

Badania modeli aeroelastycznych przewodów linii wysokiego napięcia dla różnych przypadków ich ośnieżenia i oblodzenia

Andrzej Flaga, Łukasz Flaga, Piotr Krajewski, Aleksander Pistol

*Wydział Inżynierii Lądowej Politechniki Krakowskiej
Laboratorium Inżynierii Wiatrowej Politechniki Krakowskiej
e-mail: liwpk@windlab.pl; lukasz.flaga@interia.pl; piotrekrajewski@gmail.com;
aleksander.pistol@pk.edu.pl*

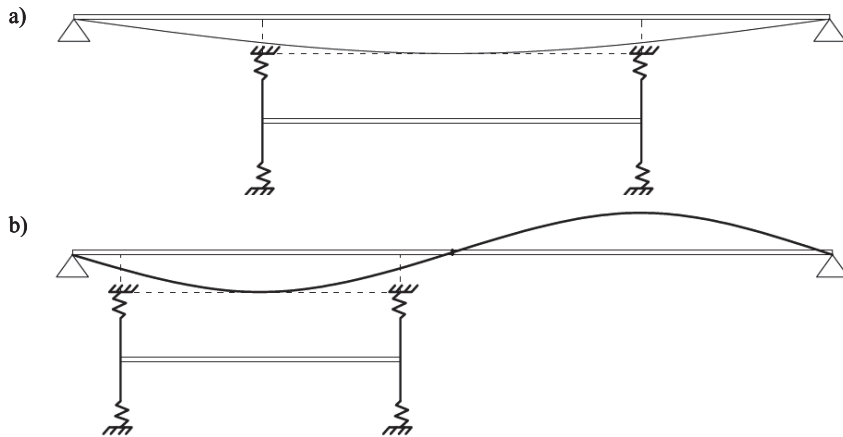
Streszczenie: W pierwszej części pracy wyprowadzono kryteria podobieństwa dla badań modeli aeroelastycznych odwzorowujących przewody linii wysokiego napięcia. Kryteria te uwzględniają drgania przewodów przy występowaniu zjawisk aeroelastycznych: wzbudzenia wirowego, galopowania oraz interferencji i drgania w śladzie aerodynamicznym innych przewodów. Druga część pracy przedstawia przeprowadzone w Laboratorium Inżynierii Wiatrowej Politechniki Krakowskiej badania modeli aeroelastycznych wiązki trzech przewodów linii wysokiego napięcia. Badania te miały na celu identyfikację drgań aeroelastycznych spowodowanych wzajemną interferencją przewodów, a w szczególności wyznaczenie prędkości krytycznej dla galopowania przewodów dla wybranych przypadków ośnieżenia i oblodzenia przewodów.

Słowa kluczowe: inżynieria wiatrowa; badania modelowe; model aeroelastyczny; linie wysokiego napięcia; oblodzenie; pokrywa śnieżna.

1. Podstawowe cechy modelu sekcyjnego przewodu linii napowietrznej

Ze względu na znaczne stosunki rozpiętości przewodów napowietrznych linii elektroenergetycznych do wymiarów ich przekrojów poprzecznych oraz względną niezmiennosc tych elementów na długości, w badaniach stosuje się tzw. modele sekcyjne. Powstają one z dowolnego wycinka przewodu na długości, w pewnej odległości od słupów, gdzie pomijalny jest wpływ samego zamocowania. Tego typu rozwiązanie wymaga jednak zastosowania specjalnych warunków brzegowych, które oddadzą wpływ zachowania pozostałej części przewodu w warunkach modelowych. Pozwala ono jednak na oddanie elementu w dużej skali w modelu, dzięki czemu łatwiej o spełnienie wymaganych kryteriów podobieństwa.

Model sekcyjny danego obiektu smukłego jest z reguły sztywnym elementem smukłym podpartym sprężystością na końcach, z dodanymi także na końcach elementami tłumiącymi drgania oraz tarczami eliminującymi w znacznej części niepożądane zaburzenia brzegowe. W analizowanym przypadku stopień swobody skrętnej przewodu jest mało istotny, stąd rozważany model powinien mieć dwa stopnie swobody dynamicznej umożliwiające drgania poprzeczne przewodu. Długość modelu sekcyjnego powinna być taka, aby jego dwie postaci drgań własnych poprzecznych niewiele odbiegały od dominujących w danym przypadku postaci drgań własnych rzeczywistego przewodu (por. rys. 1).



Rys. 1. Poglądowe przedstawienie postaci drgań własnych układu rzeczywistego i odpowiadających im modeli sekcyjnych: a) symetrycznej; b) antysymetrycznej

Rozważany model sekcyjny i -tego przewodu wiązki powinien umożliwić zbadanie następujących typów drgań przewodu:

- Drgania wzbudzone wirami o dominującej częstotliwości tych drgań f_i^v ;
- Drgania typu galopowania o dominującej częstotliwości tych drgań f_i^g ;
- Drgania w śladzie aerodynamicznym pozostałych przewodów wiązki o dominującej częstotliwości tych drgań f_i^s .

Wynika z tego, że sztywności sprężyn podpierających elastycznie końce modeli sekcyjnych trzech przewodów wiązki muszą mieć możliwość regulacji.

Ponadto powinien być wzięty pod uwagę fakt, że drgania odbywają się zawsze wokół tzw. położenia równowagi statycznej. Położenie równowagi statycznej przewodów jest uzależnione od oddziaływań statycznych (ciężar własny, oblodzenie, szadź, temperatura, napięcie wstępne) i quasi-statycznych (oddziaływanie średniego wiatru) tych przewodów. Także i z tego powodu parametry mechaniczne modeli przewodów danej wiązki powinny się zmieniać dla różnych kombinacji tych oddziaływań.

