

Analiza mechaniki przewodów w napowietrznych liniach elektroenergetycznych z wykorzystaniem komputerowych narzędzi obliczeniowych

Streszczenie. W artykule omówiono algorytmy służące do obliczeń naciągów i zwisów przewodów roboczych w wieloprzęsłowych sekcjach odciągowych linii napowietrznych wysokiego napięcia. Przedstawiono metodę przęsła zastępczego oraz metodę obliczeniową umożliwiającą analizę mechaniki przewodów z uwzględnieniem parametrów łańcuchów izolatorów zawieszonych na słupach mocnych i przelotowych.

Abstract. Article discusses the algorithms used to calculate tensile forces and sags of conductors in high voltage overhead lines tensioning sections. Also presents a 'Ruling Span' method and a computational method which enables the mechanical analysis of overhead conductors, taking into account the parameters of the insulators sets. (*Analysis of the mechanics of conductors in overhead power lines with the use of computer calculation tools*).

Słowa kluczowe: linia napowietrzna, sekcja odciągowa, zwis i naciąg przewodu, obliczenia mechaniczne przewodów elektroenergetycznych.

Keywords: overhead line, tensioning section, sag and conductor tensile force, mechanical calculations in overhead lines.

Wstęp

Linie napowietrzne można zdefiniować jako urządzenie napowietrzne przeznaczone do przesyłu i rozdziału energii elektrycznej. Elementami składowymi linii napowietrznej są: przewody robocze i odgromowe (w liniach wysokich i najwyższych napięć), łańcuchy izolatorów, konstrukcje wsporcze, a także osprzęt liniowy (złączki, zaciski, osprzęt izolatorowy). Przewody linii napowietrznych z reguły wykonuje się jako wielodrutowe linki ułożone naprzemiennie w lewoskrętnych i prawoskrętnych warstwach. W większości linii napowietrznych w Polsce stosuje się przewody aluminiowo-stalowe AFL (ang. *ACSR*) [1, 2].

Przewody elektroenergetyczne podczas ich instalacji w linii napowietrznej są zawieszane z naciągiem nie większym niż $(10\pm 30)\%$ znamionowej wytrzymałości RTS (*Rated Tensile Strength*) w warunkach w których temperatura przewodu zawiera się w przedziale $(5\pm 30)^\circ\text{C}$. Podczas dalszej pracy linii napowietrznej, przewidzianej na kilkadziesiąt lat, przewody robocze osiągają wysoką temperaturę szczególnie podczas szczytowego obciążenia letniego. Wszystkie przewody robocze i odgromowe podlegają także okresowo działaniu dużego obciążenia mechanicznego w warunkach zimowych podczas oblodzenia i/lub silnego wiatru. Przewody narażone są także na uciążliwe drgania eolne i duże wychylenia powodowane przez wiatr. W czasie wszystkich wymienionych powyżej stanów muszą być zachowane warunki niezawodnej i bezpiecznej dla otoczenia pracy linii przez cały wieloletni okres eksploatacji [2]. Kluczowym warunkiem pracy napowietrznej infrastruktury sieciowej, jest zapewnienie bezpieczeństwa publicznego związanego z zachowaniem wymaganych odległości pionowych pomiędzy przewodami fazowymi linii a obiektami znajdującymi się w przestrzeni pod linią napowietrzną. Ważnym zagadnieniem jest również zagwarantowanie wymaganych odległości między torami o różnych poziomach napięcia znamionowego prowadzonych na wspólnych konstrukcjach wsporczych [3, 4]. Zapewnienie bezpiecznej pracy linii napowietrznej w zróżnicowanych kombinacjach warunków atmosferycznych wymaga przeprowadzenia wielu wariantów obliczeń mechanicznych podzespołów linii, zarówno na etapie projektowania, jak również w późniejszym okresie, np. podczas modernizacji mającej na celu zwiększenie obciążalności prądowej danej linii.

