

## Analiza porównawcza indukcyjnego spadku napięcia na stalowych słupach kratowych i pełnościennych w warunkach przepływu prądu udarowego

**Streszczenie.** Jednym ze sposobów ochrony elektroenergetycznych linii napowietrznych przed przepięciami jest niedopuszczenie do tego, aby przepięcia powstające w linii powodowały uszkodzenia jej izolacji. Można to osiągnąć między innymi poprzez zmianę wartości rezystancji uziemienia słupa i jego indukcyjności. W artykule przedstawiono wyniki oceny wartości spadku napięcia na indukcyjności dwóch różnych konstrukcji wsporczych stosowanych w elektroenergetycznych liniach napowietrznych wysokich i najwyższych napięć. Analizie poddano zjawisko bezpośredniego uderzenia pioruna w słup kratowy oraz w słup pełnościenny (rurowy).

**Abstract.** One way to protect overhead power lines surge is to prevent that occurring in line surges caused damage to the insulation. This can be achieved, inter alia, by changing the pole ground resistance and inductance. This paper presents the results of the evaluation of the voltage drop across the inductance of two different support structures relevant to overhead power lines and high voltage high. We analyzed the phenomenon of direct lightning strike to the tower lattice and the tubular tower. (**Comparative analysis of the inductive voltage drop across the tower lattice and tubular tower in terms of the current surge**).

**Słowa kluczowe:** indukcyjny spadek napięcia, przepływ prądu udarowego, słupy kratowe, słupy pełnościenne.

**Keywords:** inductive voltage drop, the flow of surge current, lattice tower, tubular tower.

doi:10.12915/pe.2014.03.15

### Wstęp

Obecne środowiskowe uwarunkowania budowy elektroenergetycznych linii napowietrznych skłaniają operatorów do poszukiwania takich rozwiązań, które w jak najmniejszym stopniu będą ingerowały w otoczenie. Pewną alternatywą wobec powszechnie stosowanych typowych rozwiązań linii napowietrznych jest zastosowanie w miejsce kratowych konstrukcji wsporczych słupów stalowych pełnościennych. Dzięki smukłej sylwetce tych słupów, wynikającej ze znacznie mniejszej średnicy trzonu w porównaniu z konstrukcją kratową istnieje możliwość ograniczenia powierzchni gruntu, na którym zachodzi potrzeba posadowienia takiego słupa. Zastosowanie pełnościennych konstrukcji wsporczych pozwala także na ograniczenie odstępów izolacyjnych między przewodami roboczymi linii, a uziemioną konstrukcją słupa [5]. Wykonane w tym zakresie badania wykazały, że ograniczenie odstępów prowadzone przy zachowaniu wymaganych poziomów wytrzymałości udarowej izolacji może mieć istotny wpływ na obniżenie amplitud składowych pola elektromagnetycznego występującego w otoczeniu linii. Ponadto, przy odpowiednim doborze odstępów izolacyjnych istnieje możliwość ograniczenia szerokości pasa technologicznego pod linią, wymaganego ze względu na istniejące pole elektromagnetyczne.

Aby wykazać słuszność działania polegającego na ograniczeniu odstępów izolacyjnych, poddano analizie zjawisko bezpośredniego uderzenia pioruna w różne konstrukcje wsporcze o zmodyfikowanym systemie mocowania przewodów roboczych. Zastosowane modyfikacje należą do rozwiązań ograniczających oddziaływanie linii napowietrznych na środowisko i umożliwiają naturalną redukcję przepięć atmosferycznych, co będzie miało pozytywny wpływ na poziom niezawodności tych elementów sieci elektroenergetycznych.