Przykładowo, gdy wiatr przemieści i -ty przewód, główne osie jego sztywności poprzecznej x_i^* i z_i^* będą obrócone względem osi x_i i z_i układu lokalnego przewodu o jakiś kąt β (por. rys. 2). Wówczas, zgodnie z tym rysunkiem, siły sprężyste wynikające z przemieszczeń przewodu ξ_i i ζ_i , odpowiednio w kierunkach x_i i z_i , wyniosą odpowiednio:

Przy przemieszczeniu więzy 1 o ξ_i :

$$S_{xi}^{\xi} = -2(k_{xi}^* \cos^2 \beta + k_{zi}^* \sin^2 \beta) \xi_i = -k_{xxi} \xi_i \quad (1)$$

$$S_{zi}^{\xi} = -2(k_{xi}^* \cos \beta \sin \beta - k_{zi}^* \cos \beta \sin \beta) \xi_i = -k_{zxi} \xi_i \quad (2)$$

Przy przemieszczeniu więzy 2 o ζ_i :

$$S_{xi}^{\zeta} = -2(k_{xi}^* \cos \beta \sin \beta - k_{zi}^* \cos \beta \sin \beta) \zeta_i = -k_{xzi} \zeta_i \quad (3)$$

$$S_{zi}^{\zeta} = -2(k_{xi}^* \sin^2 \beta + k_{zi}^* \cos^2 \beta) \zeta_i = -k_{zzi} \zeta_i \quad (4)$$

Przy łącznym przemieszczeniu obu więzów:

$$S_{xi} = S_{xi}^{\xi} + S_{xi}^{\zeta} = -k_{xxi}\xi_i - k_{xzi}\zeta_i \quad (5)$$

$$S_{zi} = S_{zi}^{\xi} + S_{zi}^{\zeta} = -k_{zxi}\xi_i - k_{zzi}\zeta_i \quad (6)$$

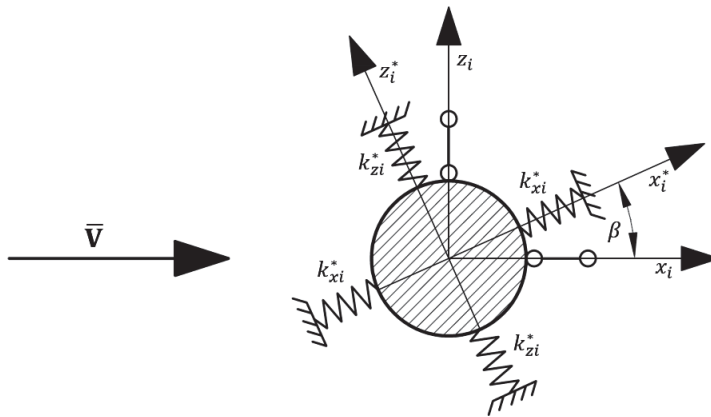
Stąd macierz sztywności \mathbf{K}_i rozważanego układu ma postać:

$$\mathbf{K}_i = 2 \begin{bmatrix} k_{xi}^* \cos^2 \beta + k_{zi}^* \sin^2 \beta; & (k_{xi}^* - k_{zi}^*) \cos \beta \sin \beta \\ (k_{xi}^* - k_{zi}^*) \cos \beta \sin \beta; & (k_{xi}^* \sin^2 \beta + k_{zi}^* \cos^2 \beta) \end{bmatrix} \quad (7)$$

Częstości kołowe drgań własnych ω_{xi}^* i ω_{zi}^* (lub częstotliwości f_{xi}^* i f_{zi}^*) układu jak na rys. 2 wyniosą odpowiednio:

$$\omega_{xi}^* = 2\pi f_{xi}^* = \sqrt{\frac{2k_{xi}^*}{m_i l_i}}, \quad \omega_{zi}^* = 2\pi f_{zi}^* = \sqrt{\frac{2k_{zi}^*}{m_i l_i}} \quad (8)$$

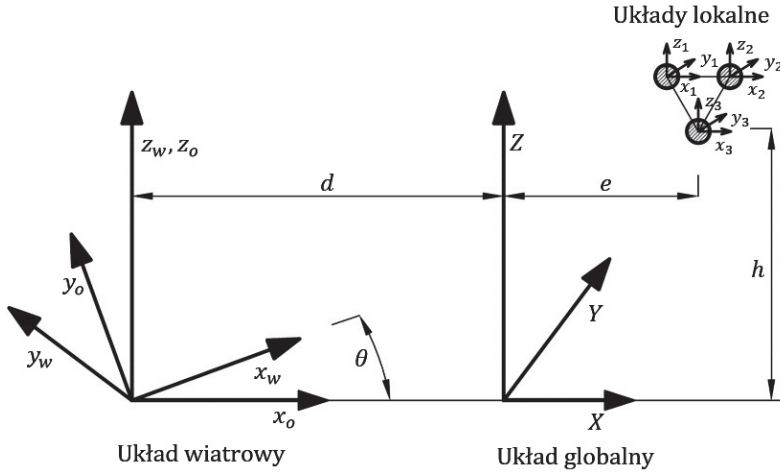
gdzie m_i – masa na jednostkę długości modelu i-tego przewodu, $l_i = l$ – długość modelu i-tego przewodu. Przyjmując jako dane wyjściowe ω_{xi}^* , ω_{zi}^* , m_i i l_i , można obliczyć z powyższych wzorów sztywności sprężyn k_{xi}^* i k_{zi}^* .



Rys. 2. Główne osie sztywności i-tego przewodu. Płaszczyzna $y_i^* z_i^*$ jest płaszczyzną zwisu przewodu

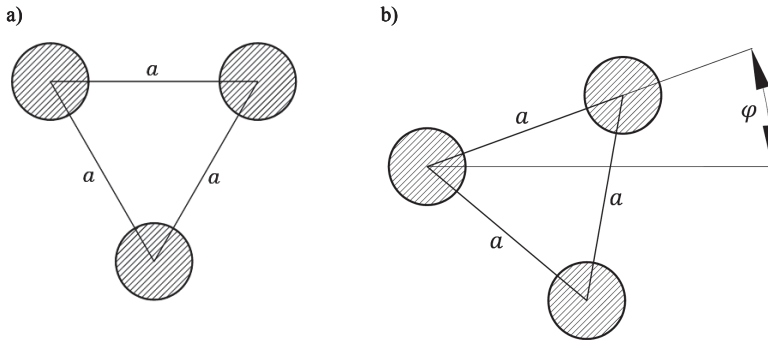
2. Zbiór współrzędnych i parametrów geometrycznych określających położenie punktów i geometrię wyjściową zagadnienia gdy chodzi o obiekt i wejście

Relacja między układami współrzędnych, tj. układem wiatrowym $x_w y_w z_w$ – używanym do opisu pola prędkości wiatru przed przewodami – układem globalnym XYZ – w którym opisuje się konfigurację początkową i aktualną badanego obiektu – i układami lokalnymi $x_i y_i z_i$; $i = 1, 2, 3$ – związanymi z konfiguracją poszczególnych przewodów – przedstawiono na rys. 3.



