

Stanislav Ilenin, Ladislav Varga

Dynamické javy na vodičoch vonkajších silových vedení (VSV)

Abstrakt

Článok sa zaoberá rôznymi druhmi dynamických javov na vodičoch VSV. Najviac vyskytujúcimi sú kmitanie (vibrácia) vodičov, vyšvihnutie vodičov pri odpadávaní námrazy a galloping (tančenie) vodičov. Vyšvihnutie vodičov môže spôsobiť medzifázové skraty, preto je dôležité poznať maximálnu amplitúdu vyšvihnutia vodiča. Tuto amplitúdu je možné vypočítať, alebo zistiť modelovaním. Použitím medzifázových rozperiek sa maximálna amplitúda vyšvihnutia znižuje.

ÚVOD

Pri odpadávaní námrazy z vodičov VSV dochádza k vyšvihnutiu vodiča, čo môže spôsobiť skrat na vedení. Aby sa predišlo poruchám je vhodné inštalovať medzifázové separátory. Tým sa podstatne zníži maximálna amplitúda vyšvihnutia vodičov. Vhodne je používať na vedení dva alebo tri separátory.

I. KMITANIE (VIBRÁCIA) VODIČOV

Okrem preťaženia a vychýlenia vodičov vietor spôsobuje ešte kmitanie (vibráciu) vodičov vo zvislej rovine (stojaté vlnenie). Kmitanie vodičov je výsledkom aerodynamického pôsobenia vetra, pomerne malých rýchlostí na vodič. Za vodičom vznikajú vzdušné víry, ich vznikanie a zanikanie mení striedavo svoj smer, mení sa rýchlosť prúdnic nad a pod vodičom (teda aj tlak) a to je sprevádzané slabými dynamickými nárazmi vo zvislej rovine, ktoré pôsobia pravidelne a periodicky (Obr.1). Na obrázku je okamžik, keď nad vodičom je rýchlosť prúdnic väčšia ako pod ním $v_1 > v_2$, čím tlak $p_1 < p_2$ a tým je vodič tlačný smerom hore. V nasledujúcom okamžiku sa jav obráti a vodič je tlačný smerom dole.

Experimentálne sa zistilo, že frekvencia kmitania je od 10 do 20 až 50 Hz (u tenších vodičov na hranici počuteľnosti), dĺžka vlny je od 1 do 20 m, amplitúda niekoľko cm (2 až 3 krát priemer vodiča). Následkom vibrácie vzniká dodatočné dynamické namáhanie vo vodiči, ktoré môže spôsobiť únavový lom vodiča (hlavne pri uchytení na izolátorovom reťazci).

Základnou podmienkou vzniku vibrácie je, aby vynútená frekvencia od vetra (f_{vn}) sa rovnala vlastnej frekvencii vodiča (f_{vl})

$$f_{vn} = f_{vl}$$

Vznik vibrácie určujú nasledujúce faktory:

- Charakter vetra.
- Terénne podmienky.
- Výška vodičov nad zemou.
- Rozpätie.

Nakoľko vibrácia môže spôsobiť únavové lomy vodičov a tým poruchy na vedeniach je potrebné sa proti vibrácii brániť. Poznáme dva spôsoby ochrán pred vibráciou, a to pasívna a aktívna ochrana. Pasívna ochrana nepôsobí proti vzniku vibrácie, ale znižuje jej účinok. Aktívna ochrana pôsobí proti vzniku vibrácie.

Pasívna ochrana:

Zmenšenie statického ťahu vo vodičoch.

Použitie festonov.

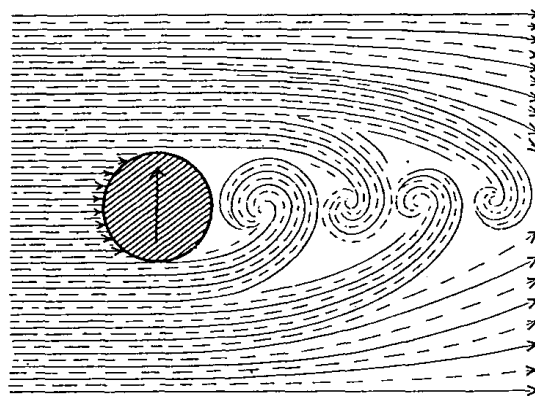
Použitie tlmiacich obalov z pružných drôtov.

Použitie výkyvných (ľahkých) svoriek, ktoré sledujú pohyb vodiča.

Aktívna ochrana:

Použitie antivibračných lán.

