međučvorova, modelirani elementima *Link8*. U protivnome su za modeliranje upotrijebljeni elementi *Beam188*.

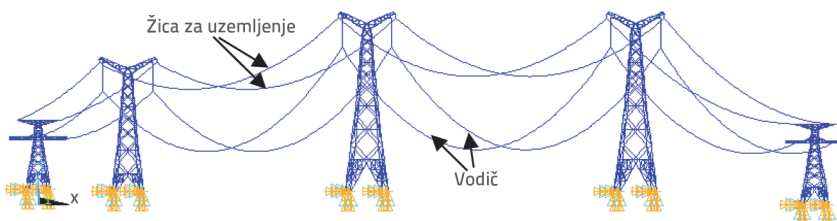
2.2. Model dalekovoda

Vodiči za prijenos jesu fleksibilne komponente niske krutosti i obično se klasificiraju kao konstrukcije s ovjesnom užadi. Taj tip konstrukcije ističe se niskom vlastitom frekvencijom, malom krutošću, lakšom geometrijskom deformacijom i visokom nelinearnošću.

Da bi se uspostavio model konačnih elemenata konstrukcije s ovjesnom užadi, potrebno je provesti analizu pronalaska oblika ovjesnog užeta kako bi se odredio njegov početni oblik. U ovome istraživanju primijenjena je metoda lančanice uz pretpostavku da je vlastita težina ovjesnog užeta ravnomjerno raspoređena duž njegove krivulje, što omogućuje provedbu analize pronalaska oblika za prijenosne vodiče. Parametri dalekovoda navedeni su u tablici 1. Za modeliranje žica odabrani su elementi *Link10*, koji mogu podnijeti samo vlačno naprezanje. Model konačnih elemenata sustava dalekovoda, koji se sastoji od pet stupova i četiriju vodova, prikazan je na slici 2.

Tablica 1. Mehanički parametri dalekovoda

Parametar	Vodič	Žica za uzemljenje
Tip	JLHA1/EST-900/240	OPGW-300
Površina poprečnog presjeka [mm ²]	1142,48	299,6
Promjer [mm]	44,02	22,9
Linearna gustoća [kg/m]	4,6815	2,205
Izračunana prekidna sila [kN]	620,8	432,7
Najveća proračunska vlačna sila [kN]	163,8	94,6
Linearni koeficijent širenja [1/°C]	1,75 · 10 ⁻⁵	1,20 · 10 ⁻⁵
Modul elastičnosti [MPa]	83190	170100



Slika 2. Model konačnih elemenata dalekovoda (napomena: smjer x ide uzduž smjera dalekovoda, smjer y okomit je na smjer dalekovoda, a smjer z okomit je na ravninu xy i prema gore)

3. Simulacija pulsirajućeg opterećenja vjetrom

Opterećenje vjetrom može se kategorizirati u prosječno opterećenje vjetrom, koje proizvodi statički učinak na

konstrukciju, i pulsirajuće opterećenje vjetrom, koje proizvodi dinamički učinak na konstrukciju. Ona su uzrokovana prosječnim i pulsirajućim komponentama prirodnog vjetra.

Pulsirajuća brzina vjetra može se opisati pomoću Gaussova stohastičkog procesa s prosječnom vrijednošću 0. Na temelju smjera promjenjivog vjetra spektr brzine promjenjivog vjetra može se svrstati u dvije skupine: spektr brzine pulsirajućeg vjetra u uzdužnome smjeru vjetra i spektr brzine pulsirajućeg vjetra u poprečnome smjeru vjetra. Uobičajeni pulsirajući spektri brzine vjetra u uzdužnome smjeru uključuju spektre Davenport, Solari i Von Karman. Davenportov spektr je u velikoj mjeri primijenjen i usvojen u kineskim standardima. U ovome istraživanju Davenportov spektr upotrijebljen je za izražavanje spektra snage pulsirajućeg vjetra.

$$S_v(f) = 4k\bar{v}_{10}^{-2} \frac{x^2}{f(1+x^2)^{4/3}} \quad (1)$$

pri čemu je $x = 1200f / \bar{v}_{10}$, k je koeficijent koji se odnosi na hrapavost tla i iznosi 0,003 za tip reljefa A, \bar{v}_{10} predstavlja 10-minutnu srednju vrijednost brzine vjetra na 10 m iznad razine tla, a f označava frekvenciju pulsirajućeg vjetra.

Metode primijenjene za simulaciju vremenskog zapisa pulsirajuće brzine vjetra ponajprije obuhvaćaju metode valića, superpozicije harmonijskog titranja i linearnog filtriranja. Među njima autoregresivni (AR) model u linearnome filtriranju često se primjenjuje za analizu vremenskih serija nasumičnih vibracija zahvaljujući maloj količini izračuna i velikoj brzini. U ovom je istraživanju primijenjena AR metoda za izradu programa MATLAB, koji simulira brzinu pulsirajućeg vjetra tijekom vremena. Jednadžba se može izraziti na sljedeći način:

$$v(x, y, z, t) = -\sum_{k=1}^p \Psi_k v(x, y, z, t - k\Delta t) + N(t) \quad (2)$$

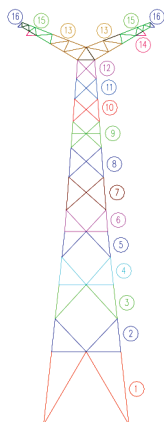
gdje (x_i, y_i, z_i) ($i = 1, 2, \dots, m$) predstavlja koordinatu točke i u prostoru, p redoslijed modela, Δt veličinu vremenskog koraka, Ψ_k matricu autoregresivnih koeficijenata, a $N(t)$ neovisni vektor slučajnog procesa. Početni parametri pulsirajućeg opterećenja vjetrom navedeni su u tablici 2.