Rys. 3. Relacje między układami współrzędnych

Najczęściej rozważa się przypadek, gdy: $a = b = c$, przy czym możliwe są dwie racjonalne sytuacje przedstawione na rys. 4: wiązka nieobrócona i wiązka obrócona o kąt φ w płaszczyźnie XZ .



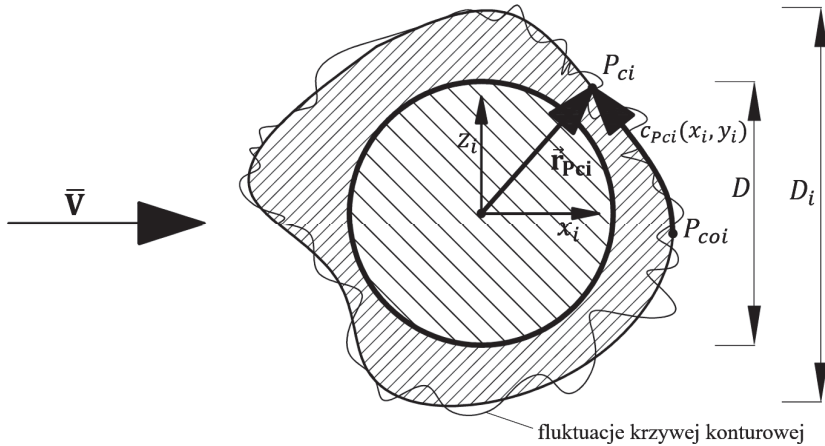
Rys. 4. Dwie sytuacje usytuowania wiązki przewodów: a) wiązka nieobrócona; b) wiązka obrócona

Współrzedną krzywoliniową $c_i(x_i, z_i)$ opisującą uśredniony kontur przekroju poprzecznego przewodu oraz rzeczywiste fluktuacje krzywej konturowej, jak również charakterystyczny wymiar przekroju poprzecznego przewodu D_i , przedstawia rys. 5. Zewnętrzny kontur i wymiar charakterystyczny przekroju poprzecznego przewodu bez oblodzenia czy szadzi tj. D jest oczywiście inny niż w przypadku jego oblodzenia czy pokrycia szadzią, tj. D_i .

Miarą fluktuacji rzeczywistej krzywej konturowej c_{ri} wokół uśrednionej krzywej konturowej c_i może być bezwymiarowy parametr szorstkości powierzchni zewnętrznej przewodu k_{ri} zdefiniowany jako:

$$k_{ri} = \frac{\sigma_{cri}}{D} \quad (9)$$

gdzie: σ_{cri} – odchylenie standardowe fluktuacji krzywej wokół krzywej.



Rys. 5. Wymiar charakterystyczny D_i , krzywa konturowa uśredniona i z fluktuacjami przekroju poprzecznego przewodu oraz współrzędna krzywoliniowa $c_{P_{ci}}$ i wektor wodzący $\vec{r}_{P_{ci}}$ dowolnego punktu P_{ci} uśrednionej krzywej konturowej c

3. Zbiory najważniejszych wielkości fizycznych i geometrycznych (zmiennych niezależnych i zależnych oraz parametrów), które należy uwzględnić w opisie i badaniach analizowanego zagadnienia

- Zbiór wielkości wejściowych opisujących napływające powietrze:

$$W = \{\rho, \nu, V, I_v, \theta\} \quad (10)$$

gdzie: ρ – gęstość powietrza atmosferycznego (w przybliżeniu $\rho = 1,25 \frac{kg}{m^3}$); ν – lepkość kinematyczna powietrza; V – prędkość średnia, referencyjna (odniesienia) wiatru na wysokości przewodu h , która może być opisana wzorem potęgowym:

$$V = V(h) = V(10) \left(\frac{h}{10} \right)^\alpha \quad (11)$$

gdzie: α – wykładnik w prawie potęgowym pionowego profilu wiatru zależny od kategorii chropowatości terenu; I_v – intensywność turbulencji na wysokości nad terenem; θ – średni kąt natarcia wiatru;

- Zbiór współrzędnych przestrzenno-czasowych i wielkości geometrycznych

$$G = \{x, y, z, \theta; X, Y, Z; x_i, y_i, z_i; c_i; d, e, h; a, b, c, \varphi; D, D_i, k_{r,i}; t\}; \quad i = 1,2,3 \quad (12)$$

gdzie: t – czas, natomiast pozostałe wielkości opisano wcześniej;

- Zbiór wielkości mechanicznych charakteryzujących badany obiekt, tj. wiązkę przewodów

$$O = \{m_i, f_{x_i}^*, f_{z_i}^*, \beta, \gamma_{x_i}^*, \gamma_{z_i}^*; l\}; \quad i = 1,2,3 \quad (13)$$

gdzie: m_i – masa na jednostkę długości przewodu; f_{xi}^*, f_{zi}^* – częstotliwości drgań własnych dominujących w badaniach określonych drgań wymuszonych (wzbudzenie wirowe, galopowanie, interferencja w śladzie aerodynamicznym); β – kąt obrotu płaszczyzny zwisu cięga przy oddziaływaniu quasi-statycznym wiatru; $\gamma_{xi}^*, \gamma_{zi}^*$ – stopnie tłumienia (ułamki tłumienia krytycznego) w badaniach określonych drgań wymuszonych); l – długość modelu;

– Zbiór wielkości wyjściowych

$$\{OU\} = \{\xi_i, \zeta_i; \dot{\xi}_i, \dot{\zeta}_i; \ddot{\xi}_i, \ddot{\zeta}_i\}; i = 1, 2, 3 \quad (14)$$

gdzie: $\xi_i, \zeta_i; \dot{\xi}_i, \dot{\zeta}_i; \ddot{\xi}_i, \ddot{\zeta}_i$ – składowe odpowiednio przemieszczeń, prędkości i przyspieszeń badanych drgań przewodów.

