XXIX Seminarium

ZASTOSOWANIE KOMPUTERÓW W NAUCE I TECHNICE 2019

Oddział Gdański PTETiS

doi: 10.32016/1.68.08

ANALIZA ZAWODNOŚCI OCHRONY ODGROMOWEJ W UJĘCIU PRZESTRZENNYM

Radosław PACOŃ, Mariusz BENESZ

AGH Akademia Górniczo-Hutnicza, Katedra Elektrotechniki i Elektroenergetyki
tel.: (12) 617-2599 e-mail: rpacon@interia.pl, mariusz.benesz@agh.edu.pl

Streszczenie: Możliwość identyfikacji narażeń napięciowych układów izolacyjnych znacząco wpływa na efektywność w koordynacji izolacji, co z kolei wpływa na zwiększenie niezawodności w przesyle i rozdziale energii elektrycznej. W artykule poruszono jeden z możliwych scenariuszy narażeń napięciowych w napowietrznych liniach elektroenergetycznych związany z zawodnością ochrony odgromowej. Ważne znaczenie w zachowaniu ochrony odgrywa ukształtowanie terenu, które może mieć pozytywny jak i negatywny wpływ na ochronę przed bezpośrednimi wyładowaniami atmosferycznymi. Rezultatem pracy jest określenie charakterystycznych wartości szczytowych prądu wyładowania atmosferycznego I_{UBmax}, powyżej których ochrona odgromowa jest zachowana. Obliczenia przeprowadzono w ujęciu przestrzennym dla typowej konstrukcji wsporczej serii B2 typu przelotowego i czterech przypadków ukształtowania powierzchni terenu.

Słowa kluczowe: zawodność ochrony odgromowej, odległość decyzji, teoria elektrogeometryczna, 3D.

1. WPROWADZENIE

Jednym z najważniejszych narażeń napięciowych układów izolacyjnych (z punktu widzenia m. in. koordynacji izolacji czy doboru odległości bezpiecznych) są narażenia napięciowe wywołane bezpośrednimi wyładowaniami atmosferycznymi do elementów konstrukcyjnych linii napowietrznej [1].

Sposób prowadzenia linii w terenie, jak i samo ukształtowanie powierzchni terenu może wpłynąć na poziom narażeń napięciowych wywołanych wyładowaniem atmosferycznym – w szczególności związanych z zawodnością ochrony odgromowej. W przypadkach, gdy zastosowane w danej linii konstrukcje wsporcze jednoznacznie lokalizują przewody nad terenem oraz biorąc pod uwagę naturę wyładowań atmosferycznych (wyładowania następują zazwyczaj do obiektów, do których wyładowanie ma „najbliżej") obserwuje się częstsze bezpośrednie wyładowania atmosferyczne do elementów konstrukcji linii w porównaniu do sąsiednich elementów otoczenia. Z drugiej zaś strony prowadzenie linii przez tereny leśne lub wzdłuż zboczy górskich może powodować, że względna wysokość linii nad powierzchnią terenu zmniejsza się przez co wyładowania atmosferyczne rzadziej będą następować do tego obiektu.

Podstawowym środkiem ochrony przed bezpośrednimi wyładowaniami do przewodów fazowych, w liniach napowietrznych o napięciu nominalnym nie niższym niż 110 kV, są przewody odgromowe. Jednakże taka ochrona nie jest w 100% skuteczna [2, 3]. O zawodności ochrony odgromowej mówimy wtedy, gdy pomimo zastosowania przewodu odgromowego może dojść do bezpośredniego wyładowania atmosferycznego do przewodu fazowego. Przy analizie tego scenariusza uderzenia wyładowania atmosferycznego otrzymuje się maksymalną wartość szczytową prądu wyładowania atmosferycznego I_{UBmax}, powyżej której przyjmuje się, że ochrona odgromowa jest zachowana.