Na primjer, stup N4 podijeljen je u 16 segmenata, kao što je to prikazano na slici 3.

Specifični parametri navedeni su u tablici 3.

Tablica 2. Početni parametri pulsirajućeg vjetra

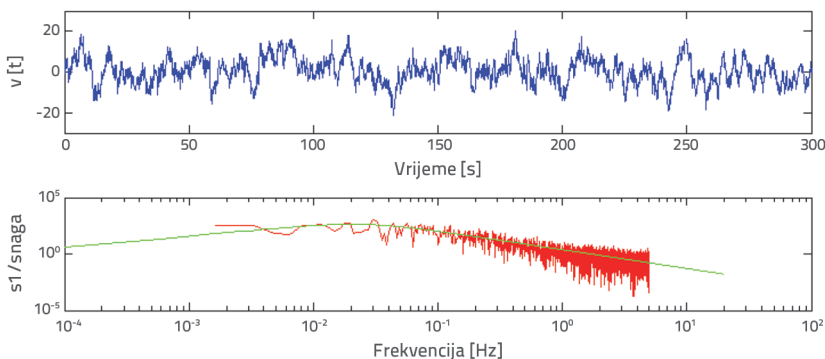
Osnovna brzina vjetra na 10 m visine	$v_{10} = 32 \text{ m/s}$	Kategorija reljefa	B
EkspONENT hrapavosti tla	$\alpha = 0,16$	Gradijent visine vjetra	$H_T = 350 \text{ m}$
Korekcijski koeficijent intervala ponavljanja	$\mu_r = 1,0$	Koeficijent sigurnosti	$\mu = 2,2$
Vrijeme nastanka opterećenja vjetrom	$T_o = 0,1 \text{ s}$	Ukupno trajanje	$T_{max} = 300 \text{ s}$
Vremenski korak	$\Delta t = 0,1 \text{ s}$	Polazna točka frekvencije	$f_o = 0,001 \text{ Hz}$
Krajnja točka frekvencije	$f_{max} = 20 \text{ Hz}$	Povećanje frekvencije	$\Delta f = 0,0005 \text{ Hz}$
Broj segmenata u frekvencijskom području	$N = 10000$	-	-



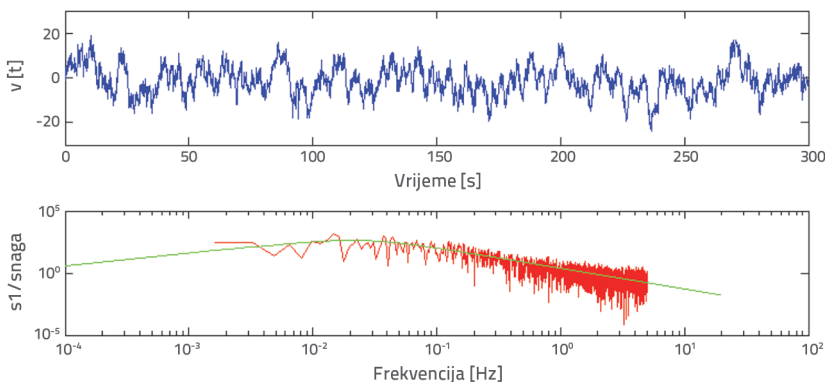
Slika 3. Segmentacija opterećenja vjetrom stupa N4

Tablica 3. Parametri segmenta stupa N4

Broj segmenta	Visina podnivoa [m]	Broj segmenta	Visina podnivoa [m]
1	13,250	9	101,375
2	31,250	10	109,875
3	42,950	11	117,350
4	53,700	12	124,200
5	63,000	13	132,965
6	71,250	14	136,750
7	80,750	15	138,017
8	91,650	16	139,800

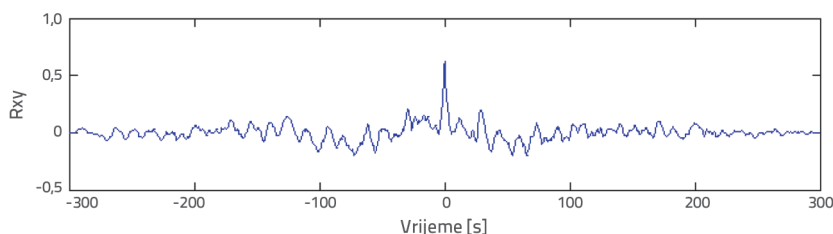


Slika 4. Krivulja brzine vjetra u vremenu i spektralna krivulja snage vjetra na vrhu stupa

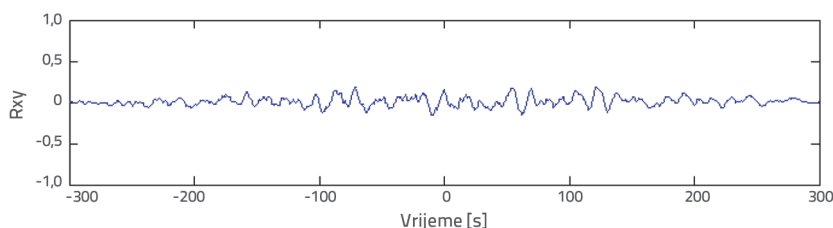


Slika 5. Krivulja brzine vjetra u vremenu i spektralna krivulja snage vjetra pri dnu stupa

