

SPOSOBY TŁUMIENIA DRGAŃ NAPOWIETRZNYCH LINII ELEKTROENERGETYCZNYCH

Streszczenie

Przewody są ważnymi elementami składowymi napowietrznych linii elektroenergetycznych. Charakteryzują się one małym tłumieniem wewnętrznym, małą sztywnością i małą masą, wobec czego nie są zdolne do całkowitej dysypacji energii wymuszenia, stąd mogą osiągać duże amplitudy drgań. Ograniczanie możliwości zniszczeń powodowanych przez wiatr jest bardzo ważne nie tylko ze względu na bezpieczeństwo konstrukcji, ale również ze względów ekonomicznych. W pracy krótko scharakteryzowano podstawowe rodzaje wymuszeń drgań przewodów, wywołane działaniem wiatru. Opisano takie zjawiska aerodynamiczne jak: wzbudzenie wirowe, galopowanie i drgania wywołane śladem oraz przedstawiono powszechnie stosowane sposoby obniżania amplitud drgań przewodów.

WSTĘP

Napowietrzna linia elektroenergetyczna, to zespół przewodów odpowiednio izolowanych umieszczonych obok siebie na konstrukcjach wsporczych. Kluczową składową linii elektroenergetycznej jest przewód wiodący prąd. W linii napowietrznej przewody są mocowane do konstrukcji wsporczych za pomocą izolatorów. Zadaniem konstrukcji wsporczych jest podtrzymywanie przewodów i/lub przejmowanie siły ich naciągu. Materiałem powszechnie stosowanym do budowy przewodów jest aluminium. Typowa konstrukcja przewodu, to lina skręcona z drutów aluminiowych z rdzeniem z drutów stalowych. W ostatnich 20-tu latach stosuje się przewody izolowane w liniach niskiego napięcia (nN), przewody w osłonie izolacyjnej w liniach średniego napięcia (SN), oraz gołe przewody stalowo-aluminiowe w liniach wysokiego (WN) i najwyższego napięcia (NN).

Przewody charakteryzują się małą sztywnością, relatywnie małym tłumieniem i małą masą, w związku z tym są bardzo podatne na działanie wiatru. Jednym z ważnych zagadnień, zarówno przy projektowaniu, jak i montażu linii elektroenergetycznych jest znajomość mechanizmów powstawania drgań. Na skutek drgań wywołanych wiatrem występują w przewodzie zmienne naprężenia dynamiczne decydujące o jego trwałości. Amplituda i częstość drgań zależy od wiele czynników, takich jak np. dane znamionowe linii, warunki klimatyczne, terenowe itp. Drgania przewodów napowietrznych linii elektroenergetycznych to przede wszystkim drgania spowodowane wirami (drgania eolskie), galopowanie oraz drgania wywołane śladem. Redukowanie poziomu tych drgań jest bardzo ważne, ponieważ drgania nietłumione mogą doprowadzić do zniszczenia przewodu, osprzętu, linii elektroenergetycznej lub do awarii sieci przesyłowej.

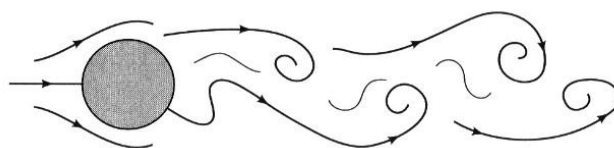
W pracy przedstawiono podstawowe rodzaje drgań przewodów napowietrznych linii elektroenergetycznych wywołanych wiatrem, których tłumienie jest sprawą kluczową w bezpiecznym ich użytkowaniu. Opisano aktualnie stosowane sposoby ograniczające amplitudy drgań do dopuszczalnego poziomu.