Problematyką obliczeń mechanicznych linii napowietrznych zajmuje się niewiele ośrodków badawczych w kraju i za granicą. Dotychczasowe wyniki badań w tym obszarze zamieszczono m.in. [1, 2, 5, 6]. W artykule omówiono uproszczone i dokładne metody służące do analiz mechaniki przewodów w sekcjach odciągowych linii napowietrznych. Zaprezentowane wyniki obliczeń dotyczą wieloprzęsłowej sekcji odciągowej 110 kV oraz przykładowego przęsła o niewielkiej rozpiętości, tzw. „przęsła krótkiego”.

Obliczenia mechaniczne w liniach napowietrznych – metody uproszczone

Do obliczeń mechanicznych przewodów w elektroenergetycznych liniach napowietrznych wykorzystuje się równanie opisujące krzywą zwisania idealnie giętkiej linki zawieszanej sztywno na obu końcach. Jedną z podstawowych wielkości wykorzystywanych w analizach mechanicznych linii napowietrznych jest zwis przewodu, który wyraża największą odległość pionową pomiędzy przewodem a linią prostą łączącą punkty jego zawieszenia. W obliczeniach mechanicznych wykorzystuje się metodę krzywej łańcuchowej (dokładniejszą) lub metodę paraboli. Zwis obliczony z wykorzystaniem równania krzywej łańcuchowej przyjmuje niższe wartości niż zwis wyznaczony zgodnie z równaniem parabol. W przypadku przęsła o znacznej rozpiętości, jak również dla przęsła o dużym spadzie, zastosowanie przybliżenia parabolicznego prowadzi do zbyt dużych błędów obliczeniowych i rekomendowanym podejściem jest wykorzystywanie metody krzywej łańcuchowej.

Zmiany naprężenia i zwisu przewodu w aktualnie występujących warunkach pracy linii zachodzą na skutek zmian jego długości. W przypadku klasycznych przewodów aluminiowo-stalowych, zmiany długości zachodzą w efekcie liniowych odkształceń sprężystych i termicznych. Równanie stanów przewodu (1) łączące ze sobą dwa dowolne stany pracy przewodu „1” i „2” określone przez temperaturę, ciężar objętościowy i naprężenie. Za pomocą równania stanów przewodu (1) opisanego w [2], znając warunki opisujące stan pracy przewodu w stanie początkowym „1”, można wyznaczyć naprężenie σ_2 w stanie występującym po zmianie warunków pracy przewodu „2”:

$$(1) \quad \sigma_2^2(\sigma_2 + A) = B.$$

Zależności na obliczenie współczynników A i B przyjmują następującą postać:

$$(2) \quad A = \frac{a^2 E g_1^2}{24 \sigma_1^2} + \alpha(T_2 - T_1)E - \sigma_1,$$

$$(3) \quad B = \frac{a^2 E g_2^2}{24},$$

gdzie: σ_1, T_1 – naprężenie i temperatura przewodu w stanie początkowym „1”, σ_2, T_2 – naprężenie i temperatura w stanie „2”, po zmianie warunków pracy przewodu, a – rozpiętość przęsła, E – moduł sprężystości przewodu, α – współczynnik wydłużenia termicznego, g_1, g_2 – objętościowy ciężar przewodu, odpowiednio w stanie „1” i „2”.

Znając dane materiałowe przewodu, a także początkowe („1”) i końcowe („2”) warunki pracy przewodu rozwiązuje się równanie (1), otrzymując wartość naprężenia w stanie końcowym. Opisane powyżej równanie stanów przewodu (1) może być wykorzystywane do analiz pojedynczych przęseł linii napowietrznych lub do uproszczonej analizy mechanicznej sekcji odciągowych. W przypadku niewielkich różnic w wartościach współrzędnych pionowych pozycji słupów, do obliczeń zwisu przewodu można wykorzystać zależność (1) wstawiając w miejsce rozpiętości przęsła a , rozpiętość przęsła równoważnego a_r daną wzorem (4):

$$(4) \quad a_r = \sqrt{\frac{\sum_i a_i^3}{\sum_i a_i}},$$

gdzie: a_i – rozpiętości poszczególnych przęseł w sekcji odciągowej.