Krivulja brzine vjetra u vremenu i spektralne krivulje snage vjetra na vrhu i dnu stupa prikazane su na slikama 4. i 5. Usporedbom simuliranoga i ciljanoga spektra snage vjetra na slikama 4. i 5. može se uočiti da je simulirani spektar dobro usklađen s ciljanim spektrom. Ukupna srednja vrijednost simuliranog spektra blisko je usklađena s onom ciljanog spektra, što upućuje na to da su vrijednosti različitih parametara u tablici 2. razumne i da simulirani spektar može simulirati stvarno polje vjetra pod određenim uvjetima. Krivulje brzine vjetra u vremenu za svaki odsječak stupa upotrijebljene su za analizu titrajnog odziva dalekovodnih stupova uslijed pobude vjetrom. Na slici 6. prikazana je krivulja unakrsne korelacije za brzine vjetra između vrha stupa i poprečnih nosača, na slici 7. prikazane su krivulje unakrsne korelacije za brzine vjetra na vrhovima dvaju susjednih stupova. Kao što se može vidjeti na slikama 6. i 7., zbog male udaljenosti između vrha stupa i poprečnog nosača može se uočiti snažna korelacija između njihovih



Slika 6. Krivulja unakrsne korelacije brzine vjetra između vrha stupa i poprečnog nosača



Slika 7. Krivulja unakrsne korelacije brzine vjetra na vrhu dvaju susjednih stupova

brzina vjetra, koje gotovo istodobno postižu maksimalnu brzinu. Međutim, udaljenost između vrhova dvaju prijelaznih stupova bila je relativno velika i zato je odnos između brzina vjetra bio slab.

u smjeru x ili smjeru y. Osim frekvencije prvog reda u smjeru y sve frekvencije modova u modelu dalekovoda imale su niže vrijednosti od onih uočenih u modelu jednog stupa. Vlastita frekvencija dalekovoda imala je izraženiji pad u smjeru x nego u smjeru y, što upućuje na to da je povećanje mase vodiča i žica za

Tablica 4. Vlastite frekvencije prvog, drugog i trećeg reda u stupu

Oblik titranja	Frekvencija titranja [Hz]		
	Pojedini stup	Dalekovod	
1. red u smjeru x	0,947	u istom smjeru	0,938
		u suprotnom smjeru	0,961
2. red u smjeru x	2,269	u istom smjeru	1,987
		u suprotnom smjeru	2,115
3. red u smjeru x	3,365	u istom smjeru	3,216
		u suprotnom smjeru	3,200
1. red u smjeru y	0,955	u istom smjeru	1,009
		u suprotnom smjeru	1,000
2. red u smjeru y	2,353	u istom smjeru	2,236
		u suprotnom smjeru	2,281
3. red u smjeru y	3,743	u istom smjeru	3,672
		u suprotnom smjeru	3,669
1. red u smjeru z	1,571	u istom smjeru	1,322
		u suprotnom smjeru	1,314
2. red u smjeru z	3,041	u istom smjeru	2,854
		u suprotnom smjeru	2,850
3. red u smjeru z	5,427	u istom smjeru	5,214
		u suprotnom smjeru	5,214

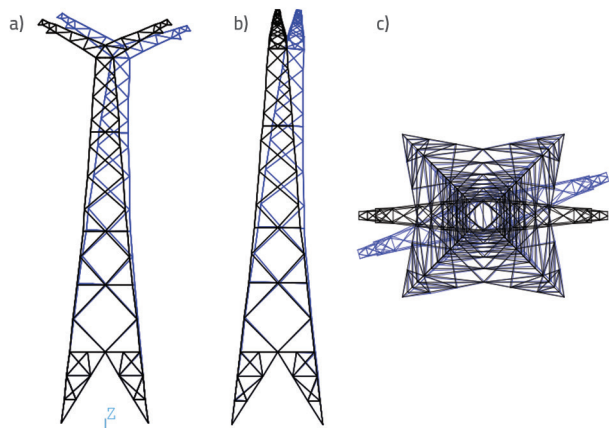
4. Analiza titrajnog odziva uslijed pobude vjetrom

4.1. Dinamičke značajke jednog stupa i dalekovoda

Modalna analiza provedena je i na pojedinačnome stupu i na dalekovodu razvojem zasebnih modela konačnih elemenata. Prve frekvencije u trima smjerovima pojedinačnih stupova prikazane su na slici 8. Prva tri reda frekvencija za svaki pojedini smjer te oba modela navedena su u tablici 4.

Prema tablici 4., nepodudaranje u frekvenciji prvog reda jednog stupa između smjerova x i y bilo je zanemarivo, dok je torzijska vlastita frekvencija prvog reda bila približno 1,65 puta veća od one u smjeru x ili smjeru y. Osim frekvencije prvog reda u smjeru y sve frekvencije modova u modelu dalekovoda imale su niže vrijednosti od onih uočenih u modelu jednog stupa. Vlastita frekvencija dalekovoda imala je izraženiji pad u smjeru x nego u smjeru y, što upućuje na to da je povećanje mase vodiča i žica za

uzemljenje imalo jači utjecaj u odnosu na krutost. Proračunani rezultati torzijske frekvencije prvog reda dvaju modela pokazuju znatnu razliku od približno 16,4 %, što upućuje na to da vlačna sila vodiča sprječava torzijske vibracije u stupu i ima veći efekt ograničenja, znatniji od onog u horizontalnome smjeru.