1. RODZAJE DRGAŃ

1.1. Drgania spowodowane wirami (drgania eolskie)

Większość powszechnie występujących drgań wywołanych wiatrem, to drgania eolskie. Drgania te powstają w wyniku odrywania się wirów w śladzie przewodu, pod wpływem wiatru ustalonego

o niskiej prędkości od 1 do 7 m/s; zachodzące głównie w płaszczyźnie pionowej. Zakres ich częstotliwości wynosi od 3 do 150 Hz, [1]. Drgania przewodów, zarówno pojedynczych, jak i w wiązce mają postać fal stojących z wymuszonymi węzłami w miejscach podparcia i węzłami pośrednimi rozmieszczonymi wzdłuż rozpiętości przęsła w odstępach, które zależą od częstotliwości drgań własnych. Chociaż takie drgania są ledwo odczuwalne, z powodu małych amplitud (mniejszych niż średnica przewodu) są one jednak ważne, ponieważ mogą doprowadzić do zniszczenia zmęczeniowego przewodu w miejscach jego wyjścia z uchwytów mocujących. Charakter opływu przewodu wiatrem zależy od liczby Reynoldsa, definiowanej jako stosunek sił inercyjnych do sił lepkości. Opływ walca przez strugę wiatru charakteryzuje się podciśnieniem na znacznej części jego obwodu. Gdy opływ walca przez strugę wiatru jest laminarny, to w dwóch punktach strefy ssania powstają odrywające się naprzemiennie wiry. Te naprzemiennie odrywające się wiry wywołują naprzemiennie ciśnienia, które powodują ruch przewodu w kierunku prostopadłym do kierunku wiatru.



Rys. 1. Schemat ścieżki wirowej Karmana w śladzie walca

Naprzemiennie odrywanie się wirów następuje regularnie; powstaje wówczas tzw. ścieżka wirowa Karmana. Gdy częstość odrywania się wirów jest w przybliżeniu równa jednej z częstości drgań własnych przewodu występuje zjawisko znane pod nazwą „lock in”. Podczas tej synchronizacji częstości przewód jest w stanie rezonansu. Drgania eolskie występują na przewodach pojedynczych i przewodach w wiązce. Chociaż te drgania są słabo odczuwalne, z powodu małych wartości amplitud (mniejszych niż średnica kabla), są one jednak bardzo ważne, ponieważ mogą prowadzić do zniszczenia zmęczeniowego kabla w miejscach wysokiej koncentracji naprężeń.

1.2. Galopowanie

Galopowanie jest aerosprężystym zjawiskiem samowzbudnym, charakteryzowanym przez niskie częstości i duże amplitudy. Dotyczy przewodów pojedynczych jak i przewodów w wiązce, z jedną

lub kilkoma pętłami fal stojących i fal biegnących lub ich kombinacji w przęśle przewodu. Fale stojące mogą występować z jedną lub większą liczbą pętli (do 10) na długości przęsła, jednak dominuje mała liczba pętli. Częstotliwości drgań zawierają się w granicach od 0,1 do 1 Hz a amplitudy od $\pm 0,1$ do ± 1 razy zwis przewodu. Przeważnie, galopowanie spowodowane jest przez wiatr ustalony o średniej i dużej prędkości ($V > 15$ m/s), wiejący na asymetrycznie obciążony (np. lodem lub mokrym śniegiem) przewód. Obserwowane są duże amplitudy w płaszczyźnie pionowej, podczas gdy częstotliwości są zależne od rodzaju przewodu i od postaci drgań [2]. Zjawisko to zostało po raz pierwszy zaobserwowane na oblodzonych liniach elektroenergetycznych poddanych silnym wiatrom. Galopowanie jest typową niestabilnością wywołaną sprzężeniem sił aerodynamicznych, które działają na przewód z drganiami przewodu. Drgania przewodu okresowo zmieniają kąt natarcia wiatru. Zmiana kąta natarcia wywołuje zmianę sił aerodynamicznych działających na przewód, powodując zmianę w odpowiedzi przewodu. Pierwsze, uproszczone kryterium (przy przyjęciu modelu układu o jednym stopniu swobody) dotyczące niestabilności związanej z galopowaniem przedstawił Den Hartog i jest ono następujące:

$$\left(\frac{dC_L}{d\alpha} + C_D \right)_{\alpha=0} < 0$$

gdzie: α jest kątem natarcia, a C_L i C_D są aerodynamicznymi współczynnikami, odpowiednio siły nośnej i siły oporu. Warunkiem koniecznym do wystąpienia galopowania (w ramach teorii quasi-ustalonej) jest wystąpienie w układzie ujemnego tłumienia aerosprężystego. Przewód o przekroju kołowym nie może galopować z powodu jego symetrii geometrycznej ($dC_L/d\alpha=0$), chyba że przekrój ten zostanie zmieniony. Oblodzenie przewodu prowadzi do zmiany jego przekroju poprzecznego a więc do jego niestabilności aerodynamicznej [3]. Prace przeprowadzone przez Hartoga wskazują, że niestabilność aerodynamiczna jest główną przyczyną zjawiska galopowania. Jego badania były prowadzone przy założeniu, że ruch pionowy przewodu jest dominujący a wpływ ruchu skrętnego i poziomego może być pominięty. Późniejsze badania udowodniły, że ruch skrętny jest integralną częścią zjawiska galopowania. Efekt sprzężenia ruchu skrętnego z translacyjnym gra kluczową rolę w większości przypadków rozwijającego się galopowania [4]. Galopowanie napowietrznych linii elektroenergetycznych może spowodować m.in. przeskok iskry między fazami, zniszczenie przewodów, zniszczenie łańcuchów izolatorów a nawet zawalenie się konstrukcji wsporczych [5].

1.3. Drgania wywołane śladem

W przeciwieństwie do drgań eolskich czy galopowania, drgania wywołane śladem mogą występować tylko na wiązkach przewodów i wówczas gdy jeden przewód leży w śladzie innego przewodu. Drgania te zwykle występują w podstawowej postaci drgań z amplitudą zawierającą się w granicach od 0,5 do 80 razy średnica przewodu i z częstotliwością od 0,15 do 10 Hz [6].

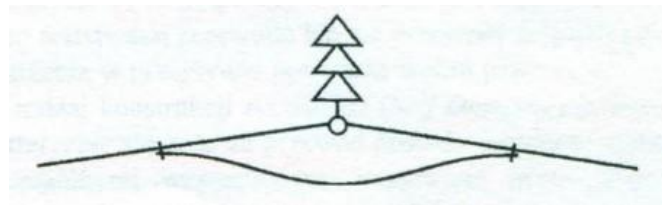
Drgania wywołane śladem są spowodowane wiatrem ustalonym o średniej i dużej prędkości ($V > 10$ m/s).

W przeciwieństwie do galopowania drgania te mogą występować w ciągu całego roku. Amplituda tych drgań nie jest tak duża jak w przypadku galopowania, jednak mogą one doprowadzić do zniszczenia przewodów, zacisków czy tłumików. Nie są to drgania tak powszechne jak drgania eolskie.

2. SPOSOBY TŁUMIENIA DRGAŃ PRZEWODÓW

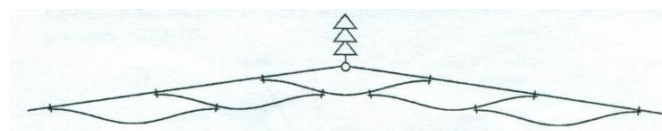
W celu minimalizowania negatywnych wpływów drgań eolskich napowietrznych linii energetycznych stosuje się powszechnie różnego rodzaju metody: zmniejszenie siły naciągu, przewody samotłumiące oraz urządzenia tłumiące.

Najprostszym sposobem tłumienia drgań eolskich są tzw. pętla tłumiąca (Bretelle i Festoon). Pętla tłumiąca Bretelle wykona jest z fragmentu przewodu (identycznego z przewodem tłumionym), jako pętla z głębokim zwisem zamocowana z obu stron uchwytu łańcucha izolatora (rys. 2).