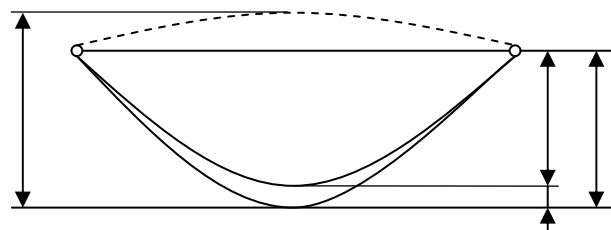
Použitie tlmičov.



Obr.1 Vzdušné víry vznikajúce za vodičom

II. VYŠVIHNUTIE VODIČA

Okrem preťaženia vodiča námraza môže spôsobiť vyšvihnutie vodiča. Vplyvom náhleho odpadnutia námrazy sa odľahčený vodič vyšvihne a svoju rovnovážnu polohu zaujme po niekoľkých silne tlmených kmitoch (Obr.2). Podnet na odpadnutie námrazy vo väčšine prípadov dáva silný nárazový vietor resp. zvýšenie teploty. V prípade, že vodiče VSV sú na stožiaroch usporiadané nad sebou (typ stožiarov napr. „súdok“) môže dôjsť k dotyku vodičov resp. nebezpečnému priblíženiu a následne k medzifázovému skratu.



Obr.2 Vyšvihnutie vodiča

Minimalizácia negatívnych dopadov pri odpadávaní námrazy

Niektoré následky dynamických javov (medzifázové skraty na vedeniach) je možné úspešne eliminovať napr. jedným z nasledovných spôsobov :

a) Zmenou konfigurácie hlavy stožiarov

prechod od vertikálneho k horizontálnemu usporiadaniu vodičov, zvýšením medzifázových vzdialeností vodičov s ohľadom na okrajové polohy vodiča pri dynamickom pohybe.

b) Separovaním vodičov pri zachovaní ich vertikálneho usporiadania

Jedná sa o montáž medzifázových separátorov medzi vertikálne usporiadanými vodičmi. Pri určovaní počtu medzifázových separátorov je nutné vychádzať z podmienky, že vzdialenosť medzi dvomi susednými separátormi musí byť taká, aby časť vodiča medzi nimi nebola schopná nebezpečne vyšvihnúť a spôsobiť medzifázový skrat. Väčší počet separátorov sa dáva na dlhšie rozpätia. Počet separátorov závisí aj od požadovanej úrovne bezpečnosti.

Viac než samotný mechanizmus vzniku nestabilných kmitov je dôležitejšia veľkosť amplitúdy kmitov. Maximálnu amplitúdu vyšvihnutia f_{ξ} je možné určiť na základe niekoľkých známych metodík, ktoré sú založené na energetickej bilancii vodiča pred odpadnutím námrazy a po odpadnutí (Obr.2).

$$\Delta f = f_{mz} - f_{m0}$$

kde:

Δf - rozdiel priebehov v strede rozpätia,

f_{mz} - maximálny priebeh omrznutého vodiča v strede rozpätia (m),

f_{m0} - maximálny priebeh neomrznutého vodiča v strede rozpätia (m),

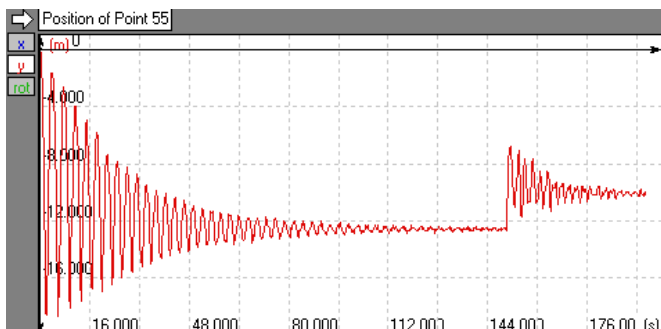
f_{ξ} - vyšvihnutie vodiča (m)

Metodiky, ktoré opísali Gröbel, Krautt a iní posudzujú proces vyšvihnutia vodiča kvázistacionárne a zanedbávajú dynamiku procesu. Predpokladajú parabolický tvar vodiča počas celej doby trvania kmitu. Pri reálnom pohybe však parabola zaniká, pretože pri pohybe je stredná časť vodiča v rozpätí urýchľovaná viac ako okrajové časti vodiča bližšie k závesným bodom. Na základe toho je možné konštatovať, že výpočtové metódy môžu poslúžiť iba ako hrubý odhad na posúdenie nebezpečenstva švihania. Presnejšie výsledky môže poskytnúť simulovanie týchto kmitov pri reálnych podmienkach pomocou simulačného programu.