### Metody obliczeń impedancji udarowej słupa

W warunkach wyładowań atmosferycznych linie napowietrzne są narażone na oddziaływanie prądów udarowych o wartości szczytowej 14...250 kA i stromości czoła di/dt wynoszącej nawet 100 kA/μs. Przy takich wartościach stromości czoła prądu pioruna w analizach

poziomu napięcia wierzchołka słupa nie można pominąć spadku napięcia na indukcyjności słupa. Wówczas wartość napięcia wierzchołka słupa można określić korzystając z zależności

$$(1) \quad u_s = R_s i_p + L_s \frac{di_p}{dt}$$

gdzie:  $R_s$  – opór uziemienia słupa,  $i_p$  – prąd pioruna,  $L_s$  – indukcyjność słupa

W celu dokonania oceny wartości spadku napięcia na indukcyjności słupa, a w konsekwencji określenia wrażliwości linii przesyłowej na wyładowania piorunowe niezbędne jest określenie impedancji udarowej konstrukcji wsporczej [7, 9].

Problematyka wyznaczenia impedancji udarowej konstrukcji wsporczych różnego rodzaju była i nadal jest przedmiotem wiele badań teoretycznych i doświadczalnych [1-4]. Wnioski z tych badań wskazują na to, że słup można przedstawić jako element linii przesyłowej o stałej impedancji udarowej i czasie przepływu prądu udarowego. Korzystając z teorii pola wykazano, że można opisać sposób przemieszczania się fali przepięciowej po konstrukcji wsporczej. Przyjęto przy tym uproszczenie, polegające na przedstawieniu słupa za pomocą prostych figur geometrycznych.

Proponowane metody obliczenia impedancji udarowej słupa opierają się na wyborze odpowiedniej figury geometrycznej.

Wagner i Hileman [1] określili wartość impedancji falowej słupa w kształcie walca dla przypadku bezpośredniego uderzenia pioruna korzystając z zależności

$$(2) \quad Z_s = 60 \ln \left( \sqrt{2} \frac{2h_s}{r_z} \right) - 60$$

przy czym średnia wartość zastępcza promienia słupa wyliczana jest z wzoru

$$(3) \quad r_z = \frac{r_1 h_2 + r_2 (h_1 + h_2) + r_3 h_1}{2(h_1 + h_2)}$$

gdzie:  $r_1$  - promień w szczycie słupa, m ;  $r_2$  - promień w części środkowej słupa, m ;  $r_3$  - promień podstawy słupa, m ;  $h_1$  - wysokość od podstawy do części środkowej, m ;  $h_2$  - wysokość od części środkowej do szczytu, m ;  $h_s = h_1 + h_2$  - wysokość słupa

Natomiast Sargent i Darveniza [2] wykazali, możliwość obliczenia impedancji udarowej słupa w kształcie stożka, z zachowaniem stałej impedancji falowej, której wartość można określić korzystając z wzoru

$$(4) \quad Z_s = 60 \ln \left( \sqrt{2} \frac{\sqrt{h_s^2 + r^2}}{r} \right)$$

gdzie:  $r$  - promień podstawy słupa,  $h_s$  - wysokość słupa.

W obliczeniach impedancji udarowej lub indukcyjności słupa o przekroju poprzecznym różniącym się od koła można zastosować metodę obliczeniową zaproponowaną przez Chow i Yovanowich [3].

W tej metodzie impedancję słupa wyznacza się na podstawie znajomości pojemności własnej słupa  $C_s$ , którą można wyliczyć w następujący sposób

$$(5) \quad C_s = \varepsilon_o C_f (4\pi A_s)^{\frac{1}{2}}$$

$$(6) \quad C_f = \frac{(2\Gamma)^{\frac{1}{2}}}{\ln(4\Gamma)}$$

gdzie:  $\Gamma$  - współczynnik wydłużenia (oznacza stosunek maksymalnej wysokości do maksymalnej szerokości słupa),  $\varepsilon_o = 8,854 \times 10^{-12}$  [F/m],  $A_s$  - powierzchnia boczna słupa w  $m^2$ ,

Zależność impedancji udarowej słupa od pojemności własnej słupa przedstawia wzór

$$(7) \quad Z_s = \frac{t}{C_s}$$

gdzie  $t$  - czas przemieszczenia się wzdłuż słupa fali ładunków powstałej na skutek uderzenia pioruna w słup.