Rys. 2. Pętla tłumiąca Bretelle [7]

Pętla tłumiąca Festoon stosowana jest na wyjątkowo długich przęsłach. Wykonywana jest jako wielokrotność pętli Bretella, mocowanych symetrycznie z obu stron uchwytu łańcucha izolatora (rys. 3).

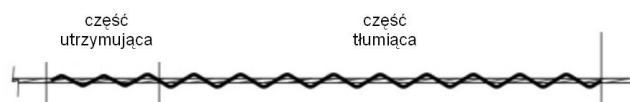


Rys. 3. Pętla tłumiąca Festoon [7]

Do powszechnie stosowanych urządzeń tłumiących należą tłumiki skrętne, spiralne, tłumiki Stockbridge i tłumiki Hydro-Qyebec oraz odstępniki stosowane na przewodach w wiązce.

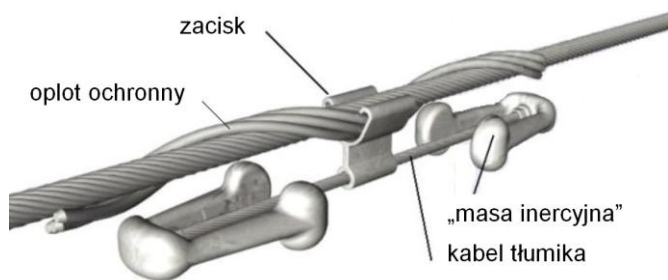
Tłumiki skrętne zwiększają tarcie wewnątrz splotu przewodu w następstwie ruchu skrętnego spowodowanego balansowaniem zewnętrznych ciężarków. Są one efektywne na średnicach kabli nieprzekraczających 12,5 mm, w wąskim zakresie częstości [8].

Tłumiki spiralne (rys. 4) stosowane są na przewodach o małych średnicach ≤ 19 mm, od przeszło 30-tu lat [1]. Wykonywane są z szorstkiego materiału (niemetalu) w formie spirali, o średnicy wewnętrznej większej niż średnica przewodu. Spirala na jednym końcu ciasno przylega do kabla (część utrzymująca). Podczas drgań eolskich część tłumiąca uderza w przewód i powoduje powstawanie impulsów, które tłumią drgania przewodu.



Rys. 4. Spiralny tłumik drgań

Tłumiki Stockbridge są najczęściej spotykanymi tłumikami na napowietrznych liniach elektroenergetycznych (rys. 5).



Rys. 5. Tłumik Stockbridge [9]

Klasyczny tłumik Stockbridge składa się z dwóch „mas inercyjnych” (metalowych ciężarków) zaciśniętych na końcach specjalnie zaprojektowanego krótkiego stalowego splotu drutów (kabela) podwieszono go za pomocą klamry do przewodu tłumionego. Energia drgań jest rozpraszana poprzez tarcie wywołane poślizgiem między drutami kabla. Gdy tłumik jest umieszczony na drgającym przewodzie pionowy ruch ciężarków wymusza zginanie kabla stalowego a zginanie to powoduje tarcie między drutami i w ten sposób energia jest rozpraszana. Rozmiar i kształt ciężarków oraz geometria tłumika mają wpływ na ilość energii rozpraszanej dla określonych częstotliwości drgań.

Udoskonalona wersja tłumika klasycznego (niesymetryczny tłumik Stockbridge) posiada dwa różne ciężarki, w kształcie dzwonka, umieszczone niesymetrycznie na końcach stalowego galwanizowanego kabla o możliwie najlepszej charakterystyce rozpraszania energii. Taka budowa tłumika podwaja liczbę pików rezonansowych z dwóch otrzymywanych przy klasycznej wersji tłumika Stockbridge do czterech w poprawionej wersji tłumika. Nowoczesne tłumiki Stockbridge są projektowane na efektywne przeniesienie i rozproszenie energii dla całego spektrum częstotliwości w zakresie drgań eolskich.