Modelovanie procesu odpadávania námrazy v jednom rozpätí

Working model (WM)

Program Working model je určený pre simuláciu reálneho správania sa rovinných mechanických sústav. Jeho užívateľ môže definovať geometrický tvar a konfiguráciu jednotlivých telies sústavy, ich „hmotové“ vlastnosti, vzájomné väzby, vnútorné sily, silové dvojice a silové pole pôsobiace na sústavu, počiatočné podmienky a rozsah simulácie.



Obr.3 Vyšvihnutie vodiča v programe Working model

Working model 2D mu umožní sledovať animovaný pohyb sústavy, vytvorí grafy priebehov jednotlivých veličín, ich vektorové znázornenie pri riešení zadaných úloh v rovine.

WM pracuje pod operačným systémom Windows 9x alebo Windows NT, zachováva spôsob ovládania pomocou menu a panelov nástrojov. WM samozrejme umožňuje export výsledkov do dokumentácií písaných v MsWord, ale i riadenie simulácie programom napísaným v MsExcel alebo Matlab. Veľkou výhodou WM je dostupnosť jednotlivých veličín počas simulácie.

Pomocou tohto simulačného programu bol namodelovaný pohyb vodiča a následné určenie maximálnej amplitúdy prvého kmitu (Obr.3).

V tomto prípade bol vodič namodelovaný ako sústava pružín s tlmičmi a hmotných obdĺžnikov. V riešenom prípade bolo 300 m rozpätie rozdelené na 20 rovnakých obdĺžnikov s dĺžkou 13,95 m a 21 pružín s dĺžkou 1 m.

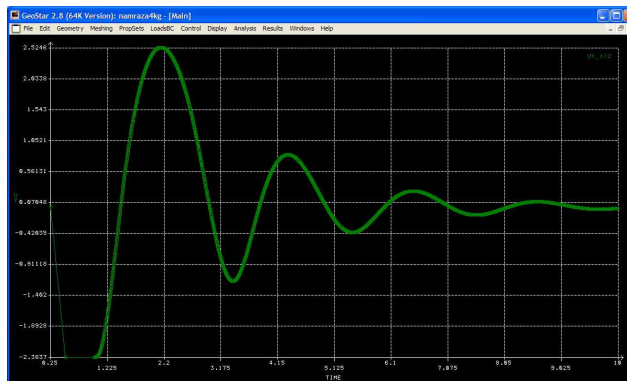
Cosmos/m (CM)

Program Cosmos/m (CM) je moderný a progresívny modulárny systém pre analýzu najširšej triedy problémov metódou konečných prvkov. Umožňuje na vysokej úrovni riešiť úlohy lineárnej a nelineárnej statiky a dynamiky, obecné problémy teplotných polí, stlačiteľné turbulentné 3D prúdenie, únavu, elektromagnetizmus, tvarovou a rozmerovou optimalizáciou pre jednotlivé typy analýz a ich kombinácie.

Jeho užívateľ môže definovať geometrický tvar a konfiguráciu jednotlivých telies sústavy, ich hmotové vlastnosti, vzájomné väzby, vnútorné sily, silové dvojice a silové pole pôsobiace na sústavu, počiatočné podmienky a rozsah simulácie. Implementáciou najmodernejších algoritmov a technológií (chránená technológia FFE – Fast Finite Element) je dosiahnutý vynikajúci výkon systému. CM pracuje pod operačným systémom DOS, Windows 9x, Windows NT, alebo UNIX, zachováva spôsob ovládania pomocou menu a panelov nástrojov.

K dispozícii sú prepojenia a priame vstavané do CAD systémov AutoCAD, CADD5, Pro/ENGINEER a iné. Pomocou simulačného programu Cosmos/m bol namodelovaný pohyb vodiča a následné určenie veľkosti vyšvihnutia prvého kmitu (Obr.4).