Zakładając, że przepływ ładunków przemieszcza się z prędkością światła czas  $t$  można wyliczyć ze wzoru

$$(8) \quad t = \frac{h_s}{c}$$

gdzie:  $h_s$  - wysokość słupa,  $c$  - prędkość światła

Hara i Yamamoto [4] na podstawie prowadzonych badań doświadczalnych zaproponowali sposób wyznaczania impedancji udarowej słupa korzystając z modelu stożka ściętego lub układu wielu stożków ściętych. W tym przypadku wartość impedancji udarowej słupa można wyliczyć następujący sposób:

$$(9) \quad Z_s = 60 \left( \ln \frac{2\sqrt{2}h_s}{r_z} - 2 \right)$$

przy czym promień zastępczy dla takiego modelu słupa określa wzór

$$(10) \quad r_z = r_w^{\frac{1}{3}} r_p^{\frac{2}{3}}$$

gdzie:  $r_w$  - promień wierzchołka stożka,  $r_p$  - promień podstawy stożka.

Dla modelu słupa opisanego jako układ 4 stożków ściętych (modelowanie słupów kratowych) impedancja udarowa jest wyznaczana na podstawie wzoru

$$(11) \quad Z_s = 60 \left( \ln \frac{2\sqrt{2}h}{r_z} - 2 \right)$$

promień zastępczy modelu słupa określa zależność

$$(12) \quad r_z = 2^{\frac{1}{8}} r^{\frac{1}{4}} R^{\frac{3}{4}}$$

gdzie:

$r$  - promień zastępczy pojedynczej podpory określony wzorem 4e,  $R$  - promień zastępczy układu 4 podpór określony wzorem 4f

$$(13) \quad r = r_w^{\frac{1}{3}} r_p^{\frac{2}{3}}$$

$$(14) \quad R = R_w^{\frac{1}{3}} R_p^{\frac{2}{3}}$$

gdzie:

$R_w$  - odległości pomiędzy podporami na wierzchołku słupa,  $R_p$  - odległość pomiędzy podporami przy podstawie słupa.

## 2. Wybór obiektów poddanych analizie

Aby ocenić, w jakim stopniu typ konstrukcji wsporczej, tj. kratowej lub pełnościenny wpływa swoją impedancją na wartość indukcyjnego spadku napięcia słupa wyznaczono ten parametr dla rozważanych konstrukcji wsporczych, wykorzystując w tym celu wcześniej przywołane zależności. Następnie, w celach porównawczych przedstawiono wyniki obliczeń w formie wykresów.

Sylwetki słupów kratowych oraz pełnościennych wybrano spośród typowych rozwiązań słupów stosowanych do budowy linii o napięciu 110kV [6]. Ponieważ do budowy linii napowietrznych najczęściej wykorzystuje się słupy przelotowe i odporowe o małym kącie załomu (mocne) w prowadzonych obliczeniach uwzględniono przede wszystkim tego rodzaju słupy. Obliczenia prowadzono dla słupów linii jedno- i dwutorowej.

W obliczeniach uwzględniono słupy o wysokości równej:

- 17 m dla słupów przelotowych P(0),

- 15 m dla słupów mocnych M2(0).

Przyjęta wysokość słupów stanowi odległość od poziomu ziemi do poprzecznika zamocowanego najniżej. W obliczeniach uwzględniono również możliwe podwyższenia słupów o 2,5, 5 lub 10m.

Dla potrzeb zamodelowania brył odwzorowujących słupy zgodnie z zaproponowanymi metodami modelowania [1-4], określono niezbędne wymiary geometryczne słupów. Wartości tych wymiarów dla różnych typów słupów linii jednotorowej i dwutorowej ujęto w tabelach odpowiednio 1 i 2 oraz 3 i 4.