Rozwiązanie równania stanów przy założeniu $a = a_r$, w znanych warunkach pracy przewodu w stanie „1”, pozwala na obliczenie naprężenia σ_2 , a więc naprężenia w przewodzie po zmianie warunków pracy. Przy takim podejściu obliczona wartość naprężenia σ_2 jest taka sama dla wszystkich przęseł w sekcji odciągowej, natomiast wartość zwisu w i -tym przęsle określa zależność (5):

$$(5) \quad f_i = \frac{a_i^2 g_2}{8 \sigma_2}.$$

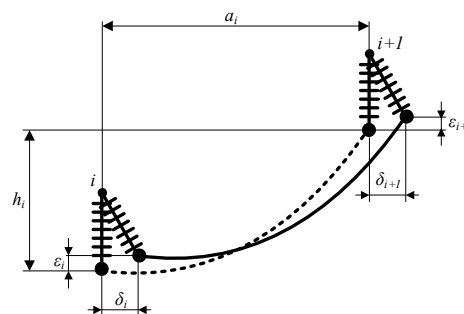
Opisana powyżej metoda obliczeniowa nosi nazwę „Metody przęsła równoważnego” i pozwala na wyznaczenie naprężenia i zwisów w poszczególnych przęsłach sekcji odciągowej przy założeniu zbliżonych wysokości zawieszenia przewodów oraz ich bezpośrednim zamocowaniu do konstrukcji wsporczej, a więc przy pominięciu wpływu łańcuchów izolatorów przelotowych i odciągowych na kształt krzywej zawieszenia przewodu [1, 2].

Obliczenia mechaniczne w liniach napowietrznych – metody dokładne

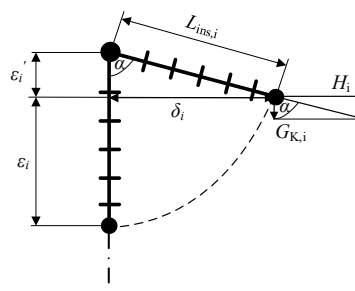
Dla większości linii napowietrznych WN i NN uproszczona metoda obliczeniowa pozwala na osiągnięcie wyników naprężenia i zwisów z akceptowalnym błędem. Jednak w sekcjach odciągowych przebiegających w terenie o dużym spadzie, jak również w przęsłach o niewielkiej rozpiętości uproszczone podejście obliczeniowe jest niewystarczające. Zmodyfikowana postać równania stanów

pozwalająca na analizę mechaniki przewodów w sekcjach odciągowych z uwzględnieniem wysokości punktu zawieszenia przewodów oraz z uwzględnieniem długości i masy łańcuchów izolatorów odciągowych i przelotowych, została opisana w [6]. Z uwagi na zjawisko wyrównywania naciągu w sekcji odciągowej, zachodzące wskutek wychyleń łańcuchów izolatorów na słupach mocnych i przelotowych, analiza mechaniki przewodów w wieloprzęsłowych sekcjach odciągowych nie może być prowadzona przy założeniu podziału rozpatrywanej sekcji odciągowej na pojedyncze przęsła. W celu wyznaczenia naciągu w wieloprzęsłowej sekcji odciągowej, należy zbudować model matematyczny wykorzystujący informację o parametrach materiałowych przewodu oraz o wymiarach i masie łańcuchów izolatorów, a także współrzędnych punktów zawieszenia przewodów roboczych oraz rozpiętościach poszczególnych przęseł. Dokładna analiza mechaniki przewodów w sekcji odciągowej pozwala również na uwzględnienie zróżnicowanych obciążeń wiatrowo-oblodzeniowych w poszczególnych przęsłach. Wymienionych powyżej czynników nie uwzględnia metoda przęsła równoważnego. W sekcji odciągowej zmiana stanu pracy przewodu wskutek zmiany temperatury i/lub obciążenia mechanicznego, skutkuje wyrównaniem naciągu poprzez niewielkie wychYLENIA łańcuchów izolatorów przelotowych oraz zmianą kąta nachylenia łańcuchów izolatorów odciągowych. W praktyce wychYLENIA łańcuchów izolatorów są niewielkie i wynoszą kilka centymetrów, skutkują jednak znaczącym wyrównaniem naciągu w całej sekcji odciągowej (rys. 1).

