

Irena GOŁĘBIEWSKA, Maciej DUTKIEWICZ, Bogdan USEWICZ

## URZĄDZENIA TŁUMIĄCE NA NAWIETRZNYCH LINIACH ELEKTROENERGETYCZNYCH

Przewody napowietrznych linii elektroenergetycznych charakteryzują się małą sztywnością, małą masą i relatywnie małym tłumieniem, w związku z tym są bardzo podatne na działanie wiatru. Na skutek drgań wywołanych wiatrem występują w przewodach zmienne naprężenia dynamiczne, które decydują o trwałości linii elektroenergetycznej. Redukowanie poziomu tych drgań jest bardzo ważnym problemem inżynierskim. W pracy przedstawiono podstawowe rodzaje drgań przewodów napowietrznych linii elektroenergetycznych, wywołanych działaniem wiatru i oblodzenia oraz opisano wybrane sposoby obniżania poziomu tych niebezpiecznych drgań.

### 1 WSTĘP

Napowietrzna elektroenergetyczna linia przesyłowa składa się z pojedynczych lub wiązek przewodów, izolatorów, konstrukcji wsporczych, osprzętu i innych elementów wynikających z rodzaju jej pracy. W liniach najwyższych napięć stosuje się wiązki przewodów, które używane są przede wszystkim w celu ograniczenia ułotu i zmniejszenia reaktancji oraz dla zwiększenia ich zdolności przesyłowej. Ze względu na charakter pracy przewodów powinny one cechować się – dużą wytrzymałością mechaniczną na rozciąganie, dużą konduktywnością oraz wysoką odpornością na wpływy atmosferyczne.

Powszechnie używane podwójne wiązki składają się z dwóch przewodów leżących w płaszczyźnie poziomej, oddalonych od siebie o 10 do 25 średnic przewodu. Liczba przewodów w wiązce, w zależności od rodzaju pracy linii może wynosić od dwóch do czterech lub więcej.

Przewody użyte w napowietrznych liniach transmisyjnych wykonywane są z kilku warstw drutów skręconych ciasno razem, które wspólnie mają za zadanie przenoszenie prądu elektrycznego.

Najpopularniejszym i najdłużej stosowanym rodzajem przewodu bimateriałowego (z powodu wysokiego ilorazu siły naciągu do wagi) jest przewód ACSR (Aluminium Conductors Steel Reinforced), składający się z drutów aluminiowych skręconych wokół rdzenia wykonanego z drutów stalowych ocynkowanych. Druty aluminiowe, skręcone wokół rdzenia, tworzą warstwy przewodu, które w stosunku do siebie skręcone są w przeciwnych kierunkach; kierunek warstwy zewnętrznej jest „prawy” (Rys. 1) [1].

Innym rodzajem przewodu stosowanego w napowietrznych liniach elektroenergetycznych jest przewód AAC (All Aluminium Conductors). Przewód ten wykonany jest w całości z drutów aluminiowych (zawiera min. 99,5% czystego aluminium), posiada największy iloraz przewodności elektrycznej do wagi, ale cechuje się niskimi właściwościami mechanicznymi. Używany jest najczęściej na obszarach zurbanizowanych [1].

W celu podniesienia wytrzymałości przewodu stosuje się przewody ze stopów aluminium. Przewodem o takiej budowie jest przewód AAAC (All Aluminium Alloy Conductors) wykonany ze stopu aluminium-magnez-krzem, charakteryzujący się doskonałą odpornością na korozję i wysokim ilorazem wytrzymałości do wagi (Rys. 2) [1].