Tabela 1. Przyjęte do obliczeń wymiary geometryczne słupów kratowych dla linii jednotorowej 110kV

Typ słupa	$h_s$ [m]	$h_2$ [m]	$h_1$ [m]	$A_g$ [m]	$B_g$ [m]	$A_d$ [m]	$B_d$ [m]
P(0)	23,3	6,3	17	1,7	1,7	2,97	2,17
P(+2,5)	25,8	6,3	19,5	1,7	1,7	3,29	2,37
P(+5)	28,3	6,3	22,0	1,7	1,7	3,62	2,58
P(+10)	33,3	6,3	27,0	1,7	1,7	4,28	2,99
M2(0)	22,0	7,0	15,0	1,2	1,2	3,76	3,76
M2(2,5)	24,5	7,0	17,5	1,2	1,2	4,20	4,20
M2(5)	27,0	7,0	20,0	1,2	1,2	4,64	4,64
M2(10)	32,0	7,0	25,0	1,2	1,2	5,52	5,52

Tabela 2. Przyjęte do obliczeń wymiary geometryczne słupów pełnościennych dla linii jednotorowych 110kV

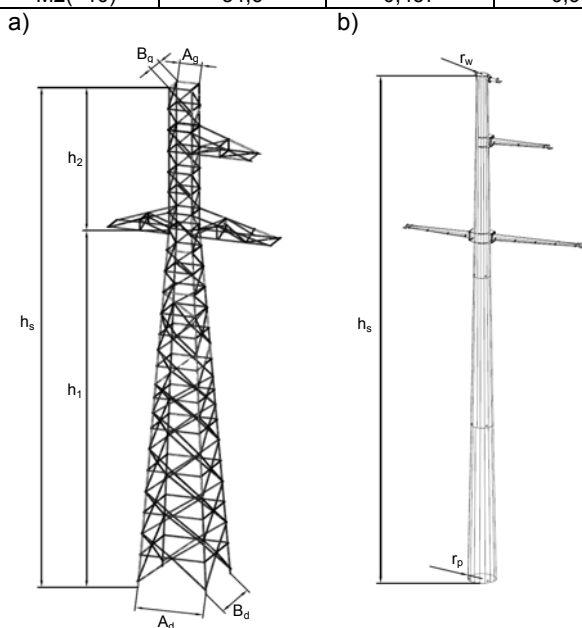
Typ słupa	$h_s$ [m]	$r_w$ [m]	$r_p$ [m]
P(0)	22,6	0,153	0,482
P(+2,5)	25,1	0,184	0,482
P(+5)	27,6	0,209	0,561
P(+10)	32,6	0,209	0,637
M2(0)	22,6	0,214	0,566
M2(+2,5)	25,1	0,291	0,642
M2(+5)	27,6	0,255	0,637
M2(+10)	32,6	0,316	0,749

Tabela 3. Przyjęte do obliczeń wymiary geometryczne słupów kratowych dla linii dwutorowej 110kV

Typ słupa	$h_s$ [m]	$h_2$ [m]	$h_1$ [m]	$A_g$ [m]	$B_g$ [m]	$A_d$ [m]	$B_d$ [m]
P(0)	26,6	9,6	17,0	1,4	1,4	3,77	2,76
P(+2,5)	29,1	9,6	19,5	1,4	1,4	4,19	3,03
P(+5)	31,6	9,6	22,0	1,4	1,4	4,60	3,30
P(+10)	36,6	9,6	27,0	1,4	1,4	5,43	3,83
M2(0)	24,7	9,7	15,0	1,6	1,6	4,97	4,97
M2(2,5)	27,2	9,7	17,5	1,6	1,6	5,61	5,61
M2(5)	29,7	9,7	20,0	1,6	1,6	6,26	6,26
M2(10)	34,7	9,7	25,0	1,6	1,6	7,54	7,54

Tabela 4. Przyjęte do obliczeń wymiary geometryczne słupów pełnościennych dla linii dwutorowej 110kV