W powyższych zbiorach różnych wielkości fizycznych czy geometrycznych, kilka z nich jest już wielkościami bezwymiarowymi, tj.: wszystkie kąty wyrażone w radianach (θ, φ, β); współczynnik szorstkości powierzchni (k_{ri}); współczynniki tłumienia ($\gamma_{xi}^*, \gamma_{zi}^*$), intensywność turbulencji (I_v) i współczynnik chropowatości terenu (α). Jako takie stanowią kryteria podobieństwa analizowanego zagadnienia.

4. Baza wymiarowa i kryteria podobieństwa dla pozostałych wielkości fizycznych i geometrycznych

Jako bazę wymiarową zagadnienia przyjęto zbiór trzech następujących wielkości:

$$B = \{\rho, V, D\} \quad (15)$$

gdzie: D – średnica nominalna przewodu nieoblodzonego.

Z pozostałych wielkości wymiarowych występujących w przedstawionych wcześniej zbiorach można utworzyć następujące wielkości bezwymiarowe:

– Liczba Reynoldsa:

$$Re = \frac{VD}{\nu} \quad (16)$$

– Bezwymiarowe współrzędne i bezwymiarowe parametry geometryczne:

$$\check{x} = \frac{x}{D}; \check{y} = \frac{y}{D}; \check{z} = \frac{z}{D} \quad (17)$$

$$\check{X} = \frac{X}{D}; \check{Y} = \frac{Y}{D}; \check{Z} = \frac{Z}{D} \quad (18)$$

$$\check{x}_i = \frac{x_i}{D}; \check{y}_i = \frac{y_i}{D}; \check{z}_i = \frac{z_i}{D} \quad (19)$$

$$\check{c}_i = \frac{c_i}{D} \quad (20)$$

$$\check{d} = \frac{d}{D}; \check{e} = \frac{e}{D}; \check{h} = \frac{h}{D}; \check{\alpha} = \frac{\alpha}{D}; \quad (21)$$

$$\check{D}_i = \frac{D_i}{D} \quad (22)$$

– Czas bezwymiarowy

$$\check{t} = \frac{V}{D} t \quad (23)$$

– Bezwymiarowy parametr masy

$$M_{\rho i} = \frac{\rho D^2}{2m_i} \quad (24)$$

– Kinematyczne liczby Strouhala

$$St_{xi}^* = \frac{f_{xi}^* D}{V}; \quad St_{zi}^* = \frac{f_{zi}^* D}{V} \quad (25)$$

– Smukłość modelu

$$\lambda = \frac{l}{D} \quad (26)$$

Bezwymiarowe wielkości wyjścia

$$\check{\xi}_i = \frac{\xi_i}{D}; \quad \check{\xi}_i = \frac{\dot{\xi}_i}{V}; \quad \check{\xi}_i = \frac{\ddot{\xi}_i D}{V^2} \quad (27)$$

$$\check{\zeta}_i = \frac{\zeta_i}{D}; \quad \check{\zeta}_i = \frac{\dot{\zeta}_i}{V}; \quad \check{\zeta}_i = \frac{\ddot{\zeta}_i D}{V^2} \quad (28)$$

Z uogólnionego twierdzenia analizy wymiarowej i teorii podobieństwa zjawisk fizycznych wynika, że (por. [3], [4], [9], [10]), że przy spełnieniu kryteriów podobieństwa dotyczących wielkości wejściowych IN i obiektu O pomierzone w badaniach modelowych wielkości bezwymiarowe wyjścia OU powinny być – przy uczynionych założeniach upraszczających odnośnie samego modelu – takie same jak w badaniach w skali naturalnej.

5. Skale podobieństwa analizowanego zagadnienia i problemy ich spełnienia

Z liczb kryterialnych wynikają określone skale podobieństwa wielkości fizycznych czy geometrycznych występujących w tych liczbach kryterialnych. Ponieważ baza wymiarowa jest tu trójelementowa – niezależnych skali podobieństwa jest również trzy.

Skale podobieństwa pozostałych wielkości wymiarowych zależą od skali podobieństwa trzech wybranych wielkości bazowych, które mogą stanowić bazę wymiarową. Rozważmy to zagadnienie bardziej szczegółowo. Skalę dowolnej wielkości oznaczono dalej k_q .

– Relacje dla skali podobieństwa wynikające z liczby Reynoldsa Re :

$$k_V k_D k_\nu = 1$$

Ponieważ w badaniach $k_V = 1$, więc:

$$k_V k_D = 1; k_V = k_D^{-1} \quad (29)$$

– Relacje dla skali podobieństwa wynikające z bezwymiarowych wielkości geometrycznych:

$$k_x k_D^{-1} = 1; k_x = k_D; \dots; k_{ci} k_D^{-1} = 1; k_c = k_D; k_L = k_D; k_{Di} = k_D \quad (30)$$

W dalszych rozważaniach zakłada się, że model obiektu jest podobny geometrycznie do obiektu rzeczywistego, czyli wszystkie skale podobieństwa geometrycznego są spełnione.

– Relacje dla skali podobieństwa wynikające z bezwymiarowego czasu \check{t} :

$$k_V k_t k_D^{-1} = 1; k_t = \frac{k_D}{k_V} \quad (31)$$

– Relacje dla skali podobieństwa wynikające z bezwymiarowego parametru masy $M_{\rho i}$:

$$k_\rho k_D^2 k_{mi}^{-1} = 1; k_{mi} = k_\rho k_D^2 \quad (32)$$

Ponieważ w badaniach $k_\rho = 1$, więc:

$$k_{mi} = k_D^2 \quad (33)$$

Relacje dla skali podobieństwa wynikające z kinematycznych liczb Strouhala St_{xi}^* i St_{zi}^* :

$$k_{f_{xi}}^* k_D k_V^{-1} = 1; k_{f_{xi}}^* = k_V k_D^{-1} \quad (34)$$

$$k_{f_{zi}}^* k_D k_V^{-1} = 1; k_{f_{zi}}^* = k_V k_D^{-1} \quad (35)$$

Relacje dla skali podobieństwa wynikające z bezwymiarowych wielkości wyjścia:

$$k_{\xi i} k_D^{-1} = 1; k_{\xi i} = k_D; k_{\zeta i} = k_D \quad (36)$$

$$k_{\xi i}^* k_V^{-1} = 1; k_{\xi i}^* = k_V; k_{\zeta i} = k_V \quad (37)$$

$$k_{\xi i} k_D k_V^{-2} = 1; k_{\xi i} = k_V^2 k_D^{-1}; k_{\zeta i} = k_V^2 k_D^{-1} \quad (38)$$

Ponieważ przyjęto już dwie skale wielkości wymiarowej, a mianowicie $k_\rho = 1$, $k_V = 1$, można więc przyjąć dowolnie jeszcze jedną skalę podobieństwa np. k_D . Pozostałe skale podobieństwa będą uzależnione od tych trzech. Rozważmy dwa przypadki szczególne skali podobieństwa geometrycznego k_D :

– Przypadek 1: $k_D = 1$

Z kryteriów podobieństwa wynika, że teoretycznie rzecz biorąc pozostałe skale podobieństwa powinny też być równe jedności.