a)



b)



Rys.1. Zmiana długości przęsła wywołana zmianą położenia łańcuchów izolatorów przelotowych (a) oraz wychYLENIEM łańcuchów izolatorów odciągowych (b); oznaczenia w tekście

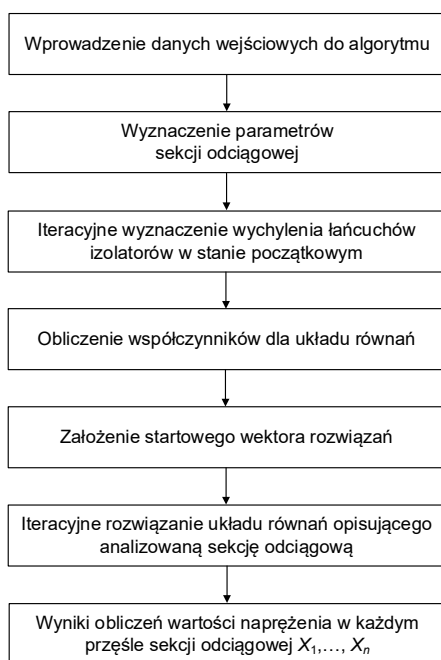
Zmianę rozpiętości przęsła Δa_i oraz zmianę położenia punktu zawieszenia przewodu Δh_i można wyrazić za pomocą równań opisujących stan równowagi izolatorów [6]:

$$(5) \quad \Delta a_i = (\delta_{i+1} - \delta_{1,i+1}) - (\delta_1 - \delta_{1,i}),$$

$$(6) \quad \Delta h_i = (\epsilon_{i+1} - \epsilon_{1,i+1}) - (\epsilon_1 - \epsilon_{1,i}),$$

gdzie: a_i – rozpiętość przęsła, h_i – spad przęsła, δ_i oraz δ_{i+1} – wychylenia poziome łańcucha izolatorów na słupie i oraz $i+1$, ε_i oraz ε_{i+1} – wychylenia pionowe łańcucha izolatorów na słupie i oraz $i+1$) (rys.1).

Wartości oznaczone indeksem „1” dotyczą wychyleń w stanie początkowym, przy czym przyjmuje się założenie, że są one zerowe dla łańcuchów przelotowych. Ze względu na występowanie zróżnicowanych sił naciągu w poszczególnych przęsłach sekcji odciągowej po zmianie warunków pracy przewodu, łańcuchy izolatorów przelotowych wychylają się, powodując tym samym zapewnienie stanu równowagi sił działających na łańcuch. Dokładny model obliczeniowy wymaga złożonych przekształceń ogólnej postaci równania stanów przewodu z uwzględnieniem współrzędnych pozycji słupa, wysokości poprzecznika oraz parametrów łańcuchów izolatorów odciągowych i przelotowych. Strukturę algorytmu wykorzystywanego do obliczeń mechanicznych w sekcjach odciągowych w metodzie dokładnej, pokazano na rys. 2.



Rys.2. Algorytm blokowy wykorzystywany do obliczeń mechanicznych w sekcji odciągowej w metodzie dokładnej

Przystępując do obliczeń należy wybrać typ przewodu oraz podać informacje dotyczące sekcji odciągowej, obejmujące takie parametry jak:

- wartość siły naciągu w stanie początkowym („1”),
- wartości temperatury przewodu w początkowym oraz końcowym stanie pracy,
- numeracja poszczególnych słupów,
- współrzędne pozycji słupa,
- wysokość poprzecznika,
- długość i masa łańcuchów izolatorów,
- wartość dodatkowego ciężaru oblodzenia i parcia wiatru w stanie końcowym.