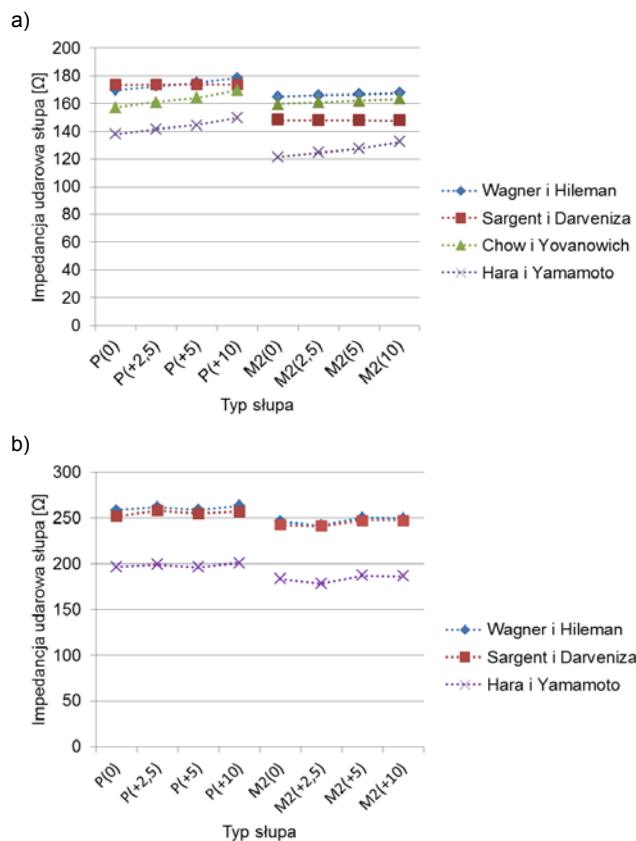
Typ słupa	$h_s$ [m]	$r_w$ [m]	$r_p$ [m]
P(0)	25,8	0,204	0,637
P(+2,5)	28,3	0,235	0,637
P(+5)	30,8	0,235	0,637
P(+10)	35,8	0,306	0,750
M2(0)	24,6	0,381	0,721
M2(+2,5)	27,1	0,381	0,721
M2(+5)	29,6	0,355	0,843
M2(+10)	34,6	0,457	0,955



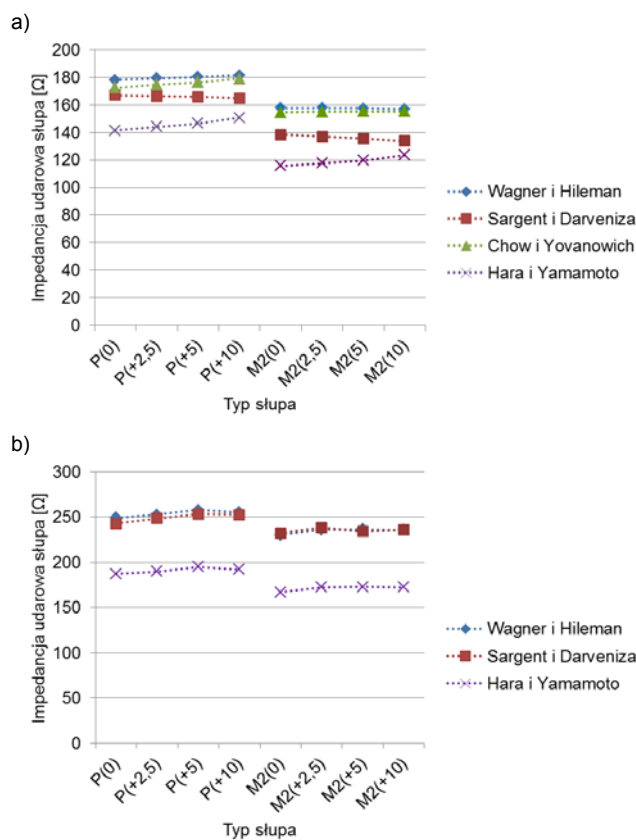
Rys. 1. Oznaczenia zastosowanych wymiarów geometrycznych słupów a) kratowych, b) pełnościennych

### 3. Analiza uzyskanych wyników obliczeń

Analizę wyników przeprowadzono na podstawie wykresów sporządzonych w sposób umożliwiający ich porównanie, zarówno pod względem zastosowanej konstrukcji wsporczej, jak i przyjętej metody obliczeń. Prezentację wartości impedancji udarowych dla różnych typów słupów linii jednotorowych i dwutorowych uzyskanych na podstawie opisanych wcześniej metod modelowania zawarto na rys. 2 i 3.