Rys. 1. Przykładowy przewód ACSR [1]



Rys. 2. Przykładowy przewód AAAC [1]

Przewody są elementami konstrukcyjnymi bardzo wiotkimi, charakteryzowanymi przez niski poziom tłumienia konstrukcyjnego i dlatego są one podatne na wymuszenia dynamiczne spowodowane np. wiatrem. Drgania napowietrznych linii przesyłowych wywołane przez wiatr zachodzą z częstotliwością: od niskiej (zjawisko galopowania) do wysokiej (drżania eolskie) a dla wiązki przewodów drżania wywołane śladem (niestabilność typu flatterowego, spowodowana sprzężeniem pionowej i poziomej postaci drgań) ze średnią częstotliwością. Wyżej wymienione rodzaje drgań są niebezpieczne, ponieważ mogą doprowadzić do zniszczenia zmęczeniowego oraz występowania zjawiska frettingu (powierzchniowe zacieranie stykających się w przewodzie drutów), a nawet do zerwania przewodu.

Aby właściwie zabezpieczyć przewody przed drganiami konieczne jest zrozumienie zjawisk fizycznych wywołujących te drgania.

W pracy analizowano podstawowe rodzaje drgań powszechnie występujące na przewodach pojedynczych i na wiązkach przewodów oraz opisano współczesne środki tłumiące, efektywnie obniżające poziom niebezpiecznych oscylacji.

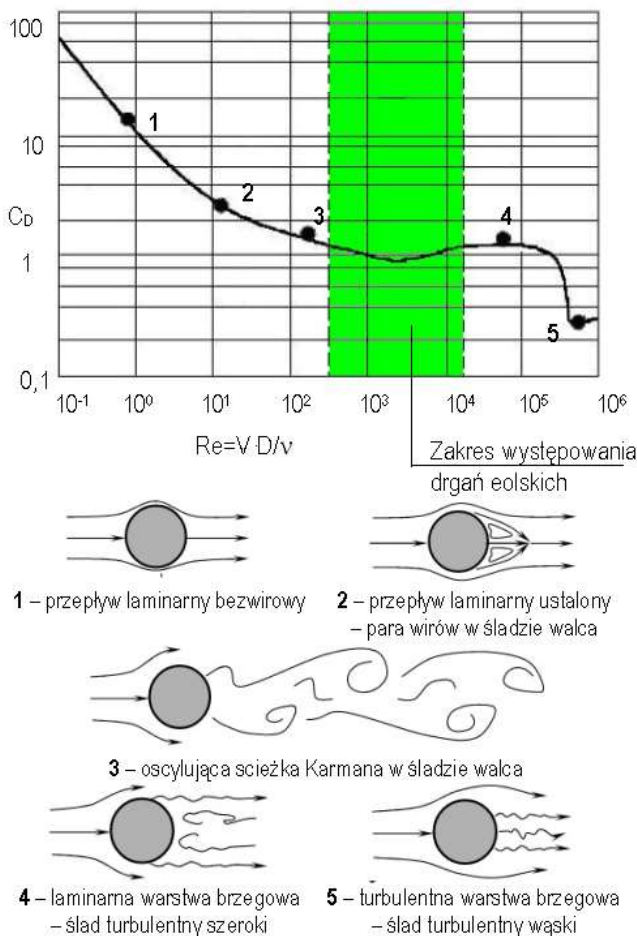
## 1. RODZAJE DRGAŃ

Napowietrzne linie elektroenergetyczne są stale poddawane zmiennemu obciążeniu wiatrem, które może stopniowo prowadzić do osłabienia ich trwałości, a w konsekwencji do skrócenia okresu ich eksploatacji. Siły wiatru wywołują trzy główne rodzaje drgań przewodów:

- drgania eolskie, charakteryzujące się częstotliwością od 3 do 150 Hz i amplitudami mniejszymi niż średnica przewodu,
- galopowanie, występujące z częstotliwością w zakresie od 0,1 do 1 Hz, z amplitudami od  $\pm 0,1$  do 1 raza zwis przewodu,
- drgania wywołane śladem, zachodzące w zakresie częstotliwości od 0,15 do 10 Hz, z amplitudami w zakresie od 0,5 do 80 razy średnica przewodu [2].

### 1.1 Drgania eolskie

Drgania eolskie - wywołane wirami są klasycznym rodzajem drgań spowodowanych przez wiatr.