Obr.4 Vyšvihnutie vodiča v programe Cosmos/m (námraza 4 kg)



Pre účely modelovania bolo použité lano AIFe 240/39. Parametre lana AIFe 240/39: $\sigma_H = 93$ MPa, $q_1 = 0,98437$ kg.m⁻¹, $E = 73861$ MPa, $S = 281,66$ mm², $d = 21,75$ mm,

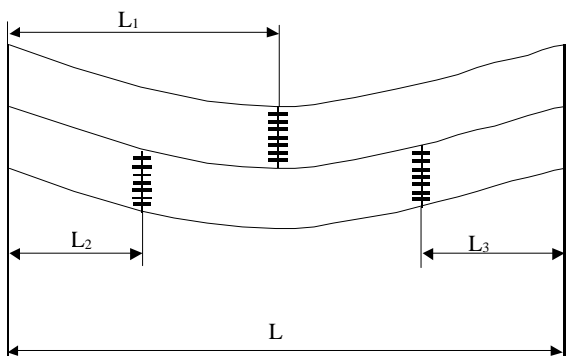
$\alpha = 18,991 \cdot 10^{-6} \text{ } ^\circ\text{C}^{-1}$, $\gamma = 3494,887 \text{ kg} \cdot \text{m}^{-3}$, $q_2 = 1,7137 \text{ kg} \cdot \text{m}^{-1}$ (stredná námrazová oblasť – počiatočný stav)

V Tab.1 sú uvedené vyšvihnutia vodiča vodorovného poľa po odpadnutí námrazy s hmotnosťou 1 kg.m⁻¹, 2 kg.m⁻¹, 3 kg.m⁻¹, 4 kg.m⁻¹, 6 kg.m⁻¹ a 8 kg.m⁻¹ získaných modelovaním v WM a CM. Z uvedeného vyplýva, že vyšvihnutie vodiča vo vodorovnom poli získané pomocou WM je väčšie ako vyšvihnutie vodiča získané pomocou CM. Rozdiel týchto vyšvihnutí sa zväčšuje s narastajúcou námrazou.

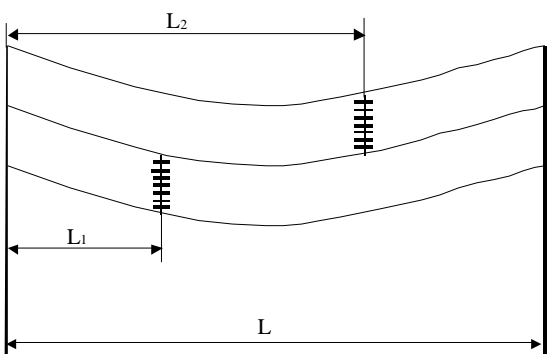
Tab.1 Vyšvihnutie vodiča po odpadnutí námrazy v jednom rozpätí

Námraza [kg.m ⁻¹]	1	2	3	4	6	8
Vodorovné pole - WM [m]	1,205	2,310	4,108	5,798	9,250	12,639
Vodorovné pole – CM [m]	1,266	2,536	3, 574	4, 908	7, 530	9, 886

Rozmiestňovanie medzifázových rozperiek na vonkajšom vedení predstavuje z hľadiska zaťaženia vodiča bodové zaťaženie. Najčastejšie sa používajú tri alebo dva separátory (Obr.5 a Obr.6).



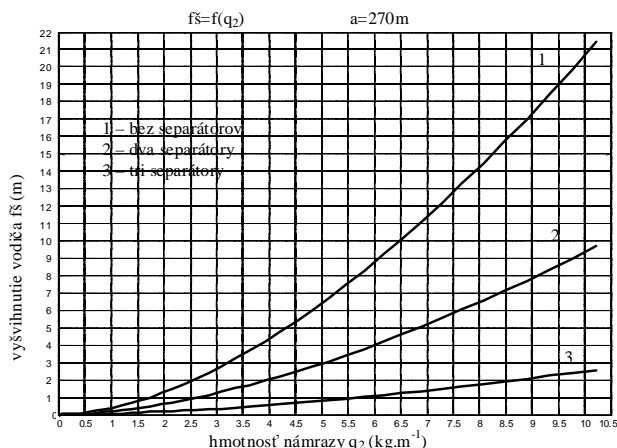
Obr.5 Tri medzifázové separátory na jednom rozpätí



Obr.6 Dva separátory na jednom rozpätí

Na Obr.7 je uvedená závislosť veľkosti vyšvihnutia vodiča od hmotnosti odpadnutej námrazy pre vedenie bez separátorov, s použitím dvoch alebo troch separátorov. Uvedený graf vyjadruje túto závislosť pre jedno konkrétne rozpätie v ťažkej námrazovej oblasti pre lano AlFe 240/39, $\sigma_H = 93 \text{ MPa}$. Konkrétne dvojité 110 kV vedenie je

inštalované na stožiaroch typu „súdok“, kde horizontálna vzdialenosť medzi fázovými vodičmi je cca 4m.