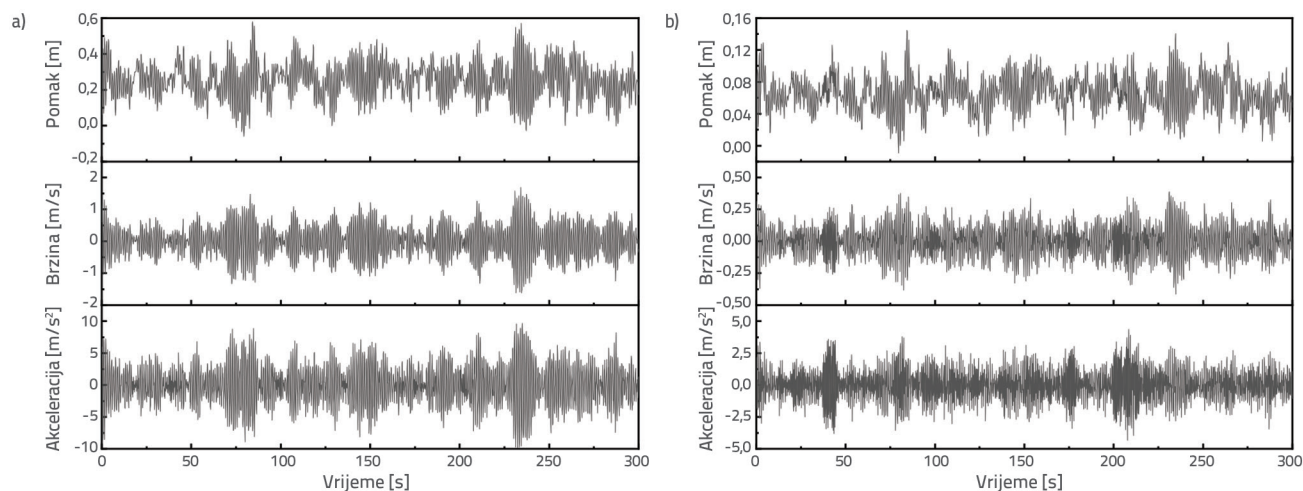


Slika 8. Dijagrami formiranja prvog reda u smjerovima x, y i z: a) prvi red u smjeru x; b) prvi red u smjeru y; c) prvi red u smjeru z

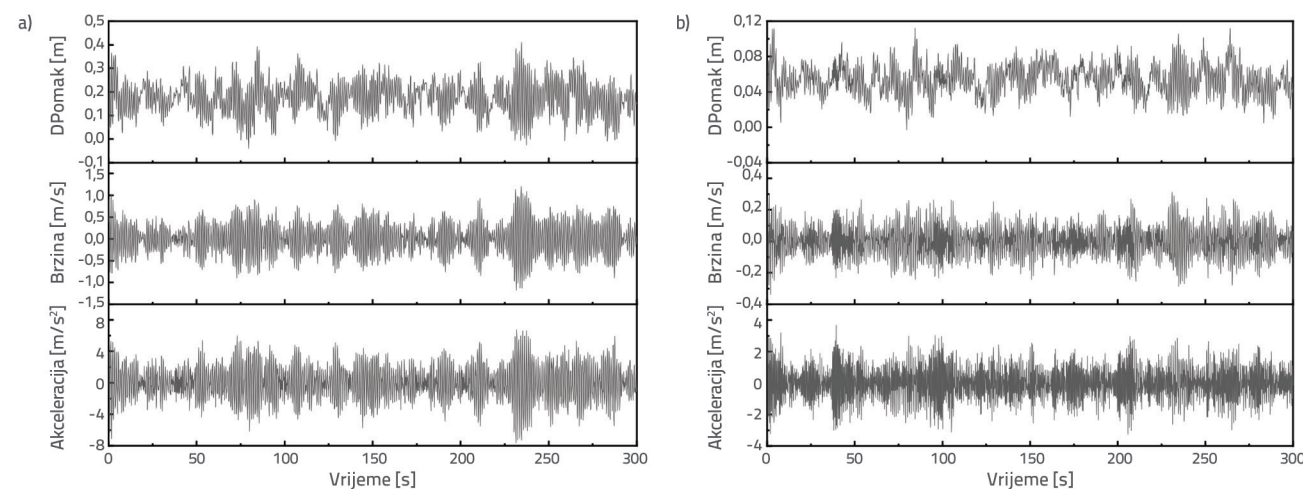
4.2. Titrajni odziv jednog stupa uslijed pobude vjetrom

Odziv modela jednog stupa uslijed pobude vjetrom dobiven je metodom konačnih elemenata kada je kut vjetra iznosio 0° (duž smjera dalekovoda, isti kao smjer y) ili 90° (okomito na smjer dalekovoda, isto kao smjer x). Krivulje odziva uslijed pobude vjetrom u vremenu za vrh stupa i mjesto promjene nagiba prikazane su na slikama 9. i 10. Krivulje uzdužne sile u glavnome elementu glavnog materijala na dnu stupa i na mjestu promjene nagiba prikazane su na slikama 11. i 12.

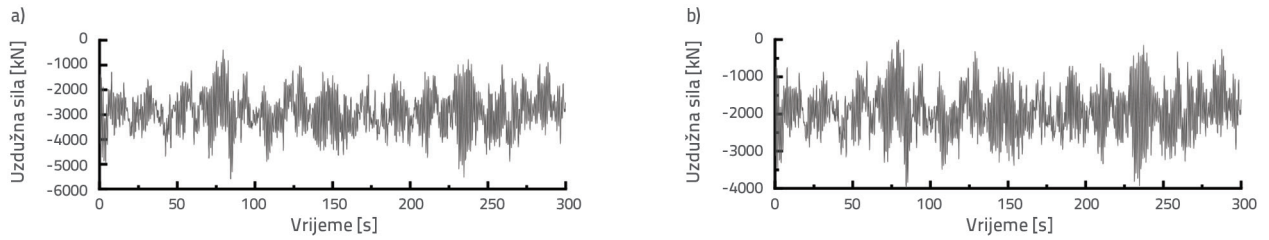
Kao što je prikazano na slikama 9. i 10., srednje vrijednosti brzine i ubrzanja na vrhu stupa i mjestu promjene nagiba jednake su nuli, a prosječni pomak istovjetan je pomaku pod statičkim opterećenjem, što upućuje na to da je metoda primjene opterećenja modela primjerena. Vršni pomaci na vrhu i na mjestu promjene nagiba dosegli su 0,580 m odnosno 0,151 m pri upadnome kutu od 0°. Slično tome, na pripadajućim su mjestima vršne brzine dosegule 1,693 m/s odnosno 0,415 m/s, dok su vršna ubrzanja dosegula 9,808 m/s² odnosno 4,365 m/s². Kada je upadni kut vjetra bio 90°, tada su pomaci na vrhu stupa i na mjestu promjene nagiba stupa