Rys. 2. Zestawienie wartości impedancji udarowych słupów stosowanych w liniach jednotorowych 110kV a) kratowych, b) pełnościennych z uwzględnieniem wybranych metod obliczeniowych



Rys. 3. Zestawienie wartości impedancji udarowych słupów stosowanych w liniach dwutorowych 110kV a) kratowych, b) pełnościennych z uwzględnieniem wybranych metod obliczeniowych

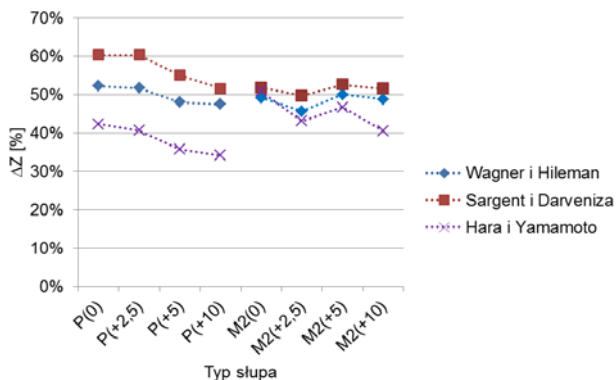
Zaproponowane metody obliczenia impedancji udarowej [1-3] wykazują zbieżność wartości z 5% średnim odchyleniem. Wartości tego parametru wyznaczone w oparciu o metodę [4] charakteryzują się mniejszą o 20% wartością. Powodem tego jest przyjęte przez Hara i Yamamoto następujące założenie: dla modelu stożka ściętego przy wyznaczaniu wartości promienia zastępczego słupa uwzględniono 30 % zwiększenie promienia przy podstawie słupa. Przedstawione metody wyznaczania impedancji udarowej słupa wykazały, że ten parametr jest uzależniony od proporcji między wysokością i promieniem zastępczym słupa. Analiza tej proporcji przeprowadzona dla wybranych typów i rodzajów słupów dowodzi, że słupy przelotowe są wyższe od słupów mocnych, jednocześnie słupy mocne ze względu na większe obciążenia od naciągu przewodów charakteryzują się większą średnicą. Dlatego, impedancja udarowa słupów przelotowych jest większa od impedancji udarowej słupów mocnych o 6% dla słupów jednotorowych i 13% dla słupów dwutorowych. Analizując uzyskane wyniki obliczeń stwierdzono istotną różnicę wartości impedancji dla słupów kratowych i słupów pełnościennych. Korzystając z zależności

$$(15) \quad \Delta Z = \frac{Z_P - Z_K}{Z_K} 100\%$$

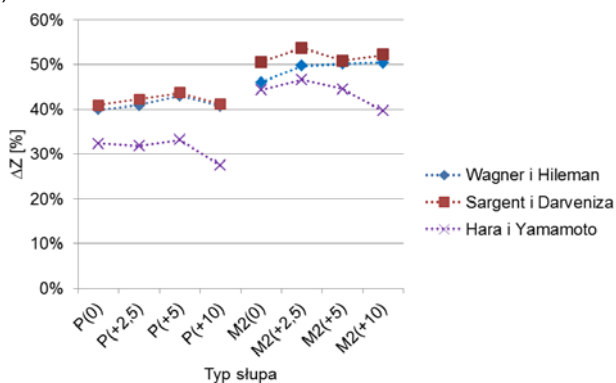
gdzie:  $Z_P$  – impedancja udarowa słupa pełnościennego,  $Z_K$  – impedancja udarowa słupa kratowego ekwiwalentnego do słupa pełnościennego,

określono wpływ rodzaju konstrukcji wsporczej na wartość impedancji udarowej.

a)



b)



Rys.4. Procentowy wzrost wartości impedancji udarowej słupa pełnościennego w porównaniu ze słupem kratowym dla linii 110kV a) jednotorowych, b) dwutorowych

Smukłe i wąskotronowe sylwetki słupów pełnościennych charakteryzują istotnie mniejszym promieniem niż odpowiadające im słupy kratowe. Mniejsza wartość zastępczego promienia słupa przy zachowaniu tej samej wysokości powoduje, iż impedancja udarowa słupów pełnościennych jest większa. Procentowy wzrost wartości impedancji udarowej słupów pełnościennych określony z wykorzystaniem wybranych metod obliczeniowych przedstawiono na rysunku 4.