- 1 – bez medzifázových separátorov
- 2 – 2 medzifázové separátory v rozpätí (Obr.5)
- 3 – 3 medzifázové separátory v rozpätí (Obr.6)

Obr.7 Závislosť vyšvihnutia vodiča od veľkosti vzniknutej námrazy

III. ZÁVER

Z uvedeného vyplýva, že v prípade rozpätia bez medzifázových separátorov by k vzájomnému dotyku fázových vodičov došlo pri odpadnutí námrazy s hmotnosťou asi 4 kg.m⁻¹. V prípade, že by sme do rozpätia (približne v 1/3 a v 2/3 rozpätia) umiestnili dva medzifázové separátory k vzájomnému dotyku by došlo pri odpadnutí námrazy s hmotnosťou 6 kg.m⁻¹. Umiestnenie troch medzifázových separátorov (približne v každej 1/4 rozpätia) by zabránilo medzifázovému dotyku fázových vodičov pri odpadávaní aj zriedka kedy sa vyskytujúcich ťažkých námraz.

Ako z vyššie uvedeného vyplýva, realizovaním vhodných opatrení pre elimináciu následkov dynamických javov je možné podstatne zvýšiť spoľahlivosť vonkajších silových vedení. Pri realizovaní aj zdanlivo jednoduchých opatrení je nevyhnutné pomerne zložitým výpočtom overiť dodržanie bezpečných vzdialenosti vodičov od zeme, ciest a od všetkých križovaných objektov a to pri rôznych klimatických podmienkach a zohľadnení vplyvu diskretnéj záťaže na vodič. Z praktických skúseností vyplýva, že na vedeniach s namontovanými separátormi dochádza v zimných mesiacoch k výraznému poklesu poruchovosti. Namontovanie separátorov umožňuje odstraňovať námrazu na vedení vyhrievaním vedenia prenosom zvýšeného výkonu bez nutnosti prerušenia prenosu elektrickej energie.

Ak budú medzifázové separátory v kritických rozpätiach rozmiestňované mierne asymetricky je možné čiastočne eliminovať možnosť vzniku gallopingu vodičov. Galloping - tančenie vodičov je zaujímavým a špecifickým úkazom na VSV. Dochádza k nemu pri mierne omrznutých vodičoch, prípadne pri opadávaní námrazy a spolupôsobenia vetra väčších rýchlostí (nad 7 m.s⁻¹). Vodiče sa „roztančia“ zložitým spôsobom vlnenia s amplitúdou niekoľkokrátmetrovou (5 – 6 m, až jeden násobok priehybu vodiča), s nízkou frekvenciou (0,15 – 1,25 Hz) a dĺžkou vlny niekoľko desiatok metrov. Jav môže trvať aj niekoľko hodín. Sú namáhané izolátorové závesy a stožiare. Často dochádza k ich poškodeniu.

POĎAKOVANIE

Tento článok vznikol na základe grantu agentúry VEGA č. 1/4070/07.

- [5] HLUBEŇ, D.: Phase-shifting transformer in the electric power system of the Slovak Republic. In: SCYR 2009 : 9th Scientific Conference of Young Researchers : Proceedings from conference : May 13th, 2009, Košice, Slovakia. Košice : FEI TU, 2009. 4 s. ISBN 978-80-553-0178-5.

LITERATÚRA

- [1] VARGA, L. - ILENIN, S.: Elektrické rozvody. Košice, 2005
[2] VARGA, L. - ILENIN, S.: Elektrické siete. Košice TU, 2007. 180 s. ISBN 978-80-8073-856-3.
[3] STN EN 50 341: Elektrické vonkajšie vedenia so striedavým napätím nad 45 kV, Slovenský ústav technickej normalizácie, 2007
[4] VARGA, L. – ILENIN, S. – HUDAK, R.: Dynamické javy na vodičoch vonkajších silových vedení pri opadávaní námrazy, Časopis EE, č.12, 2006.

ADRESY AUTOROV

Ing. Stanislav Ilenin, PhD. Autor, Technická Univerzita Košice, Katedra elektroenergetiky, Mäsiarska 74, Košice, SK 04210, Slovenská Republika, stanislav.ilenin@tuke.sk
doc. Ing. Ladislav Varga, PhD. Spoluautor, Technická Univerzita Košice, Katedra elektroenergetiky, Mäsiarska 74, Košice, SK 04210, Slovenská Republika, ladislav.varga@tuke.sk