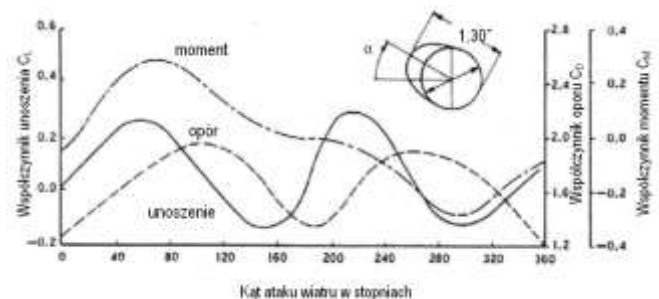


**Rys. 3.** Zależność współczynnika oporu aerodynamicznego  $C_D$  od liczby Reynoldsa  $Re$  z różnymi obrazami optywów walca (rysunek sporządzono na podstawie [3])

Drgania te związane są z fluktuacjami ciśnienia, wywołanego wiatrem na powierzchni przewodu. Aerodynamika tego rodzaju ruchu jest zwykle opisywana przez liczbę Reynoldsa ( $Re$ ) ( $Re = V \cdot D / \nu$ , gdzie  $V$  jest prędkością wiatru,  $D$  jest średnicą przewodu, a  $\nu$  jest lepkością kinematyczną powietrza). Naprzemienne odrywanie się z powierzchni przewodu wirów o przeciwnych cyrkulacjach, charakteryzuje się fluktuacyjną niestabilnością przepływu o częstotliwości ( $f_s$ ), którą można wyrazić poprzez liczbę Strouhala ( $Sh$ ) ( $f_s = Sh \cdot V / D$ ). Liczba Strouhala wynosi 0,185 dla wszystkich typowych przewodów linii elektroenergetycznych [4]. Drgania eolskie powstają, gdy częstotliwość odrywających się wirów zbliża się do częstotliwości drgań własnych przewodu (zjawisko rezonansu). Na rysunku 3 przedstawiono wykres zależności współczynnika oporu aerodynamicznego  $C_D$  od liczby Reynoldsa  $Re$  oraz pokazano kolejne obrazy przepływu w śladzie walca. Liczba Reynoldsa dla drgań eolskich, dotycząca powszechnie stosowanych przewodów napowietrznych linii elektroenergetycznych, zawiera się w granicach od 500 do  $2 \cdot 10^4$  (Rys. 3) [4].

### 1.2 Galopowanie

Najbardziej niebezpiecznym dla napowietrznych linii elektroenergetycznych rodzajem drgań jest zjawisko zachodzące na oblodzonych przewodach (pojedynczych lub wiązkach przewodów) – galopowanie. Ta niestabilność występuje zwykle w podstawowej postaci drgań przewodów linii przesyłowej w płaszczyźnie pionowej, prowadząc w konsekwencji do jej zniszczenia. Obecność lodu na powierzchni kabla zmienia jego kształt poprzeczny, z przekroju symetrycznego do asymetrycznego, wywołując jego niestabilność aerodynamiczną. Galopowanie nie są to drgania wymuszone, lecz samowzbudne. Zjawisko to występuje podczas ustalonego i turbulentnego przepływu wiatru. Gdy wiatr wieje prostopadle na przęsło przewodu odchyła się on od osi pionowej i z powodu zmian prędkości wiatru przęsło będzie oscylowało dookoła pewnego położenia równowagi. Kiedy nastąpi oblodzenie przewodu będzie on doznawał skręcenia (przy tych samych warunkach wiatrowych), z powodu przemieszczenia się środka masy i środka ciśnienia od środka ciężkości przewodu. Oscylacje te będą zachodziły z częstotliwością drgań własnych na skrecanie. Gdy warstwa lodu narasta, głównie na górnej zewnętrznej stronie przewodu, częstotliwość drgań własnych na skrecanie zmniejsza się, a gdy częstotliwość ta zbliża się do jednej z niższych częstotliwości drgań własnych pionowych, nastąpi galopowanie. Na rysunku 4 przedstawiono zależność współczynników aerodynamicznych unoszenia, oporu i momentu działających na przewód oblodzony.