Kolejnym efektywnym tłumikiem jest tłumik Hydro-Qyebec. Ten rodzaj tłumika podobny jest w budowie do asymetrycznego tłumika Stockbridge. Różnica polega na zastąpieniu kabla z ciężarkami (jako elementu dysypującego) cylindrami elastomerowymi. Ze względu na wysoką odporność korozyjną tłumika stosuje się go głównie w środowisku sprzyjającym powstawaniu korozji (np. na wybrzeżach). Cylindry elastomerowe tłumika Hydro Quebec pracują głównie na ściskanie, co zapewnia jego wysoką trwałość.

Aby tłumienie było efektywne pierwszy tłumik powinien być umieszczony obok zamocowania (podwieszenia), wewnątrz najkrótszej pętli, która powstaje przy najwyższej prędkości wiatru (7 m/s) [1].

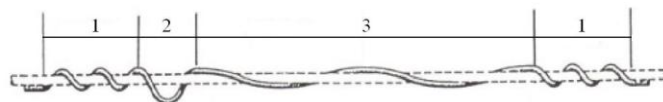


Rys. 6. Tłumik Hydro-Qyebec [10]

Aby nie dopuścić do nadmiernych drgań, występujących podczas zjawiska galopowania przewodów stosuje się następujące metody: metody topienia i usuwania lodu i mokrego śniegu, stosowanie materiałów hydrofobowych, sposoby zwiększające stabilność aerodynamiczną przewodu oraz stosowanie specjalnych urządzeń tłumiących.

Do popularnych urządzeń tłumiących zabezpieczających przewody przed galopowaniem należą: spoilery spiralne, odstępniki, odstępniki tłumiące i tłumiki wahadłowe [2].

Spoiler spiralny, jest prętem o przekroju kołowym, o średnicy zbliżonej do średnicy przewodu i długości od 4 do 5 metrów. Liczba owinięć przewodu prętem jest zależna od jego średnicy (dwa lub trzy owinięcia) (rys. 7).



Rys. 7. Spoiler spiralny, 1 – część utrzymująca, 2 – spirala dodatkowa, 3 – część tłumiąca

Na każdym przewodzie stosuje się kilka spojlerów, w celu zrównoważenia aerodynamicznych sił nośnych, które powodują galopowanie. Spoilery zwykle pokrywają około 25% długości przęsła i są stosowane w dwóch grupach. Spoilery spiralne są urządzeniami bardzo efektywnymi, zdolnymi do redukcji amplitudy drgań o około 40% [2].

Odstępnik tłumiący łączy funkcję utrzymywania odległości między przewodami, (przeciwdziała w ten sposób ich uszkodzeniom na skutek zderzeń) z funkcją tłumienia drgań. W zależności od układu przewodów w wiązce dostępne są różne rodzaje odstępników (rys. 8).



a)



b)



c)

Rys. 8. Typowe odstępniki tłumiące dla wiązki przewodów firmy Ribe Electrical Fittings GmbH: a) podwójny, b) potrójny, c) poczwórny [9]

Do kontroli galopowania przewodów stosuje się powszechnie odstępniki sztywne i sprężyste. Wczesne wersje odstępników sztywnych składały się z izolatorów ceramicznych połączonych aluminiową rurką i zamocowanych do przewodów podwieszeniem standardowym. Obecnie stosuje się lekkie izolatory polimerowe. Na rysunku 9 przedstawiono efektywny odstępnik tłumiący Hydro Quebec, składający się z dwóch polimerowych izolatorów połączonych aluminiowym cylindrem o regulowanej długości (zależnie od wymaganego rozstawu przewodów). W zależności od długości przęsła (na 1/3 lub 1/4 jego długości) instalowane są dwa lub cztery odstępniki, dzięki czemu osiągana jest maksymalna efektywność tłumienia kilku pierwszych postaci drgań własnych przewodów. Odstępniki tłumiące są urządzeniami redukującymi amplitudy drgań o około 30% [2].