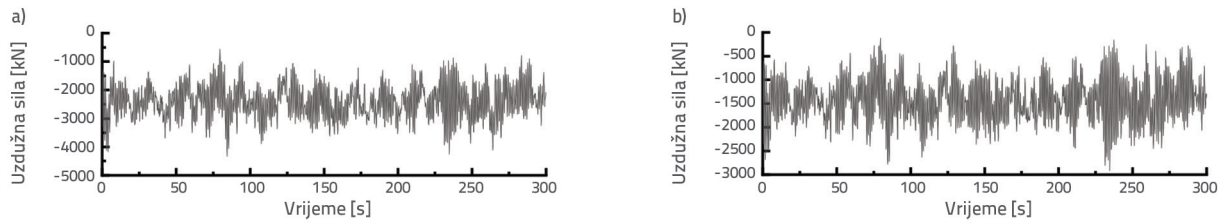
Slika 9. Krivulja odziva uslijed pobude vjetrom u vremenu za stup pri upadnome kutu vjetra od 0°: a) vrh stupa; b) mjesto promjene nagiba



Slika 10. Krivulja odziva uslijed pobude vjetrom u vremenu za stup pri upadnome kutu vjetra od 90°: a) vrh stupa; b) točka promjene nagiba



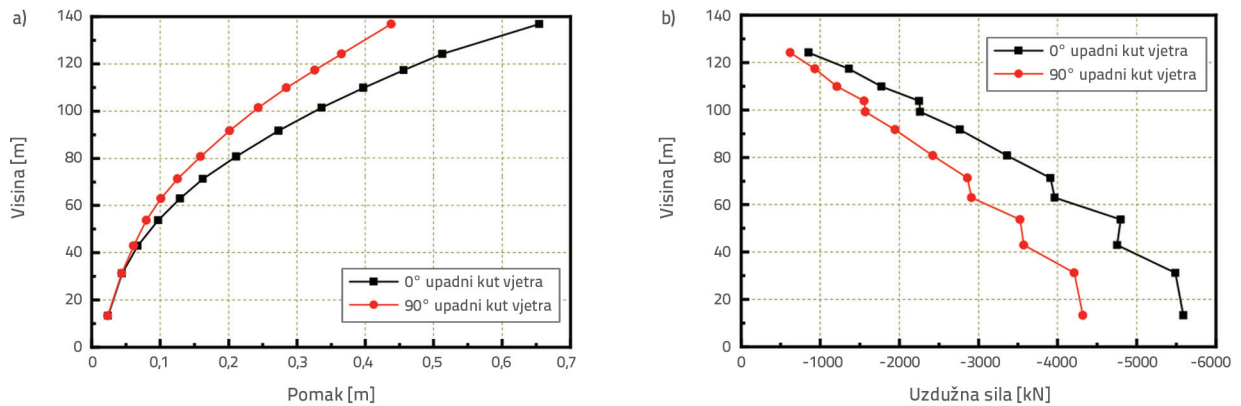
Slika 11. Krivulja uzdužne sile u glavnome elementu pri upadnome kutu vjetra od 0°: a) dno stupa; b) mjesto promjene nagiba



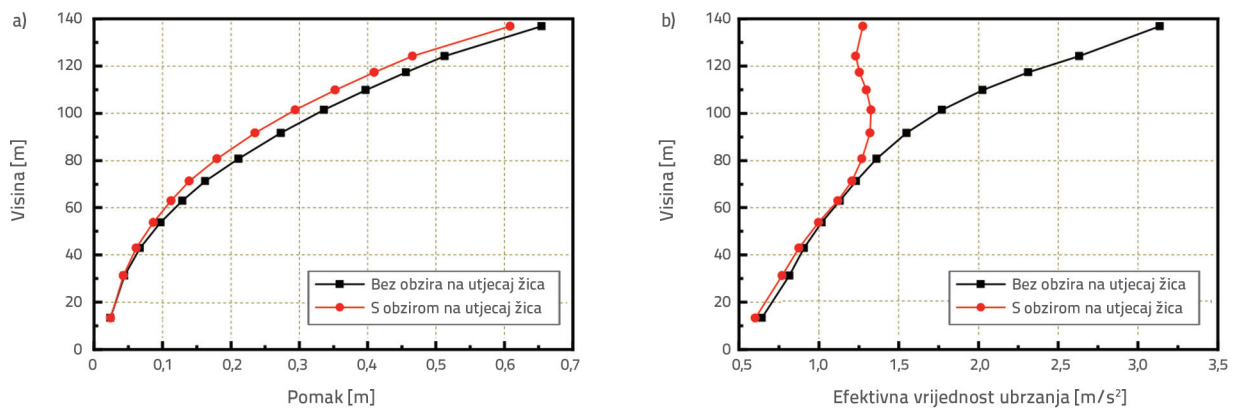
Slika 12. Krivulja uzdužne sile u glavnome elementu u vremenu pri upadnome kutu vjetra od 90°: a) dno stupa; b) mjesto promjene nagiba

dosegnuli 0,411 m odnosno 0,112 m, vršna brzina dosegla je 1,203 m/s i 0,340 m/s, a vršno ubrzanje iznosilo je 7,664 m/s² i 3,691 m/s². Vrijednosti uzdužnih sila koje djeluju na glavne elemente na vrhu i dnu stupa iznosile su 3964 kN odnosno