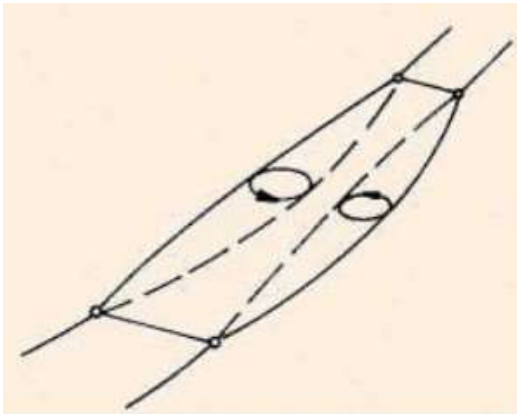


**Rys. 4.** Zależność współczynników aerodynamicznych unoszenia, oporu i momentu działających na przewód oblodzony [6]

Dla kąta ataku wiatru wynoszącego około  $45^\circ$  krzywa współczynnika unoszenia osiąga maksimum (wiatr unosi przewód). Gdy przewód doznaje skręcenia, siła wiatru działa ku dołowi, prowadząc do wzrostu amplitudy drgań w płaszczyźnie pionowej podczas galopowania [6].

## 1.3 Drgania wywołane śladem (oscylacje podprzęsła)

W odróżnieniu od drgań eolskich czy galopowania, drgania wywołane śladem mogą występować tylko na wiązkach przewodów - gdy jeden przewód leży w śladzie drugiego. Ślad przewodu nawietrznego powoduje niższą siłę oporu i wywołuje powstanie sił unoszenia na przewodzie zawietrznym. Poprzez połączenie przewodów odstępnikami ruch jednego przewodu powoduje ruch drugiego przewodu, stąd przewód zawietrzny drga z amplitudą prawie równą amplitudzie przewodu nawietrznego. Jednakże, to przewód zawietrzny wprowadza niestabilność do układu i pobiera energię z przepływu. Drgania te mogą zachodzić w płaszczyźnie pionowej i poziomej, lub przewód może wykonywać ruch skrętny. Drgania te zwykle występują w postaci podstawowej podprzęsła. Najbardziej rozpowszechnionym i najbardziej niebezpiecznym rodzajem drgań dla wiązki dwóch przewodów są drgania występujące w płaszczyźnie poziomej (Rys. 5). Położenie każdego przewodu opisuje wąska elipsa, z osią główną rzędu dziesięciu średnic przewodu [7]. Na rysunku 5 przedstawiono drgania wywołane śladem w dwóch równoległych przewodach.



Rys. 5. Drgania wywołane śladem w płaszczyźnie poziomej w wiązce dwuprzewodowej [7]

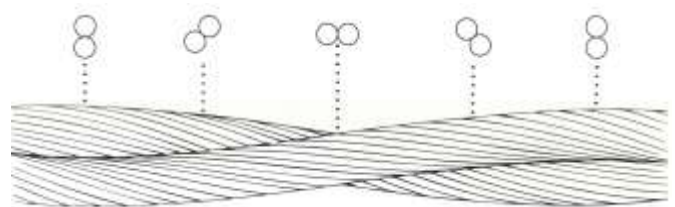
## 2 URZĄDZENIA TŁUMIĄCE

Istniejące sposoby redukcji drgań przewodów linii elektroenergetycznych można podzielić następująco:

- sposoby aerodynamiczno-konstrukcyjne np. przewód skręcony z dwóch przewodów (Rys. 6), przewód samotłumiący (Rys. 7), przewód AERO-Z (Rys. 8), przewód o przekroju poprzecznym owalnym (Rys. 9),
- sposoby mechaniczne - tłumiki mechaniczne umieszczane na przewodach (Rys. 10÷16).