W literaturze można spotkać się z wieloma modelami, na podstawie których można przeprowadzić analizę zawodności ochrony odgromowej zastosowanych przewodów odgromowych w liniach napowietrznych. Modele te można podzielić na trzy zasadnicze grupy [2, 3]: modele oparte na odległości decyzji, modele oparte na odległości aktywnej oraz modele uwzględniające rozkład statystyczny odległości decyzji wyładowania do powierzchni ziemi. W każdym modelu analiza możliwości wyładowania atmosferycznego do elementów konstrukcyjnych linii lub do powierzchni ziemi, dokonywana jest na podstawie wyznaczonych odległości. Odległości te określane są na podstawie spodziewanej wartości szczytowej prądu wyładowania atmosferycznego dla każdego z możliwych miejsc wyładowania (do przewodów fazowych, przewodów odgromowych i powierzchni ziemi). Dodatkowo modele te uwzględniają wyłącznie płaską powierzchnię terenu.

W artykule przybliżono ideę analizy zawodności ochrony odgromowej w ujęciu przestrzennym linii napowietrznych bazującej na teorii elektrogeometrycznej (modelu bazującego na odległości decyzji). Obliczenia dokonano dla pojedynczego przęsła linii napowietrznej o napięciu nominalnym 110 kV, w której zastosowano konstrukcje wsporcze serii B2 typu przelotowego. Wynikiem obliczeń są charakterystyczne wartości szczytowe prądu wyładowania atmosferycznego (I_{UBmax}) w punktach umiejscowionych wzdłuż przęsła, uwzględniając przy tym różne warianty ukształtowania powierzchni terenu.

2. IDEA MODELU OCENY SKUTECZNOŚCI OCHRONY ODGROMOWEJ BAZUJĄCEGO NA ODLEGŁOŚCI DECYZJI

Model oceny skuteczności ochrony odgromowej oparty na teorii elektrogeometrycznej, pozwala określić odległość decyzji pioruna r w funkcji wartości szczytowej prądu wyładowania atmosferycznego I. Odległość ta jest definiowana pomiędzy czołem lidera wyładowania piorunowego, a elementem, do którego może nastąpić wyładowanie. Odległość decyzji wyładowania atmosferycznego dla każdego z możliwych miejsc wyładowania (do przewodów fazowych, do przewodów

odgromowych i do powierzchni terenu) określić można na podstawie następujących zależności [4]:

$$r_c = A_c \cdot I^{B_c} \quad (1)$$

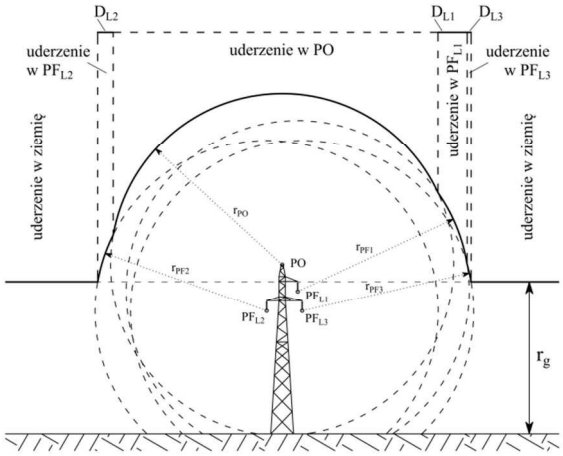
$$r_g = A_g \cdot I^{B_g} \quad (2)$$

gdzie: r_c, r_g – odległość decyzji wyładowania odpowiednio do przewodu (fazowego lub odgromowego) i do powierzchni ziemi [m], I – wartość szczytowa prądu wyładowania atmosferycznego [kA], A_c, A_g, B_c, B_g – współczynniki liczbowe zależne od zastosowanego podejścia (tab. 1).

Tablica 1. Wartości współczynników liczbowych A_c, A_g, B_c, B_g

Podejście	Współczynnik liczbowy			
	A_g	B_g	A_c	B_c
IEEE Std. [4]	$r_g = k_2 \cdot r_c$ (*)		10,00	0,65
(*) $k_2 = 0{,}36+0{,}17 \cdot \ln(43-h_{śr})$ dla $h_{śr} < 40$ m lub $k_2 = 0{,}55$ dla $h_{śr} \geq 40$ m, gdzie $h_{śr}$ – średnia wysokość zawieszenia przewodów				