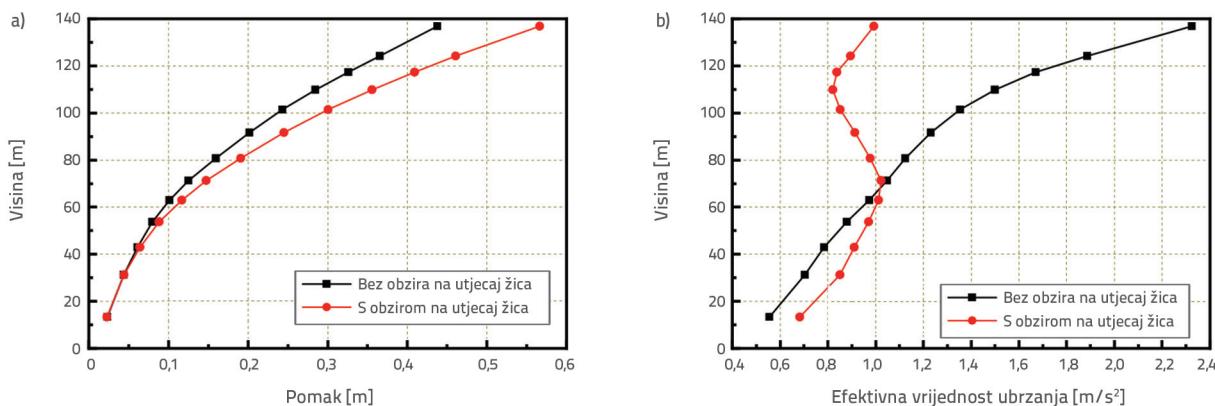
5590 kN, kada su bile izložene upadnome kutu vjetra od 0°, kao što je to prikazano na slikama 11. i 12. Slično tome, pod upadnim kutom vjetra od 90° te su sile imale vrijednosti 2914 kN i 4320 kN za iste lokacije.



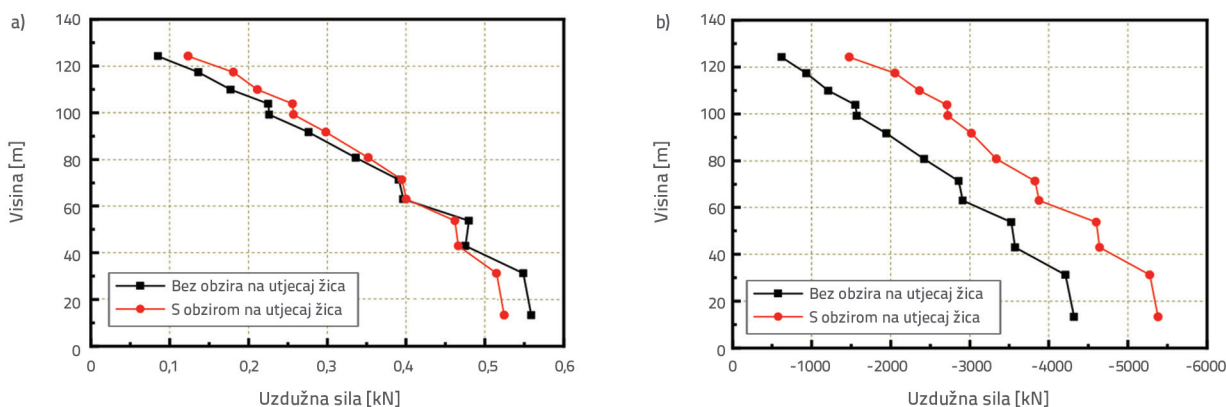
Slika 13. Odziv stupova uslijed pobude vjetrom pri različitim upadnim kutovima vjetra: a) pomak stupa; b) uzdužna sila glavnog elementa stupa



Slika 14. Utjecaj djelovanja žice na odziv jednog stupa uslijed pobude vjetrom pri upadnome kutu vjetra od 0°: a) Najveći pomak; b) Efektivna vrijednost ubrzanja



Slika 15. Utjecaj djelovanja žice na odziv jednog stupa uslijed pobude vjetrom pri upadnome kutu vjetra od 90°: a) najveći pomak; b) efektivna vrijednost ubrzanja



Slika 16. Utjecaj djelovanja žice na uzdužnu silu glavnog elementa jednog stupa: a) upadni kut vjetra od 0°; b) upadni kut vjetra od 90°

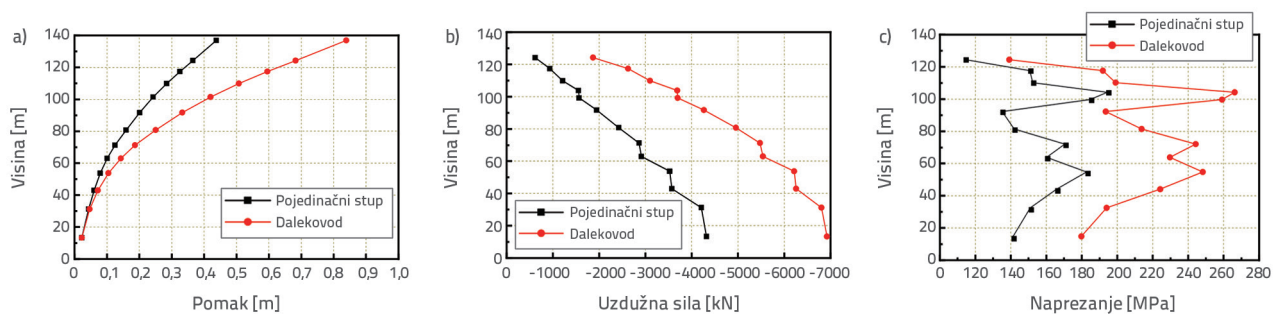
Kao što je to prikazano na slici 13., prosječni pomak stupa postupno se povećava od temelja prema vrhu, uz znatno povećanje pri vrhu uslijed nagle promjene u površini poprečnog presjeka, što uzrokuje znatno povećanje privjetrinske površine. Uzdužna sila glavnog elementa postupno se smanjivala od dna prema vrhu. Uzdužna sila na dnu stupa i srednji pomak na vrhu stupa približno su 1,3 puta odnosno 1,16 puta veći pri upadnome kutu vjetra od 0° nego pri upadnome kutu vjetra od 90°, jer pri upadnome kutu vjetra od 0° prednji dio poprečnog nosača stupa nalazi se na privjetrinskoj strani.