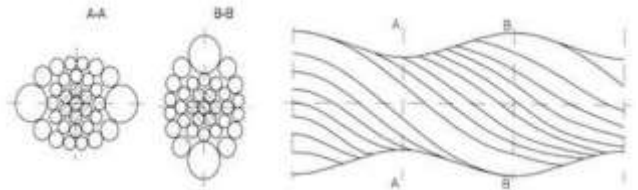
### 2.1 Sposoby aerodynamiczno-konstrukcyjne

AAC/VR (lub AASR/VR) jest to przewód projektowany do ograniczenia drgań eolskich i galopowania. Jest to pewien rodzaj permanentnego spoileru przepływowego. Przewód ten, o przekroju poprzecznym w kształcie ósemki, złożony jest z dwóch identycznych skręconych ze sobą przewodów (Rys. 6). Spiralny kształt tego przewodu powoduje zakłócenie sił powstałych od ustalonego poprzecznie skierowanego do przewodu wiatru (siły te są zakłócone przez ciągle zmieniający się przekrój wystawiony na działanie wiatru). Ten spiralny kształt przewodu razem z mniejszą sztywnością na skręcanie i zmieniającą się sztywnością na zginanie redukuje galopowanie przewodu. Na rysunku 6 przedstawiono przewód VR2, zbudowany ze skręconej ze sobą pary przewodów [8].



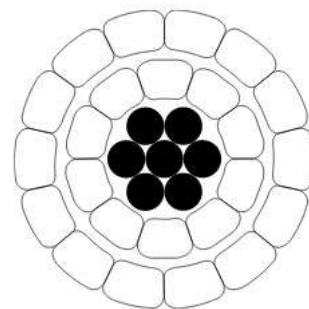
Rys. 6. Przewód VR2 - skręcona para przewodów [8]

Podobny jak wyżej efekt tłumienia, uzyskano dla przewodu o przekroju owalnym. Na rysunku 7 przedstawiono przewód o zmiennym poprzecznym przekroju owalnym na całej jego długości, skręcony z drutów o różnych średnicach [9].



Rys. 7. Przewód o przekroju owalnym [9]

Przewód ACSR/SD jest przykładem przewodu samotłumiącego. Charakteryzuje się wysokim poziomem samotłumienia z powodu tłumienia uderzeniowego między rdzeniem a warstwami drutów aluminiowych. Rdzeń stalowy zabezpieczony antykorozyjnie i dwie warstwy trapezoidalnych drutów aluminiowych oddzielone są szczeliną powietrzną, w celu uzyskania odpowiednich charakterystyk tłumienia, zdolnych do obniżenia poziomu drgań eolskich, bez potrzeby stosowania tłumików. Na rysunku 8 przedstawiono przewód ACSR/SD z dwoma warstwami drutów, koncentrycznie nawiniętych dookoła rdzenia. Dodatkową zaletą przewodów ACSR (w porównaniu z przewodami tradycyjnymi) jest możliwość stosowania mniejszych konstrukcji wsporczych, wzrost niezawodności, niższe koszty linii transmisyjnej, zmniejszony zwis, zredukowane obciążenia spowodowane wiatrem i lodem oraz zwiększenie długości przęsła [10,11].



Rys. 8. Przewód ACSR/SD [10]

Wszystkie przewody w większym lub mniejszym stopniu mają zdolność do samotłumienia. Dla przewodów tradycyjnych głównym mechanizmem dysypacji energii mechanicznej jest tarcie. Gdy przewód jest zginany, jego druty doznają poślizgu względem siebie i powstaje siła tarcia. Ten ruch względny pomiędzy drutami przewodu wywołuje straty energii (poprzez powstałe ciepło) i jest główną przyczyną samotłumienia przewodu [11].

Zdolność przewodu do pochłaniania energii jest ściśle związana z jego naciągiem. Kiedy naciąg przewodu wzrasta druty mają tendencję do zaciskania się i wówczas poślizg jest redukowany,

przyczyniając się do zmniejszenia zdolności przewodu do samotłumienia. To wyjaśnia, dlaczego naciąg przewodu jest zwykle na niskim poziomie. Konsekwentnie, przewody o dużej średnicy (liczbie drutów) mają większą zdolność do samotłumienia niż przewody o małej średnicy [11].