W kolejnym kroku następuje wyznaczenie podstawowych parametrów sekcji odciągowej, takich jak rozpiętości oraz spady poszczególnych przęsła. Następnie, dla zadanej wartości naciągu i temperatury w stanie początkowym, są wyznaczone wychylenia łańcuchów izolatorów odciągowych w stanie początkowym, przy założeniu zerowego wychyleń łańcuchów izolatorów przelotowych, co jest zbliżone z warunkami występującymi

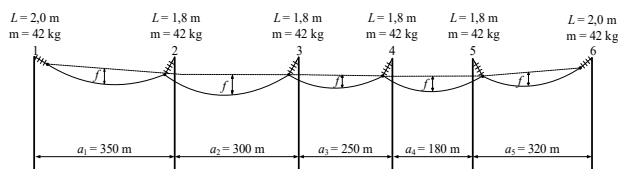
w stanie montażu. W następnym etapie, tworzony jest układ równań nieliniowych, których liczba pokrywa się z liczbą przęsła w rozpatrywanej sekcji odciągowej, po czym są wyznaczone współczynniki występujące przy niewiadomych, będących wartościami naprężenia w stanie końcowym. Współczynniki te zależą od zluźnienia przewodu w stanie początkowym, parametrów materiałowych zastosowanego przewodu, różnicy temperatur w stanie początkowym i końcowym, rozpiętości i spadu poszczególnych przęsła, jak również od zastosowanego naciągu w stanie początkowym (naciąg montażowy). W dalszych krokach procedury obliczeniowej, przyjmowany jest startowy wektor rozwiązań i rozpoczyna się iteracyjne rozwiązywanie układu równań metodą Newtona. W efekcie tych obliczeń otrzymuje się wartości naprężenia w każdym przęsle sekcji odciągowej oraz poziome i pionowe wychylenia łańcuchów izolatorów przelotowych i odciągowych. Uzyskane wielkości można wykorzystać do wyznaczenia szeregu kolejnych parametrów opisujących stan sekcji odciągowej, takich jak bilans sił łańcucha izolatorów, wartość pionowej, siły działającej na łańcuch, rozpiętość przęsła ciężarowego³⁾ czy długość przewodu w każdym z przęsła.

Przykładowe obliczenia mechaniczne w sekcjach odciągowych linii 110 kV

W artykule zaprezentowano wyniki wykonanych przez autorów obliczeń mechanicznych dla sekcji odciągowej 110 kV składającej się z pięciu przęsła o zróżnicowanej rozpiętości oraz dla tzw. „przędła krótkiego”. Przędło krótkie można zdefiniować jako przędło o niewielkiej rozpiętości (do 50 m), w którym przewody zostały zawieszono z niewielką wartością naprężenia podstawowego. Praktycznie przędła krótkie występują najczęściej na początku i na końcu linii i łączą bramkę stacyjną z pierwszym i ostatnim słupem. Do obliczeń wykorzystano moduł Sekcja wchodzący w skład narzędzia do kompleksowej analizy stanów pracy linii napowietrznych ZikOS-LN⁴⁾. Wspomniane powyżej oprogramowanie bazuje na metodzie obliczeń której schemat blokowy pokazano na rys. 2. Narzędzie ZikOS-LN, do rozwiązania układu równań opisujących sekcję odciągową, wykorzystuje iteracyjną metodę Newtona.

Analizowaną sekcję odciągową z zaznaczeniem kierunku wychyleń łańcuchów izolatorów w temperaturach wyższych od temperatury montażu pokazano na rys. 3. Na potrzeby obliczeń przyjęto następujące dane wejściowe:

- temperatura w stanie początkowym (montażowym) $T_1 = 10^\circ\text{C}$,
- naciąg w stanie początkowym $N_1 = 15\,870\text{ N}$,
- ciężar jednostkowy przewodu $w_1 = w_2 = 9,52\text{ N/m}$,
- masa i długość łańcuchów odciągowych $m = 42\text{ kg}$; $L = 2,02\text{ m}$,
- masa i długość łańcuchów przelotowych $m = 42\text{ kg}$; $L = 1,82\text{ m}$,
- rozpiętości przęsła 350 m; 300 m; 250 m; 180 m; 320 m.