– Przypadek 2: $k_D \neq 1$ (np. $k_D = 2$).

Wówczas będzie:

$$k_V = k_D^{-1} \quad (k_V = 0,5)$$

$$k_t = k_D k_V^{-1} = k_D^2 \quad (k_t = 4)$$

$$k_{mi} = k_D^2 \quad (k_{mi} = 4)$$

$$k_{fxi}^* = k_{fzi}^* = k_V k_D^{-1} = k_D^{-2} \quad (k_{fxi}^* = k_{fzi}^* = 0,25)$$

$$k_{\xi i} = k_{\zeta i} = k_D \quad (k_{\xi i} = k_{\zeta i} = 2)$$

$$k_{\xi i} = k_{\zeta i} = k_V \quad (k_{\xi i} = k_{\zeta i} = 0,5)$$

$$k_{\xi i} = k_{\zeta i} = k_V^2 k_D^{-1} = k_D^{-3} \quad \left(k_{\xi i} = k_{\zeta i} = \frac{1}{8} \right)$$

Współczynniki aerodynamiczne sił i momentu aerodynamicznego – a stąd i same siły i moment aerodynamiczny działające na przewody wiązki – w ogólności jak wiadomo mogą zależeć od liczby Reynoldsa Re . W rozważanym przypadku jest to przedział zakresu podkrytycznego liczby Re znajdujący się dużo poniżej tzw. zakresu krytycznego i oczywiście nadkrytycznego tej liczby. W rozpatrywanym przedziale zakresu podkrytycznego można z dobrym przybliżeniem założyć, że wartości oddziaływań aerodynamicznych na przewody wiązki nie zmieniają się przy zmianie wartości liczby Re w tym przedziale. Zatem niekoniecznie trzeba respektować kryterium i skalę podobieństwa wynikające z tej liczby. Można więc założyć arbitralnie skalę podobieństwa $k_D = 1$ i $k_V \neq 1$ i rozpatrzeć trzeci przypadek pozostałych skali podobieństwa:

– Przypadek 3: $k_D = 1$ i $k_V \neq 1$ ($k_V \neq k_D^{-1}$ np. $k_D = 1$, $k_V = 0,5$)

Wówczas będzie:

$$k_t = k_D k_V^{-1} \quad (k_t = 2)$$

$$k_{mi} = k_D^2 \quad (k_{mi} = 1)$$

$$k_{fxi}^* = k_{fzi}^* = k_V k_D^{-1} = k_D^{-2} \quad (k_{fxi}^* = k_{fzi}^* = 0,5)$$

$$k_{\xi i} = k_{\zeta i} = k_D \quad (k_{\xi i} = k_{\zeta i} = 1)$$

$$k_{\xi i} = k_{\zeta i} = k_V \quad (k_{\xi i} = k_{\zeta i} = 0,5)$$

$$k_{\xi i} = k_{\zeta i} = k_V^2 k_D^{-1} = k_D^{-3} \quad (k_{\xi i} = k_{\zeta i} = 0,25)$$

Warto tu z naciskiem podkreślić, że wszystkie pozostałe skale podobieństwa związane z wielkościami bezwymiarowymi występującymi w zbiorach wielkości charakteryzujących analizowane zagadnienie (zjawisko fizyczne) powinny być równe jedności.

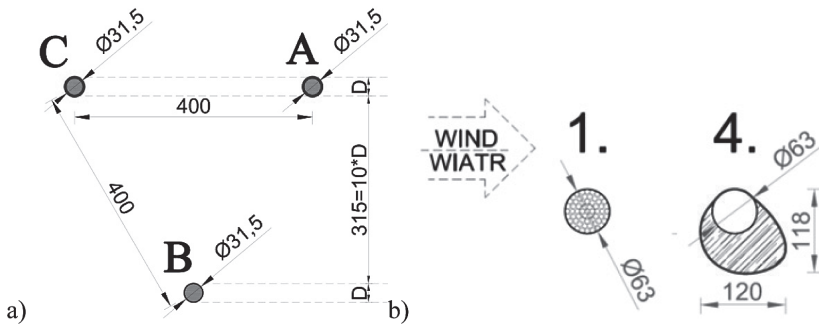
6. Szczegółowy opis modelu aeroelastycznego

Aeroelastyczny model sekcyjny składa się z trzech przewodów. Ich układ pokazano na rys. 6a i 7. Podstawę każdego z modeli stanowi rura aluminiowa o średnicy 30 mm i grubości ścianki 2 mm. W celu odwzorowania dynamicznego zachowania wiązki przewodów, końce rur zostały podwieszane sprężysto przy pomocy systemu sprężyn i linek stalowych o grubości

0.6 mm (por. rys. 8 i rys. 9). Każda z linek przechodziła przez jedną rolę o bardzo niskim współczynniku tarcia w celu wyeliminowania ich wzajemnej kolizji (por. rys. 9a). Przemieszczenia przewodów wzdłuż ich osi podłużnej (osi z) zostały ograniczone przy pomocy dysków. W celu zminimalizowania wpływu uderzania przewodów o te dyski zastosowano tłumiki z miękkiej gąbki zakończone elementem punktowym oraz dyski o bardzo niskim współczynniku tarcia (por. rys. 9c).

Ze względu na bardzo wysoki stopień złożoności badań aeroelastycznych, w badaniach uwzględniono dwa przekroje przewodów, zestawione na rys. 6b: podstawowego przewodu bez wpływu czynników atmosferycznych (przypadek 1) oraz przewodu pokrytego grubą powłoką śnieżną nagromadzoną na skutek silnych wiatrów powodujących obrót przewodu wokół jego osi podłużnej (przypadek 4). Przypadek 1 wybrano jako podstawowy, a przypadek 4 jako potencjalnie najbardziej niestabilny aerodynamicznie.