Interesującym rozwiązaniem w zakresie minimalizacji drgań jest przewód AERO-Z (przewód AAAC-Z - rysunek 9), charakteryzujący się wysokim stopniem samotłumienia drgań (szczególnie przy niskich częstotliwościach) oraz redukcją współczynnika oporu. Profilowane w kształcie litery Z druty warstwy zewnętrznej tworzą prawie gładką powierzchnię przewodu (z małymi spiralnymi rowkami) [12].



Rys. 9. Przewód AERO-Z [12]

## 2.2 Tłumiki skrętne

Do powszechnie stosowanych urządzeń tłumiących drgania przewodów napowietrznych linii elektroenergetycznych należą:

- tłumiki skrętne,
- tłumiki spiralne,
- tłumiki typu Stockbridge,
- odstępniki z możliwością tłumienia (dla wiązek przewodów) [2].

W pracy skupiono się na najnowszych rozwiązaniach tłumików skrętnych i odstępników - tłumików.

### Tłumiki skrętne AR Twister

Do kontroli galopowania na krótkich pojedynczych przęsłach przewodów stosowany jest tłumik skrętny AR Twister. Projektowany jest on również do kontroli drgań eolskich dla przewodów o małych średnicach i małych rozpiętościach przęsła. Produkowane są trzy rodzaje tłumików AR Twister: Piston (Rys. 10), Kanister (Rys. 11), Slider (Rys. 12) [13].

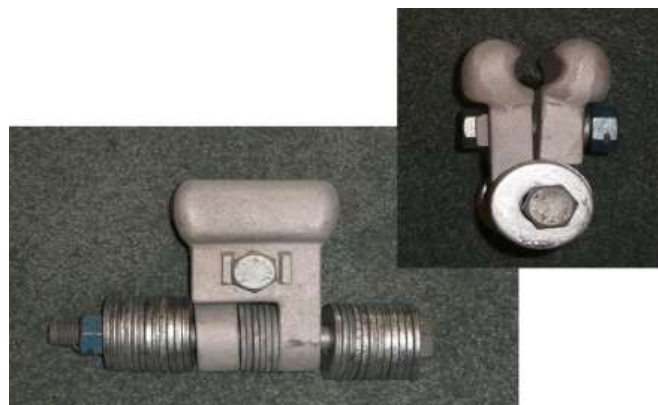
Wszystkie tłumiki AR Twister redukują lub eliminują galopowanie przewodu poprzez wymuszenie przewodu do obrotu i w konsekwencji do zmniejszenia aerodynamicznej siły unoszenia. AR Twister jest urządzeniem inercyjnym, zbudowanym z aluminium (ze względu na wagę i wytrzymałość). Potrzebną ilość tłumienia do kontroli drgań eolskich dostarcza tarcie metalu o metal, powstałe w wyniku małych ruchów pomiędzy korpusem urządzenia i jego zaciskiem. Urządzenia te mocuje się sztywno do przewodu przy pomocy standardowych zacisków pionowo (nad przewodem) lub odchylone od pionu pod kątem od 45° do 60°.



Rys. 10. Tłumik AR Twister Piston [13]



Rys. 11. Tłumik AR Twister Canister [13]



Rys. 12. Tłumik AR Twister Slider [13]

Takie ustawienie tłumików powoduje początkowy (wstępny) skręt przewodu, pod wpływem sił grawitacyjnych. W przypadku wystąpienia galopowania siły inercyjne działają na urządzenie zmuszając przewód do ponownego skrętu, w kierunku przeciwnym do jego położenia początkowego. Podczas galopowania, oscylacje skrętne są zwiększane, osad lodowy rozkłada się na większej powierzchni przewodu i profil osadu staje się gładki i mniej mimośrodowy. Jednocześnie, aerodynamiczna siła unoszenia jest redukowana i poziom drgań obniża się. Na rysunku 10 przedstawiono tłumik AR Twister Piston, na kolejnych rysunkach odpowiednio AR Twister Canister (Rys. 11) i AR Twister Slider (Rys. 12) [13].