Rys.3. Przykładowa pięcioprzędłowa sekcja odciągowa linii 110 kV poddana analizie

W tabeli 1 oraz w tabeli 2 pokazano wyniki obliczeń zwisów i naprężeń dla stanu początkowego ($+10^\circ\text{C}$) oraz dla stanu końcowego ($+80^\circ\text{C}$). Zgodnie z wynikami

zawartymi w tabeli 2, można zauważyć niewielkie różnice naprężenia występujące w kolejnych przęsłach. Największa różnica zwisu występuje w pierwszym i w ostatnim przęśle analizowanej sekcji i wynika z uwzględnienia w metodzie dokładnej skrócenia rozpiętości przęsła, wynikającego z odjęcia długości łańcucha izolatorów odciągowych.

Tabela 1. Wyniki naprężeń i zwisów w temperaturze +10°C

Przęsło	Rozpiętość przęsła m	Metoda przęsła równoważnego		Metoda dokładna	
		σ , MPa	f , m	σ , MPa	f , m
1-2	350	57,46	9,19	57,46	9,10
2-3	300		6,75		6,75
3-4	250		4,69		4,69
4-5	180		2,43		2,43
5-6	320		7,68		7,60

Tabela 2. Wyniki naprężeń i zwisów w temperaturze +80°C

Przęsło	Rozpiętość przęsła m	Metoda przęsła równoważnego		Metoda dokładna	
		σ , MPa	f , m	σ , MPa	f , m
1-2	350	42,41	12,44	42,47	12,10
2-3	300		9,14		9,14
3-4	250		6,35		6,45
4-5	180		3,29		3,36
5-6	320		10,40		10,28

Zaprezentowane w tabeli 2 wartości naprężenia poziomego są osiągane wskutek wychylenia łańcuchów izolatorów (δ), których wartości zestawiono w tabeli 3. Przykładowo na słupie nr 3, w temperaturze przewodu +80°C, dochodzi do wychylenia łańcucha izolatorów przelotowych o 0,111 m w kierunku słupa nr 2. Bilans sił działających na łańcuch izolatorów na słupie nr 3 wynosi w tym przypadku -173 N. Największa różnica sił działająca na łańcuch izolatorów przelotowych występuje na słupie nr 2 (-193 N) i wynika z wychylenia łańcucha w kierunku przęsła o największej rozpiętości w analizowanej sekcji odciągowej (350 m).

Tabela 3. Wartości poziomych wychyleń łańcuchów oraz bilanse sił działających na łańcuchy izolatorów w analizowanych temperaturach pracy przewodu

Numer słupa	$T_1 = T_2 = +10^\circ\text{C}$		$T_2 = +80^\circ\text{C}$	
	δ , m	Bilans sił łańcucha izolatorów, N	δ , m	Bilans sił łańcucha izolatorów, N
1	2,009	15 870	1,995	11 924
2	0	0	-0,108	-193
3	0	0	-0,111	-173
4	0	0	-0,042	-53
5	0	0	0,077	107
6	-2,009	15 870	-1,998	-11 612

W tabeli 4 zestawiono wyniki zwisów i naprężeń wyznaczonych dla „przęsła krótkiego”. Zgodnie z otrzymanymi wynikami, można zauważyć że największe różnice w zwisie występują w niskich temperaturach pracy przewodu. Przykładowo przy założeniu temperatury pracy przewodu równej -25°C zwis wynikający z położenia łańcucha izolatorów odciągowych (f_{iz}) wynosi 0,24 m, natomiast całkowity zwis przewodu (f_c), będący sumą zwisu przewodu i zwisu pochodzącego od łańcucha izolatorów wynosi 0,52 m. Wartość zwisu dla tego samego przypadku wyznaczona metodą przęsła zastępczego, wynosi 0,20 m, a więc jest ponad dwukrotnie mniejsza od wartości uzyskanej metodą dokładną.