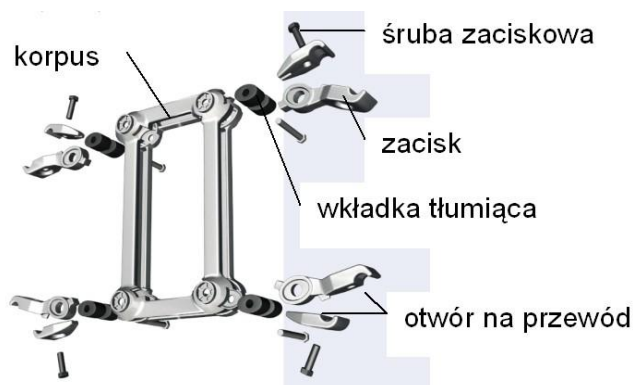


Rys. 9. Odstępnik tłumiący [10]

Nowoczesny odstępnik dla wiązki przewodów składa się ze sztywnej ramki aluminiowej (korpus) i kilku wysięgników (zacisków), których liczba określona jest liczbą przewodów w wiązce. Wysięgniki mocowane są do ramki za pomocą specjalnych połączeń sprężystych. Oprócz podstawowej funkcji utrzymania rozstawu między przewodami, tłumik ten zapewnia tłumienie drgań poprzez wpro-

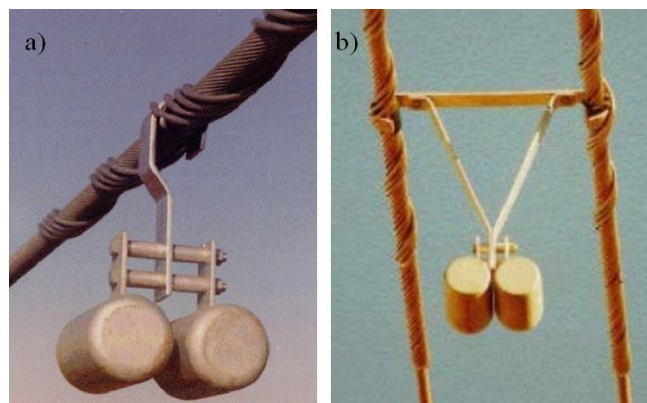
wienie wkładek tłumiących w połączeniach korpus-zacisk oraz służy do ograniczania naprężeń zginających i stąd do zmniejszenia odkształceń w przewodach wiązki.

Rysunek 10 przedstawia budowę odstępnika dla wiązki poczwórnej.



Rys. 10. Budowa typowego odstępnika tłumiącego dla wiązki czteroprzewodowej firmy Ribe Electrical Fittings [9]

Tłumik wahadłowy stosuje się dla przewodów pojedynczych i dla przewodów w wiązce (rys. 11). Typowa budowa tłumika to masa podwieszona do przewodu lub do wiązki przewodów. Długość ramienia oraz wielkość masy zależą głównie od średnicy przewodu i długości przęsła. Tłumik ten pracuje na zasadzie oddzielania częstotliwości drgań pionowych od częstotliwości drgań skrętnych. Redukuje on amplitudy drgań o około 65% dla pojedynczego przewodu i około 80% dla przewodów w wiązce. Instaluje się najczęściej od 3 do 4 tłumików na rozpiętości przęsła, stosując opłaty w celu zmniejszenia lokalnych naprężeń w przewodzie [2, 11].