Utjecaj vodiča i žica za uzemljenje na stup u UHV dalekovodima ovisi o varijacijama u visini i rasponu prijenosnog voda vodova. Za male raspone prijenosnih vodova utjecaj vodiča i žica za uzemljenje može se zanemariti, no za dalekovode s velikim rasponima prijenosnih vodova, gdje su rasponi veći od 1000 m, utjecaj žica nije zanemariv. Element za masu MASS21 iz kataloga elemenata ANSYS upotrijebljen je za primjenu mase žica na čvorove modela s jednim stupom, a za jedan stup izračunani su odzivi uslijed pobude vjetrom s dodatnom masom žica i bez nje. Rezultati prikazani na slikama 14. i 15. pokazuju da je, uzimajući u obzir utjecaj žica, došlo do smanjenja pomaka svakog segmenta stupa pri vjetru pod upadnim kutom od 0°. Osim toga najveći pomak na vrhu stupa smanjuje se za približno 8%. Pri

upadnome kutu vjetra od 90° najveći pomak svakog segmenta stupa uvećao se, a pomak vrha stupa povećao se za približno 22%. Taj se fenomen može pripisati rasponu prijenosnog voda većemu od 1000 m, što rezultira većim opterećenjem vjetrom na žicama pri upadnome kutu vjetra od 90° te time dovodi do većeg pomaka stupa.

Kada se uzme u obzir utjecaj žica, došlo je do porasta efektivne vrijednosti ubrzanja svakog čvora, nakon čega je uslijedio pad duž visine stupa zbog smanjenja frekvencije titranja pri vrhu stupa, uzrokovanog masom žice, što dovodi do manjeg odstupanja ubrzanja. Nasuprot tomu, područja na stupu, koja su udaljena od točaka za vješanje žice, bila su manje podložna utjecaju mase žice, a efektivna vrijednosti ubrzanja bila je veća od onog pri vrhu stupa.

Kao što je to prikazano na slici 16., funkcija vodljive žice nije utjecala na odstupanje uzdužne sile duž visine stupa. Pod utjecajem vjetra pri upadnome kutu od 0° djelovanje žice imalo je neznatan utjecaj na vrijednosti uzdužne sile svakog čvora elementa. Uslijed izloženosti vjetru pri upadnome kutu od 90° djelovanje žica znatno je povećalo uzdužnu silu u svakome čvoru elementa. Točnije, uzdužna sila elementa pri dnu stupa povećala se za približno 25%, dok se uzdužna sila na vrhu stupa povećala za približno 138%. Utjecaj žica na stup povećavao se od dna prema vrhu.



Slika 17. Usporedba titrajnog odziva uslijed pobude vjetrom između modela s jednim stupom i modela dalekovoda: a) najveći pomak; b) uzdužna sila u glavnim elementima; c) naprezanje

4.3. Titrajni odziv dalekovoda uslijed pobude vjetrom

Uzimajući u obzir velik raspon prijenosnog voda dalekovoda, vodič je bio izložen najvećem tlaku vjetra pri upadnome kutu vjetra od 90° . Zato je neophodno analizirati odziv isključivo kada je upadni kut smjera 90° . Rezultati su prikazani na primjeru nosivog stupa N4 na slici 17.

Rezultati prikazani na slici 17. pokazuju da dalekovod ima najveći pomak od 0,839 m pri upadnome kutu vjetra od 90° , koji se javlja u gornjemu dijelu stupa, i za oko 1,92 puta je veći od najvećeg pomaka jednog stupa. Najveća uzdužna sila koja djeluje na dalekovod iznosila je 6924 kN i pojavila se na dnu stupa te je za oko 1,60 puta veća od najveće uzdužne sile jednog stupa. Trend odstupanja naprezanja u jednome stupu duž visine stupa bio je u skladu s onim utvrđenim u dalekovodu. Najveća vrijednost naprezanja pojedinačnog stupa iznosila je 195,3 MPa, dok vrijednost kod dalekovoda doseže 267,8 MPa, što je povećanje od približno 37 % u usporedbi s naprezanjem u jednome stupu. Interakcija između stupa i prijenosnog voda znatno utječe na pomak i naprezanje u stupu.

5. Zaključak

U ovome istraživanju uspostavljeni su ANSYS modeli konačnih elemenata jednog stupa i dalekovoda koji se sastoji od pet stupova i četiriju raspona prijenosnih vodova. Dinamičke karakteristike i vjetrom inducirani odzivi jednog stupa i dalekovoda pod pulsirajućim opterećenjem vjetra dobiveni su pomoću numeričkih simulacija. Istraživan je utjecaj međudjelovanja stupa i voda na odzive stupova uslijed pobude

vjetrom. Usporedbom rezultata dobivenih simulacijom modela s konačnim elementima u različitim radnim uvjetima došlo se do sljedećih zaključaka:

Vodič i žica za uzemljenje pokazali su visoku fleksibilnost i nisku krutost, što je dovelo do niže frekvencije vibracija dalekovoda u odnosu na pojedinačne stupove. Naime, torzijska vlastita frekvencija najviše se smanjila, što upućuje na to da je utjecaj mase žica bio veći od utjecaja krutosti žica, a taj je učinak bio jači u smjeru torzije.