Tabela 4. Wyniki naprężeń i zwisów przewodu AFL-6 240 mm² temperaturze +10°C oraz +80°C w „przęśle krótkim”

Rozpiętość przęsła m	Metoda przęsła równoważnego		Metoda dokładna		
	σ , MPa	f , m	σ , MPa	f_{iz} , m	f_c , m
30	$T_1 = -25^\circ\text{C}$				
	19,58	0,20	10,21	0,24	0,52
	$T_1 = 0^\circ\text{C}$				
	9,90	0,39	8,87	0,27	0,60
	$T_1 = +10^\circ\text{C}$				
	8,46	0,46	8,46	0,29	0,63
$T_1 = +80^\circ\text{C}$					
	4,86	0,80	6,61	0,36	0,80

Podsumowanie i wnioski

Poprawne wyznaczenie zwisów i naprężeń dla przewodów linii napowietrznych jest niezwykle istotne z punktu widzenia zachowania wymaganych pionowych odległości między przewodami fazowymi a obiektami znajdującymi się pod linią napowietrzną, jak również ze względu na konieczność wyznaczenia wartości sił działających na konstrukcję wsporczą. Linie napowietrzne są zbudowane z sekcji odciągowych ograniczonych słupami mocnymi, dlatego kształt krzywej zwisania przewodu w danym przęśle, zależy również od stanu przewodu w przęsłach sąsiednich. Wartości zwisów i naciągów przewodu można wyznaczyć za pomocą uproszczonych lub dokładnych metod obliczeniowych.

Algorytm wykorzystywany w metodzie dokładnej, bazuje na modyfikacji równania stanów przewodu, uwzględniającej długość i masę łańcuchów izolatorów oraz współrzędne pozycji słupa, jak również współrzędne punktów zawieszenia przewodu. Zastosowanie dokładnych modeli obliczeniowych, pozwalających na określenie m.in. wychylenia łańcuchów izolatorów, wymaga zaimplementowania metod numerycznych, np. iteracyjnej metody Newtona, co można zrealizować z wykorzystaniem komputerowych narzędzi obliczeniowych. Wpływ parametrów łańcuchów izolatorów odciągowych na mechanikę przewodu jest również widoczny w przęsłach o niewielkiej rozpiętości. W krótkich przęsłach zarówno długość i masa łańcuchów izolatorów odciągowych mają stosunkowo duże wartości w porównaniu do rozpiętości przęsła i długości przewodu, stąd stosowanie modeli obliczeniowych uwzględniających parametry łańcuchów izolatorów jest w takim przypadku rekomendowane.

Autorzy: dr inż. Dominik Duda, E-mail: dominik.duda@polsl.pl; dr inż. Paweł Kubek, E-mail: pawel.kubek@polsl.pl; dr inż. Krzysztof Maźniewski, E-mail: krzysztof.mazniewski@polsl.pl, Politechnika Śląska, Katedra Elektroenergetyki i Sterowania Układów, ul. Krzywoustego 2, 44-100 Gliwice.

LITERATURA

- [1] Kubek P.: Obliczenia naciągów i zwisów w selekcjach odciągowych linii napowietrznych wysokich napięć. *Metrologia naukowa, normatywna i przemysłowa. Wybrane zagadnienia, pod red. Jerzego Roja*, Wyd. Politechniki Śląskiej, Gliwice 2020
- [2] Żmuda K.: Elektroenergetyczne układy przesyłowe i rozdzielcze. *Wybrane zagadnienia z przykładami*, Wydawnictwo Politechniki Śląskiej, Gliwice 2016
- [3] Dziendziel A., Kocot H., Kubek P.: Construction and Modeling of Multi-Circuit Multi-Voltage HVAC Transmission Lines, *Energies*, vol. 14, iss. 2, 2021
- [4] Kocot H., Dziendziel A., Chosen analyses for multi-circuit multi-voltage overhead lines capacitances, *Przegląd Elektrotechniczny*, 96 (2020), nr 8, 71-74
- [5] *Sag-tension calculation methods for overhead lines*. Technical Brochure No. 324. Task Force B2.12.3 CIGRE
- [6] Kiessling F., Nefzger P., Nolasco J.F., Kaintzyk U.: *Overhead Power Lines*, Springer-Verlag, Berlin-Heidelberg-New York 2003