Rys. 11. Tłumik wahadłowy a) na pojedynczym przewodzie, b) na wiązce dwuprzewodowej [2]

Tłumik skrętny z przestrajaczem (Tensional Damper and Detuner) jest nowoczesnym urządzeniem tłumiącym, łączym charakterystyki tłumienia skrętnego i przestrajania. Tłumik ten wykorzystuje ruch skrętny przewodu podczas galopowania do tłumienia drgań oraz podnosi dodatkowo swoją efektywność poprzez separację częstotliwości drgań pionowych od skrętnych, w podobny sposób jak w tłumiku wahadłowym. Tłumik skrętny (TDD) podwyższa wartość prędkości krytycznej wiatru, powyżej której występuje już galopowanie i ogranicza jego amplitudy. Tłumik redukuje amplitudy pionowe drgań o około 90%. Instaluje się najczęściej od 2 do 3 tłumików na rozpiętości przęsła [2, 11].



Rys. 12. Tłumik skrętny z przestrajaczen (TDD) [2]

PODSUMOWANIE

Drgania przewodów napowietrznych linii elektroenergetycznych, spowodowane wiatrem, mogą prowadzić do ich zniszczenia. Dlatego obniżenie poziomu tych drgań jest ważne ze względu na bezpieczeństwo całej konstrukcji. Powszechne sposoby minimalizacji drgań przewodów to metody pasywne: odpowiednie profilowanie powierzchni zewnętrznej przewodu, odpowiednia budowa przewodu (samotłumienie) oraz stosowanie specjalnych urządzeń tłumiących, w zależności od rodzaju wymuszenia.

Na dzień dzisiejszy nie ma sposobów całkowicie redukujących drgania zachodzące podczas zjawiska galopowania, dla którego amplitudy mogą osiągać duże wartości. Z przeprowadzonej analizy najbardziej efektywnym wydaje się być tłumik skrętny z przestrajaczem (TDD), z prawie 90% redukcją amplitud drgań.

BIBLIOGRAFIA

1. *Technical Report IEEE Power & Energy Society: An introductory discussion on Aeolian Vibration of Single Conductors*, 2015.
2. *State of the art of conductor galloping. A complementary document to "Transmission line reference book –Wind-induced conductor motion Chapter 4: Conductor galloping," Based on EPRI Research project 792. CIGRE ad hoc SC*, 2005.
3. Farzaneh M., *Atmospheric icing of power networks*. Springer 2008.
4. Luongo A., Zulli D., Piccardo G., *On the effect of twist angle on nonlinear galloping of suspended cables*. Computers and Structures 87 (15-16) pp. 1003-1014, 2009.
5. Xie K., Zhang Ch., Li Q., Wu W-L., Ni Y-Q.: *Tracking galloping profile of transmission lines using wireless inertial measurement units*. Journal of Computer and Communications, 3, 220-228, 2015.
6. <http://gltrs.grc.nasa.gov/reports/1999/TM-1999-209048.pdf>
Bundled Conductors Wake-Induced Vibration Modes in Parallel Conductors.
7. Knych T.: *Energetyczne przewody napowietrzne. Teoria materiały aplikacje*. Wydawnictwo AGH, 2010.
8. Dulhanty P.W., *Vibration Dampers – An Evolution in Australia*, <http://www.dulhanty.com/an1.html>, 2015.
9. Katalog: RIBE Electrical Fittings, RIBEVibration Dampers.

10. Katalog: Hydro Quebec Licensed Technology, Group technologie, 2010.
11. Vinogradov A., Iosif I.S., Jean-Louis L., *Highly efficient anti-galloping device TDD for transmission lines with bundled conductors-development, test, desin version. International Conference Energy Of Moldova*, 2012 (s. 223-228).

METHODS OF DAMPING OF OVERHEAD POWER LINES

Abstract

Cables are important components of overhead power lines. Cables have a small internal damping, low stiffness and low weight, so they are not capable of total energy force dissipation, hence can achieve a large vibration amplitude. Restricting the damage caused by the wind is very important not only because of the safety of the construction, but also for economic reasons. The paper briefly described some of the basic types forced cables' vibration caused by wind.

Vortex shedding, galloping were described and methods of reducing of vibration amplitudes of cables, commonly used in the world, were presented.

Autorzy:

dr hab. inż. **Irena Gołębiowska**, prof. UTP – 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.