Większa wartość impedancji udarowej słupa pełnościennego wpływa na wzrost wartości spadku napięcia na konstrukcji słupa dla warunków przepływu prądu wyładowania atmosferycznego. W celu porównania wartości spadku napięcia na indukcyjności słupów kratowych i pełnościennych wyznaczono średnie wartości parametru  $Z_S$ , a następnie wyliczono odpowiadające im wartości indukcyjności zgodnie ze wzorem

$$(16) \quad L_S = Z_S \frac{h_s}{c}$$

Uzyskane wyniki obliczeń zestawiono w tabeli 5.

Tabela 5. Zestawienie średnich wartości impedancji udarowych słupów oraz odpowiadających im indukcyjności

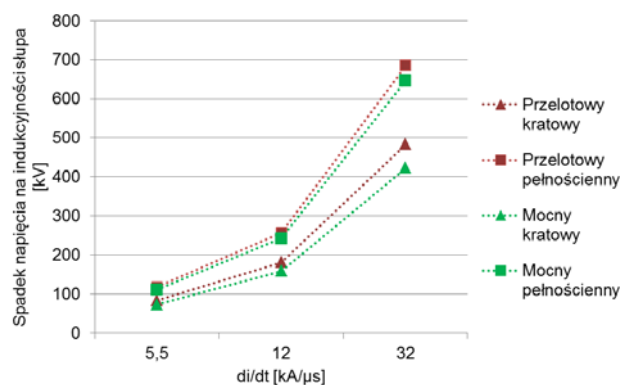
Typ słupa	Kratowy		Pełnościenny	
	$Z_{SK}$ [Ω]	$L_{SK}$ [μH]	$Z_{SP}$ [Ω]	$L_{SP}$ [μH]
Przelotowy jednotorowy	163	15,1	238	21,4
Mocny jednotorowy	150	13,2	225	20,2
Przelotowy dwutorowy	167	17,2	231	23,3
Mocny Dwutorowy	142	13,8	214	20,7

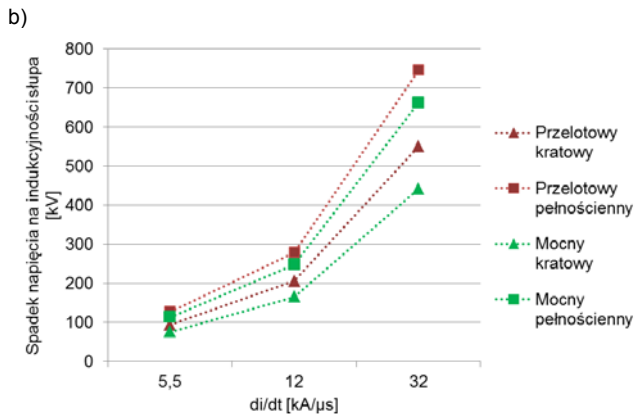
Wartość spadku napięcia na indukcyjności słupa zależy od jego indukcyjności oraz stromości czoła prądu pioruna, a związek między tymi parametrami określa zależność

$$(17) \quad u_{LS} = L_S \frac{di_p}{dt}$$

Dla potrzeb realizacji celów badawczych wybrano trzy poziomy średnich stromości czoła prądu wyładowania głównego – 5,5 kA/μs, 12 kA/μs i 32 kA/μs [8]. Uwzględniając wskazane stromości czoła oraz średnie wartości indukcyjności słupów zestawione w tabeli 5 wyznaczono spadki napięcia, a uzyskane wyniki zaprezentowano na rysunku 5.

a)





Rys.5. Wpływ rodzaju oraz typów słupów na wartość spadku napięcia na indukcyjności dla słupów linii 110kV a) jednorodnych, b) dwutorowych

### Wnioski

Impedancja własna słupa jest parametrem o istotnym znaczeniu w sytuacji przepływu prądu pioruna, wywołanego wyładowaniem bezpośrednim w konstrukcję wsporczą. Przeprowadzona analiza porównawcza indukcyjnego spadku napięcia na stalowych słupach kratowych i pełnościennych w warunkach przepływu prądu udarowego wykazała, że z powodu dużej smukłości trzonu, impedancja udarowa słupów pełnościennych jest o około 50% większa od impedancji słupów kratowych. W takim też stopniu wzrasta wartość spadku napięcia na indukcyjności słupa. Dla przykładu, w przypadku udarów o stromości czoła 32 kA/s spadek napięcia przy zastosowaniu słupa pełnościennego wzrasta o 200kV.