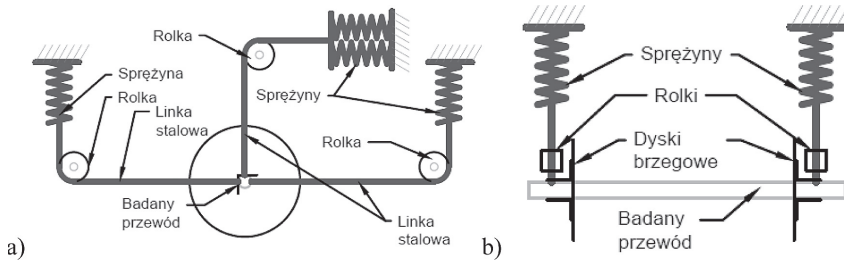
Na końcu każdego modelu sekcyjnego zamontowano okrągłe tarcze w celu redukcji wpływu zaburzeń brzegowych (por. rys. 8a i rys. 9b). Parametry modeli aeroelastycznych oraz warunki, w jakich przeprowadzono badania, zostały ustalone na podstawie wyprawdzonych kryteriów podobieństwa.



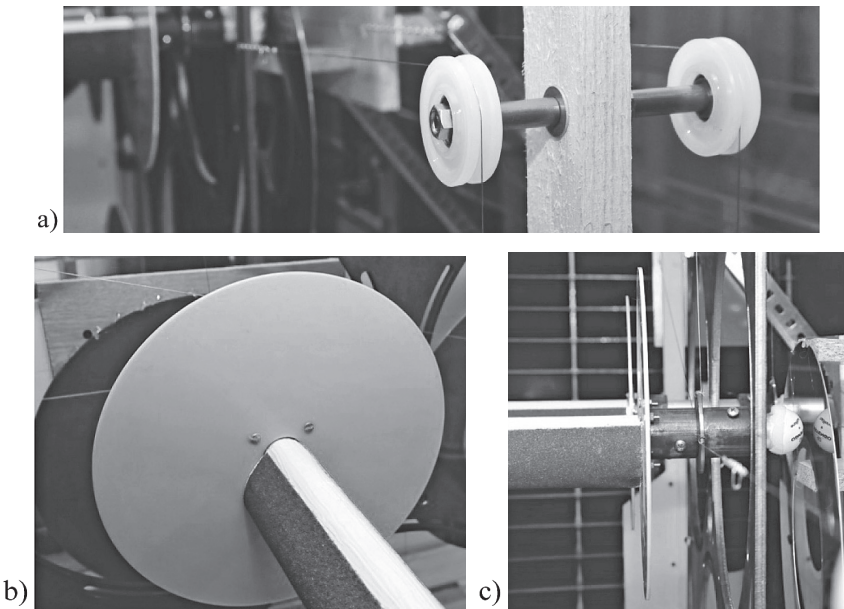
Rys. 6. Schemat wiązki przewodów i typów przekrojów: a) rzeczywiste wymiary wiązki [mm]; b) uwzględnione w badaniach typy przekrojów przewodów (wymiar w [mm])



Rys. 7. Sekcyjny model aeroelastyczny w przestrzeni pomiarowej tunelu aerodynamicznego



Rys. 8. Schemat zamocowania przewodów: a) widok z boku; b) widok z przodu



Rys. 9. Detale modelu aeroelastycznego: a) rolka z naciągniętą linką; b) okrągły dysk brzegowy; c) element tłumiący zamocowany na obu końcach każdego z prętów (opisy w tekście)

7. Opis przeprowadzenia badań modeli aeroelastycznych

Składowe drgań przewodów w kierunku wiatru x oraz w kierunku pionowym poprzecznym do napływu wiatru y zostały zmierzone przy pomocy laserowych czujników odległości. Ustawienie tych czujników pozwalało na jednoczesne pomiary przemieszczeń końców przewodów A i C w kierunkach pionowym i poziomym. Wszystkie pomiary drgań zostały przeprowadzone przy ustalonym przepływie powietrza. Czas pojedynczego pomiaru wynosił 40 sekund.

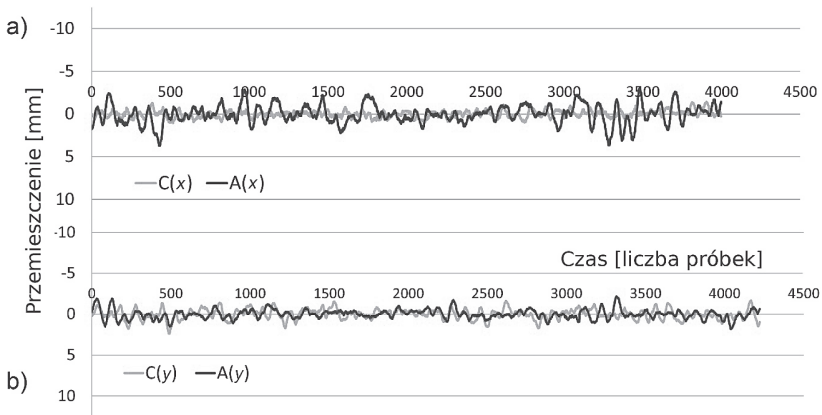
Pierwsza seria badań aeroelastycznych miała na celu wyznaczenie częstotliwości drgań własnych przewodów. Pomiary zostały przeprowadzone przy zerowej prędkości wiatru. Mierzono drgania po impulsowym wzbudzeniu przewodów. Po analizie sygnału za pomocą transformaty Fouriera częstotliwości własne przewodów oszacowano jako $f = \text{Hz}$.