## Odstępnik / tłumik skrętny AR Spacer / Twister

AR Spacer / Twister może być montowany na pojedynczym przewodzie lub na wiązkach przewodów w pozycji pionowej lub poziomej. Urządzenie to służy do obniżania poziomu drgań przewodów o niskim ciężarze jednostkowym. AR Spacer / Twister łączy w sobie korzyści działania obrotowego zacisku przegubowego z cechami odstępnika polimerowego. AR Twister eliminuje galopowanie poprzez wymuszenie przewodu do skrętu i tym samym do zmniejszenia aerodynamicznej siły unoszenia [13]. Na rysunku 13 przedstawiono odstępnik AR Spacer / Twister oraz przegubowy zacisk AR Clamp [13].



Rys. 13. AR Spacer / Twister i przegubowy zacisk AR Clamp [13]

## Odstępnik / tłumik AR MOD 2 Spacer Damper

Odstępnik / tłumik AR Mood 2 Spacer Damper montowany jest poziomo lub pionowo na wiązkach przewodów, w celu kontroli galopowania. Urządzenie to składa się ze stalowej sprężystej obręczy i aluminiowych zacisków. Przegubowe zaciski obracają się na obręczy, pozwalając na obrót i skręt przewodu, utrzymując jednocześnie odległość między przewodami. Kluczem efektywności tego odstępnika / tłumika są duże kąty rotacji, efektywnie zmieniające kąt ataku wiatru podczas galopowania [13]. Na rysunku 14 przedstawiono odstępnik - tłumik AR MOD 2 Spacer Damper dla wiązki dwóch przewodów [13].



Rys. 14. Odstępnik / tłumik AR MOD 2 Spacer Damper [13]

## Odstępnik AR Light-Weight Spacer

Odstępnik AR Light-Weight Spacer przeznaczony jest do tłumienia galopowania na pionowych i poziomych wiązkach przewodów linii przesyłowych, poprzez skręt przewodów. Przegubowe zaciski obracają się i skręcają przewód pod dużym kątem [13].

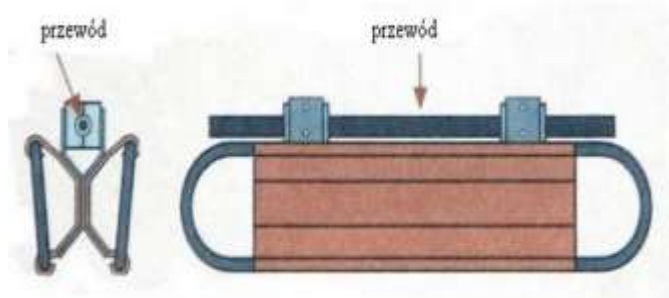
Odstępnik AR Light-Weight Spacer przedstawiono na rysunku 15 [13].



Rys. 15. Odstępnik AR Light-Weight Spacer (ARLWS) [13]

## Tłumik AR WINDAMPER

Tłumik Windamper stosowany jest do obniżenia galopowania pojedynczych przewodów napowietrznych linii elektroenergetycznych. Urządzenie to składa się z dwóch wklęsłych płytek, dwóch zacisków i osprzętu. Aerodynamiczne siły unoszenia i oporu powodują zmiany w kącie ataku wiatru wzdłuż przewodu i w ten sposób tłumik redukuje poziom drgań wywołanych galopowaniem. Podczas wystąpienia galopowania grawitacja i siła wiatru powodują skręt przewodu, który powoduje wygładzanie osadu lodu. Tłumik ten projektowany jest indywidualnie, w zależności od charakterystyki linii elektroenergetycznej. Wzrost powierzchni tłumika podnosi wielkość oporu aerodynamicznego i dodaje tłumienie aerodynamiczne do układu [13]. Zalecana liczba tłumików na jedno przęsło wynosi 2 [14].