Uzdužna sila glavnih elemenata i pomak pojedinačnog stupa pri upadnome kutu vjetra od 0° bili su veći od onih pri upadnome kutu od 90° , što je nepovoljnije.

Vjetrom izazvan odziv dalekovoda bio je znatno veći zahvaljujući efektu međudjelovanja stupa i voda dalekovoda. Najveći pomak dalekovoda bio je približno za 1,92 puta veći od pomaka pojedinačnog stupa, dok je najveća uzdužna sila na njegov glavni element bila približno 1,60 puta veća u odnosu na pojedinačni stup. Nadalje, dalekovod je bio izložen približno 1,37 puta većem naprezanju nego pojedinačni stup. Zato je neophodno razmotriti utjecaj međudjelovanja stupa i voda kod dalekovoda u fazi projektiranja stupova s velikim rasponima prijenosnih vodova. Po potrebi se mogu ugraditi uređaji za prigušivanje kako bi se učinkovito ograničilo titranje uslijed pobude vjetrom.

Zahvala

Ovo istraživanje podržao je Projekt tehnološkog razvoja kineske državne kompanije za proizvodnju električne energije (engl. *State Grid Corporation of China*) (br. projekta: 5108-202218280A-2-318-XG).

LITERATURA

- [1] Zhang, Z.Q., Li, H.N., Li, S.F., Ren, Z.D., Zhang, P., Li, N.: Disaster analysis and safety assessment on transmission tower-line system: an overview, *China Civil Engineering Journal*, 49 (2016) 12, pp. 75-88, <https://doi.org/10.15951/j.tmgcxb.2016.12.009>.
- [2] Ozono, S., Maeda, J.: In-plane dynamic interaction between a tower and conductors at lower frequencies, *Engineering Structures*, 14 (1992) 4, pp. 210-216.
- [3] Albermani, F.G.A., Kitipornchai, S.: Numerical simulation of structural behaviour of transmission towers, *Thin-Walled Structures*, 41 (2003), pp. 167-177.
- [4] Yasui H., Marukawa H., Momomura Y., Ohkuma T. Analytical study on wind-induced vibration of power transmission towers. *Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics*, 83 (1999), pp. 431-441.

- [5] Geng, Z.W., Su, W.W., Yu, F.R., Qian, J.: Analysis of wind vibration response of high-voltage transmission tower based on ANSYS, *Electrical Measurement & Instrumentation*, 60 (2023) 02, pp. 84-90, <https://doi.org/10.19753/j.issn1001-1390.2023.02.012>.
- [6] Guo, Y., Sun, B.N., Ye, Y.: Time-domain analysis on wind-induced dynamic response of long-span power transmission line systems. *China Civil Engineering Journal*, 39 (2006) 12, pp. 12-17.
- [7] Yu, C.Y., Zhang, J.R.: Analysis of dynamic characteristics and wind-induced vibration response of transmission line systems, *Journal of Southeast University (Natural Science Edition)*, 49 (2019) 01, pp. 116-124.
- [8] Zhang, Q., Ye, Z., Cai, J.G., Yu, L., Feng, J.: Wind-induced response of UHV long cantilever transmission tower and tower-line coupled system, *Journal of Southeast University (Natural Science Edition)*, 49 (2019) 01, pp. 1-8.
- [9] Zhang, Q., Ye, Z., Cai, J.G., Yu, L., Feng, J.: Wind-induced torsional response of UHV long cantilever transmission tower, *Journal of Central South University (Science and Technology)*, 51 (2020) 04, pp. 1108-1115.
- [10] Zhang, Q., Fu, X., Ren, L., Jia, Z.G.: Modal parameters of a transmission tower considering the coupling effects between the tower and lines, *Engineering Structures*, 220 (2020), pp. 110947, <https://doi.org/10.1016/j.engstruct.2020.110947>.
- [11] Zhu, Y. X., Zhang, R. Y., Cao, M. G., Tu, F., Wang, Y., Zheng, C.: Wind-induced vibration response and coefficient of large crossing transmission tower line system between islands, *High Voltage Apparatus*, 58 (2022) 01, pp.111-121, <https://doi.org/10.13296/j.1001-1609.hva.2022.01.015>.
- [12] Wang, W.M., Sun, Z.D., Zeng Y.J., Tian, L.: Wind Tunnel Test on Wind-Induced Vibration Response of Long-span transmission tower-line system. *Industrial Construction*, 47 (2017) 05, pp. 79-84+95, <https://doi.org/10.13204/j.gyjz201705016>.
- [13] Lou, W.J., Jiang Y., Jin X.H., Wang, Z.H., Xia, L., Shen, G.H.: Wind t-unnel test research on wind-induced vibration characteristics of angle steel tower in typhoon field, *Journal of Vi-bration Engineering*, 26 (2013) 02, pp. 207-213, <https://doi.org/10.16385/j.cnki.issn.1004-4523.2013.02.018>.
- [14] Deng, H.Z., Duan, C.Y., Xu, H.J.: Wind tunnel tests on an aeroelastic model of a transmission tower-line system under normal wind field and typhoon wind field, *Journal of Vibration and Shock*, 37 (2018) 08, pp. 257-262, <https://doi.org/10.13465/j.cnki.jvs.2018.08.038>.
- [15] Yang, Z.Y., Song, X.Q., Deng, H.Z.: Frequency domain analysis of wind-induced response of ± 1100 kV ultra high voltage (UHV) transmission tower, *Journal of Central South University (Science and Technology)*, 51 (2020) 08, pp. 2121-2131.