Wykazana różnica pomiędzy impedancją słupa kratowego i pełnościennego potwierdza potrzebę oceny wpływu rodzaju zastosowanego słupa na niezawodność linii. Zastosowanie wąskotrzonowych rozwiązań konstrukcji wsporczych jest uzasadnione ograniczeniem oddziaływania natężenia pola elektromagnetycznego w otoczeniu linii. Własność ta jest m.in. zgodna z oczekiwaniami społecznymi. Przeprowadzona analiza uzyskanych wyników wykazuje jednak, że dokonana zmiana konstrukcji wsporczej nie pozostaje bez wpływu na wartość spadku napięcia na indukcyjności słupa.

Stosowanie słupów pełnościennych w budownictwie liniowym stwarza możliwość zmiany geometrycznego rozmieszczenia przewodów roboczych i odgromowych, co

jednak może prowadzić do wzrostu wartości indukowanego przepięcia w przewodach fazowych wskutek przepływu prądu udarowego w przewodzie odgromowym. Stan ten może prowadzić do wystąpienia zagrożenia izolacji spowodowanego przeskokami odwrotnymi.

Otrzymane wyniki są efektem prowadzonych badań zmierzających do wykazania celowości podwyższenia poziomu wytrzymywanego napięcia udarowego piorunowego, a tym samym potwierdzenia zasadności optymalizacji marginesu między poziomem podstawowym izolacji a poziomem ochrony. Konsekwencje takiego działania przekładają się wprost na ograniczenie kosztów izolacji i ochrony, a także na poziom niezawodności tych elementów sieci elektroenergetycznych.

### LITERATURA

- [1] Wagner, C.F. and Hileman, A.R. , A New Approach to the Calculation of the Lighting Performance of Transmission Lines Part III, AIEE Trans. PAS Vol 79, 1960, pp 589-603
- [2] Sargent, M.A. and Darveniza, M., Tower Surge Impedance, IEEE Trans, PAS Vol. 88 No 5, May 1969, pp 680-687
- [3] Chrisholm, W.A., Chow, Y.L. and Srivastava, K.D. Tower Travel Time, IEEE Trans PAS Vol 104 No 10, October 1985, pp 2922-2928
- [4] Hara, T. and Yamamoto O., Modelling of a transmission tower for lighting surge analysis, IEE Proc.-Gener. Transm. Distrib., Vol. 143, No. 3. May 1996
- [5] Skomudek W., Pomiary i analiza przepięć oraz ocena ich skutków w sieciach średniego i wysokiego napięcia. COSIW, Warszawa 2011
- [6] Skomudek W., Szpindler P., Rozkład składowych pola elektromagnetycznego wokół przewodów linii napowietrznych wysokich napięć wykonanych na słupach pełnościennych, PAK 7/2013
- [7] Sowa P., Dynamiczne układy zastępcze w analizie elektroenergetycznych stanów przejściowych, Wydawnictwo Politechniki Śląskiej, Gliwice 2011.
- [8] Gacek, Z. Technika wysokich napięć, Wydawnictwo Politechniki Śląskiej, Gliwice 1999
- [9] Martinem J.A., Gustavsen B., Durbak D., Parameter Determination for Modeling System Transients – Part 1: Overhead Lines, IEEE Transactions of Power Delivery, Vol. 20, No. 3, 2005, pp. 2038-2044

Waldemar SKOMUDEK<sup>1</sup>, Piotr SZPINDLER<sup>2</sup>  
 Politechnika Opolska, Katedra Zarządzania Projektami (1),  
 KROMISS-BIS Sp. z o.o., ul. Legionów 92, Częstochowa (2)