Dla przypadku 1, pomiar przemieszczeń został przeprowadzony przy średnich prędkościach wiatru w zakresie $\bar{v} = 8,0 \div 16,0 \text{ m/s}$ z krokiem 1 m/s . Prędkości powyżej

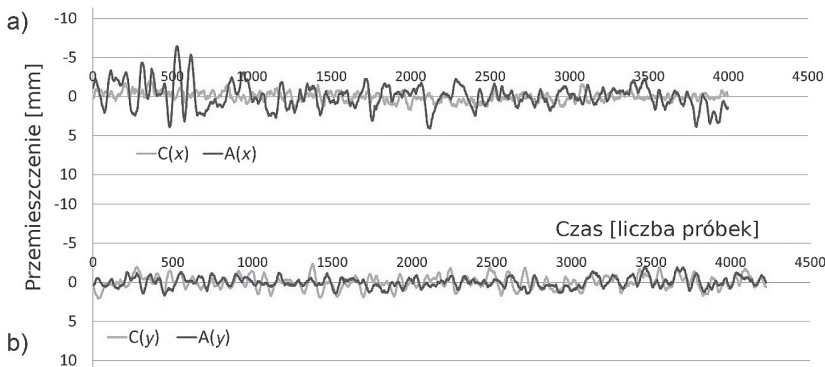
powodowały przemieszczenia wykraczające poza maksymalny zakres aparatury pomiarowej, stąd zaprzestano dalszego zwiększania prędkości. Porównania przemieszczeń przewodów 1A i 1C w kierunkach x i y przy prędkościach $\bar{v} = 9,0$ m/s i $\bar{v} = 11,0$ m/s zestawiono na rys. 10 i rys. 11.

Dla przypadku 4 przemieszczenia zostały zmierzone dla zakresu prędkości wiatru $\bar{v} = 7,0 \div 17,0$ m/s z krokiem 1 m/s. Prędkości powyżej 17,0 m/s powodowały przemieszczenia wykraczające poza maksymalny zakres aparatury pomiarowej, stąd zaprzestano dalszego zwiększania prędkości.

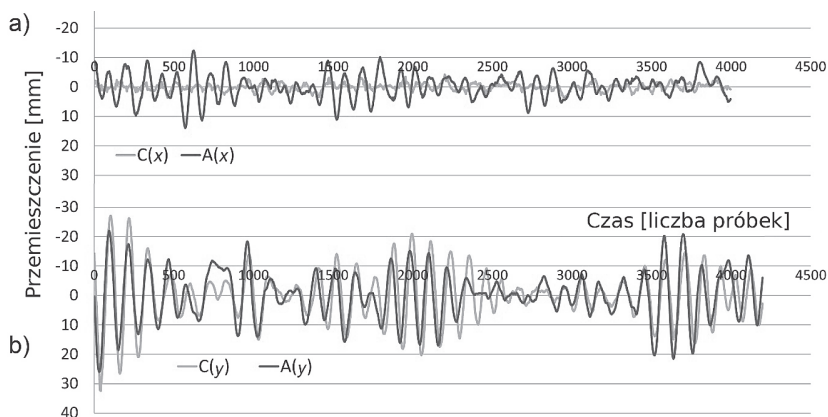
Podczas badań zaobserwowano wyraźne zjawisko galopowania przewodów przy prędkościach zbliżonych do 9,0 m/s. W związku z tym przeprowadzono dodatkowe badania dla prędkości 7,5 m/s, 8,5 m/s oraz 9,5 m/s. Porównania przemieszczeń przewodów 4A i 4C w kierunkach x i y przy prędkościach $\bar{v} = 9,5$ m/s i $\bar{v} = 11,0$ m/s zestawiono na rys. 12 i rys. 13.



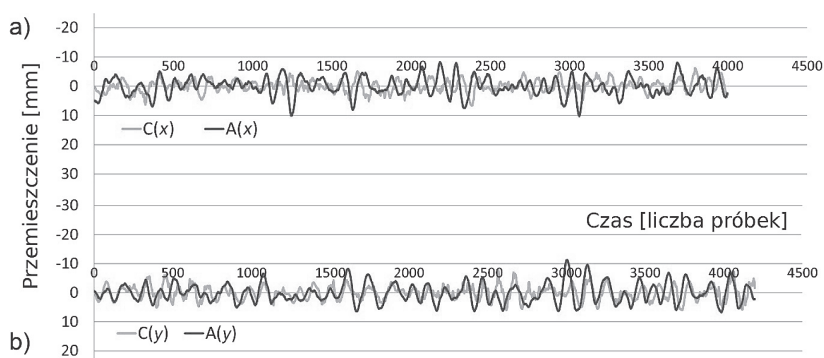
Rys. 10. Porównanie przemieszczeń przewodów 1A i 1C przy prędkości wiatru $\bar{v} = 9,0$ m/s: a) w kierunku x ; b) w kierunku y



Rys. 11. Porównanie przemieszczeń przewodów 1A i 1C przy prędkości wiatru $\bar{v} = 11,0$ m/s: a) w kierunku x ; b) w kierunku y



Rys. 12. Porównanie przemieszczeń przewodów 4A i 4C przy prędkości wiatru $\bar{v} = 9,5$ m/s: a) w kierunku x ; b) w kierunku y



Rys. 13. Porównanie przemieszczeń przewodów 4A i 4C przy prędkości wiatru $\bar{v} = 11,0$ m/s: a) w kierunku x ; b) w kierunku y

8. Analiza wyników badań modeli aeroelastycznych

Na podstawie porównania przemieszczeń sekcyjnych modeli aeroelastycznych przewodów 1A i 1C oraz przewodów 4A i 4C, sformułować można następujące wnioski:

1. Przypadek 1 dla przewodów A i C:

- Dla średnich prędkości wiatru w zakresie $\bar{v} = 8,0 \div 16,0$ m/s nie zaobserwowano zjawiska galopowania przewodów;
- Przemieszczenia przewodu 1A były znacznie większe niż przewodu 1C – to charakterystyczna oznaka buffetingu;
- Drgania nie wykazywały oznak okresowości. Szybka transformata Fouriera pokazała, że drgania miały przebieg nieustalony;
- Prędkości wiatru powyżej 16,0 m/s powodowały przemieszczenia przewodów wykraczające poza maksymalny zakres aparatury pomiarowej. Z tego powodu zaprzestano dalszych badań.