Rys. 16. Tłumik drgań AR Windamper [13]

## PODSUMOWANIE

Obniżanie poziomu drgań jest ważne, ponieważ drgania nie-tłumione mogą prowadzić do zniszczenia przewodów, osprzętu lub do awarii sieci przesyłowej. Na podstawie przeprowadzonego przeglądu współczesnych rozwiązań technicznych można stwierdzić, że efektywnymi sposobami tłumienia drgań jest stosowanie:

- przewodów o odpowiedniej budowie wewnętrznej (samotłumienie),
- przewodów o zmiennej geometrii na długości przęsła,
- mechanicznych urządzeń tłumiących drgania.

Dla omówionych tłumików drgań, wymuszenie skręcania przewodu jest podstawową przyczyną ich wysokiej efektywności.

## BIBLIOGRAFIA

1. Materiały firmowe – CME (dane na dzień 30.09.2016) <http://www.cmewire.com/> - katalog produktów
2. Gołębiowska I., Dutkiewicz M., Usewicz B.: *Sposoby tłumienia drgań napowietrznych linii elektroenergetycznych*. Tts Technika Transportu Szynowego 12/2015.

3. Zdravkovich M.M. - *Flow around Circular Cylinders; Volume 1. Fundamentals*. Oxford Science Publications, 1997
4. Lilien Pr. J.L. – *Power Line Aeolian Vibrations*, Universite of Liege, 2013.
5. Gonçalves Guedes V., Trotta Matt C.F. – *Literature review on Vortex-induced vibrations around circular cylinders for future investigations on wind-induced vibrations around transmission line conductors*, Proceedings of COBEM 2009, 20th International Congress of Mechanical Engineering.
6. Reference reports prepared by Preformed Line Products. *Conductor galloping basics*. 2016.
7. Paidoussis M.P., Price S.J., de Langre E. - *Fluid-Structure Interactions: Cross-Flow-Induced Instabilities*. Cambridge University Press 2011.
8. Materiały firmowe – Southwire (dane na dzień 30.09.2016) <http://www.southwire.com/> - katalog produktów
9. Kiessling F., Nefzger P., FNolasco J.F. , Kaintzyk U.: *Overhead Power Lines: Planning, Design, Construction*, Springer, 2003.
10. Materiały firmowe – Stabiloy Brand 2015 (dane na dzień 30.09.2016) <http://www.stabiloy.com/> - katalog produktów.
11. Technical Report PES-TR17: An Introductory Discussion on Aeolian Cibration of Single Conductors prepared by the Transmission & Distribution Committee. IEEE 2015 The Institute of vElectrical and Electronic Engineers, Inc.
12. Materiały firmowe – Centrum Elektrycznego ANIA (dane na dzień 30.09.2016) katalog Linie napowietrzne Nexans.
13. Materiały firmowe – AR Products LLC 2015 (dane na dzień 30.09.2016) <http://arproducts.org/> - katalog produktów
14. Technical Brochure, 322TF B2.11.06 *State of the art of conductor galloping*. 2007.

### Damping devices of overhead electrical power lines

*Conductors of overhead power lines have a low stiffness, low weight and relatively low attenuation, therefore, they are very susceptible to the wind. As a result of vibrations caused by wind, the variable dynamic stresses are in the power lines and determine the durability of the power line. Reducing the level of vibration is a very important engineering problem. The paper presents basic types of vibration of overhead power line cables, caused by wind and ice, and describes some of these modern devices for damping vibrations.*

Autorzy:

dr hab. inż. **Irena Gołębiowska** – Uniwersytet Technologiczno-Przyrodniczy w Bydgoszczy, Wydział Budownictwa, Architektury i Inżynierii Środowiska, Katedra Konstrukcji Budowlanych

dr inż. **Maciej Dutkiewicz** – Uniwersytet Technologiczno-Przyrodniczy w Bydgoszczy, Wydział Budownictwa, Architektury i Inżynierii Środowiska, Katedra Konstrukcji Budowlanych

inż. **Bogdan Usewicz** – Uniwersytet Technologiczno-Przyrodniczy w Bydgoszczy, Wydział Budownictwa, Architektury i Inżynierii Środowiska, Katedra Konstrukcji Budowlanych