2. Przypadek 4 dla przewodów A i C:
 - Dla średnich prędkości wiatru w zakresie $\bar{v} = 7,0 \div 15,0$ m/s zaobserwowano zjawisko galopowania przewodów. Dotyczyło ono drgań pionowych (wzdłuż osi y), zaś jego szczególne nasilenie zaobserwowano dla zakresu prędkości $\bar{v} = 8,5 \div 9,5$ m/s. Z tego powodu prędkość $\bar{v} = 9,0$ m/s może być uznana za prędkość krytyczną dla tego zjawiska;
 - Wykresy przemieszczeń dla prędkości $\bar{v} = 15,0$ m/s również pokazują ich wzajemną korelację. Amplituda drgań jest jednak o wiele niższa niż w przypadku prędkości krytycznej.
3. Porównanie wyników dla przewodów A i C przed i po powstaniu pokrywy lodowo-śniegowej:
 - Pokrycie śniegiem lub lodem przewodów może drastycznie zmienić ich charakterystyki aerodynamiczne. Narastanie oblodzenia może sprawić, że cała wiązka przewodów stanie się niestabilna dynamicznie. Problem ten powinien być brany pod uwagę podczas projektowania energetycznych linii napowietrznych;
 - Dla przypadku 1 maksymalna amplituda drgań spowodowanych buffetingiem wyniosła 10 mm. Na skutek powstania pokrywy lodowej (przypadek 4), wartość ta wzrosła do ponad 30 mm. Można zatem zauważyć, że narastanie pokrywy lodowej prowadzi również do wzrostu maksymalnej amplitudy drgań.

9. Wnioski generalne i podsumowanie badań aeroelastycznych

Uzyskanie podczas badań laboratoryjnych na modelach sekcyjnych wiązki przewodów postaci i częstotliwości drgań odpowiadających rzeczywistym przewodom jest zadaniem niezwykle trudnym i pracochłonnym. Przeprowadzone badania pokazują, że różne zjawiska interferencji aeroelastycznej są możliwe do przewidzenia na podstawie badań tunelowych.

Zjawisko narastania śnieżno-lodowej pokrywy na przewodach znacznie wpływa na ich aerodynamiczne i aeroelastyczne charakterystyki, a w konsekwencji na bezpieczeństwo linii energetycznych. W związku z tym konieczne są dalsze, bardziej szczegółowe badania tego typu zjawisk. Takie badania powinny mieć na celu wyznaczenie możliwości pojawiania się zjawisk interferencji aeroelastycznych i prędkości krytycznej, przy której do nich dochodzi. Zakres tych badań powinien dotyczyć różnych częstotliwości drgań własnych przypadków oblodzenia przewodów oraz różnych prędkości średnich napływającego powietrza.

Porównanie wyników uzyskanych dla przewodów nawietrznych i zawietrznych potwierdza wcześniejsze przypuszczenia, że bardziej wrażliwe na zjawiska aeroelastyczne towarzyszące oblodzeniu i osnieżeniu przewodów są przewody zawietrzne.

Podziękowania

Ten artykuł powstał dzięki wsparciu finansowemu z program GEKON, grant Nr GEKON1/O2/214108/19/2014.

Literatura

- [1] Cosmai U., Van Dyke P., Mazzola L., Lillien J. *Conductor motions – Chapter 10*. Reference Work CIGRE Green Books, Francja 2014.
- [2] Farzaneh M. *Atmospheric icing of power networks*. (Ed.) Université du Québec à Chicoutimi, Kanada 2008.

- [3] Flaga A. *Inżynieria wiatrowa. Podstawy i zastosowania*. Arkady, Warszawa 2008.
- [4] Flaga A. *Basic principles and theorems of dimensional analysis and theory of model similarity of physical phenomena*. 7th International Symposium on Environmental Effects on Buildings and People: Actions, Influences, Interactions, Discomfort, Book of Keynote Lectures and Abstracts p. 49–62, 20–22 October, Cracow, 2014.
- [5] Hardy C. *Overhead conductor safe design tension with respect to aeolian vibrations*. Task Force B2.11.04 CIGRÉ 2005, IEEE/TPC Meeting Atlanta, January 2009 by Dave Havard.
- [6] Kiessling F., Nefzger P., Nolasco J.F., Kaintzyk U. *Conductor vibrations. Overhead power lines: planning, design, construction*. Springer-Verlag, Berlin Heidelberg 2003.
- [7] Lillien J. *State of the art of conductor galloping – A complementary document to transmission line reference book – wind-induced conductor motion, Chapter 4: Conductor galloping*, Technical Brochure CIGRE N° 322, Based on EPRI Research Project 792. Task Force B2.11.06, Francja 2007.
- [8] Mellor M. *Cold regions science and engineering Part III*, Section A3c: Blowing Snow. Cold Regions Research & Engineering Laboratory, Hanover New Hampshire 1965.
- [9] Siedov L.I. *Similarity and dimensional analysis in mechanics*. Academic Press, New York, USA, 1959.
- [10] Sonin A.A. *The physical basis of dimensional analysis*. Department of Mechanical Engineering MIT, Cambridge, UK, 2001.

Materiały wykorzystane w pracy

- [11] PN-EN 1991-1-4 *Oddziaływania na konstrukcje. Część 1–4. Oddziaływania ogólne - Oddziaływania wiatru*.
- [12] Raport Enion S.A. nt. sytuacji w zakresie dostaw energii elektrycznej na terenie Małopolski w związku z sytuacją pogodową w dniach 8.–25. stycznia 2010 r.

Wind tunnel tests of aeroelastic models of overhead transmission lines under different snow and ice covers

Andrzej Flaga, Łukasz Flaga, Piotr Krajewski, Aleksander Pistol

*Wydział Inżynierii Lądowej Politechniki Krakowskiej
Laboratorium Inżynierii Wiatrowej Politechniki Krakowskiej
e-mail: liwpk@windlab.pl; lukasz.flaga@interia.pl;
piotrekrajewski@gmail.com; aleksander.pistol@pk.edu.pl*

Abstract: In the first part of this paper, similarity criteria were elaborated for investigations of aeroelastic sectional models of high voltage line wires. These criteria consider wire vibrations caused by aeroelastic phenomena: vortex excitation, wake galloping and interference between the wires causing vibration in aerodynamic trace of other wires. Second part of the paper describes the tests conducted in Wind Engineering Laboratory of Cracow University of Technology. The subject of this set of tests was identification of aeroelastic vibrations caused by aeroelastic interference of wires, mainly determination of critical velocity of wires galloping and wake galloping for selected cases of snow and ice covers on the wires.

Keywords: wind engineering; model tests; aerodynamic model; transmission lines; icing; snow cover.