Graficzną interpretację zastosowanego modelu analizy zawodności ochrony odgromowej przedstawiono na rysunku 1. Wykreślone z przewodów fazowych PF i odgromowych PO okręgi o promieniach r_c oraz pozioma prosta znajdująca się w odległości r_g od powierzchni ziemi tworzą zbiór punktów, będący spodziewanym miejscem uderzenia wyładowania atmosferycznego. Wyładowanie atmosferyczne do przewodów fazowych może nastąpić w obszarach oznaczonych na rysunku 1 jako D_{L1}, D_{L2} i D_{L3}. Zakłada się, że ochrona odgromowa przez przewody odgromowe jest zapewniona dopiero wtedy, gdy okręgi od przewodów fazowych znajdują się pod krzywą powstałą z przecięcia okręgu od przewodu odgromowego i prostej równoległej do powierzchni ziemi, (sytuacja, w której szerokości obszarów D_{L1}, D_{L2} i D_{L3} będą równe zero). Otrzymana wartość szczytowa prądu wyładowania atmosferycznego, dla którego zachowana jest ochrona odgromowa, jest tożsama z poszukiwaną wartością prądu I_{UBmax}.



Rys. 1. Graficzna interpretacja modelu obliczeniowego

3. ZAŁOŻENIA I ANALIZOWANE PRZYPADKI

Analizę zawodności ochrony odgromowej w ujęciu przestrzennym dokonano dla pojedynczego przęsła (o długości 320 m) linii napowietrznej o napięciu nominalnym 110 kV, w której zastosowano słupy przelotowe serii B2. Sylwetkę rozpatrywanej konstrukcji pokazano na rysunku 1, zaś w tablicy 2 zestawiono współrzędne zawieszenia poszczególnych typów przewodów na analizowanych konstrukcjach. W każdym rozpatrywanym wariancie założono maksymalne zwisy w środku przęsła równe 8,88 m i 6,14 m odpowiednio dla przewodów fazowych i przewodu odgromowego.

Tablica 2. Współrzędne zawieszenia przewodów na rozpatrywanej konstrukcji wsporczej serii B2 typu przelotowego

Typ słupa	Typ przewodu			
	PF_{L1}	PF_{L2}	PF_{L3}	PO
P(0)	(2,80;15,72)	(-2,80;12,12)	(3,60;12,12)	(0,0;20,6)
P(+5)	(2,80;20,72)	(-2,80;17,12)	(3,60;17,12)	(0,0;25,6)
P(+10)	(2,80;25,72)	(-2,80;22,12)	(3,60;22,12)	(0,0;30,6)

Celem przeprowadzanych analiz jest określenie charakterystycznych wartości szczytowych prądu wyładowania atmosferycznego (I_{UBmax}) w punktach umiejscowionych wzdłuż przęsła (co 10% długości przęsła). W analizach uwzględniono cztery warianty ukształtowania powierzchni terenu, takie jak:

- powierzchnia terenu płaska, przęsło poziome (wariant 1);
- powierzchnia terenu z 5% nachyleniem terenu wzdłuż przebiegu przęsła, rozpatrzono tutaj dwa przypadku przęsła: poziome (wariant 2a) i przęsło pochyłe (wariant 2b);
- powierzchnia terenu z 10% nachyleniem terenu w poprzek przęsła, przy czym nachylenie to może narastać lub maleć (być z lewej lub prawej strony konstrukcji) – odpowiednio wariant 3a i 3b;
- kombinacja powierzchni terenu z wariantu 1 i 2, mająca odzwierciedlać w poziomym przęśle wzniesienia o 15% nachyleniu (wariant 4).

Na rysunku 2 przedstawiono interpretację graficzną rozpatrywanych wariantów ukształtowania powierzchni terenu.

W celu wyznaczenia wartości prądu I_{UBmax} w dowolnym miejscu przęsła należy określić położenia przewodów nad powierzchnią ziemi poprzez uwzględnienie zwisów przewodów w tym punkcie [5, 6]:

- dla przęsła poziomego (rysunek 3a) zwis przewodu w dowolnym miejscu przęsła obliczono według zależności:

$$f_x = f\frac{(a+2x)(a-2x)}{a^2} \quad (3)$$

gdzie: f – zwis przewodu w środku rozpiętości przęsła [m], a – rozpiętość przęsła [m], x – odległość od środka rozpiętości przęsła [m].

- dla przęsła pochyłego (rysunek 3b) zwis przewodu w dowolnym miejscu przęsła określono w oparciu o tzw. przęsło uzupełnione według zależności:

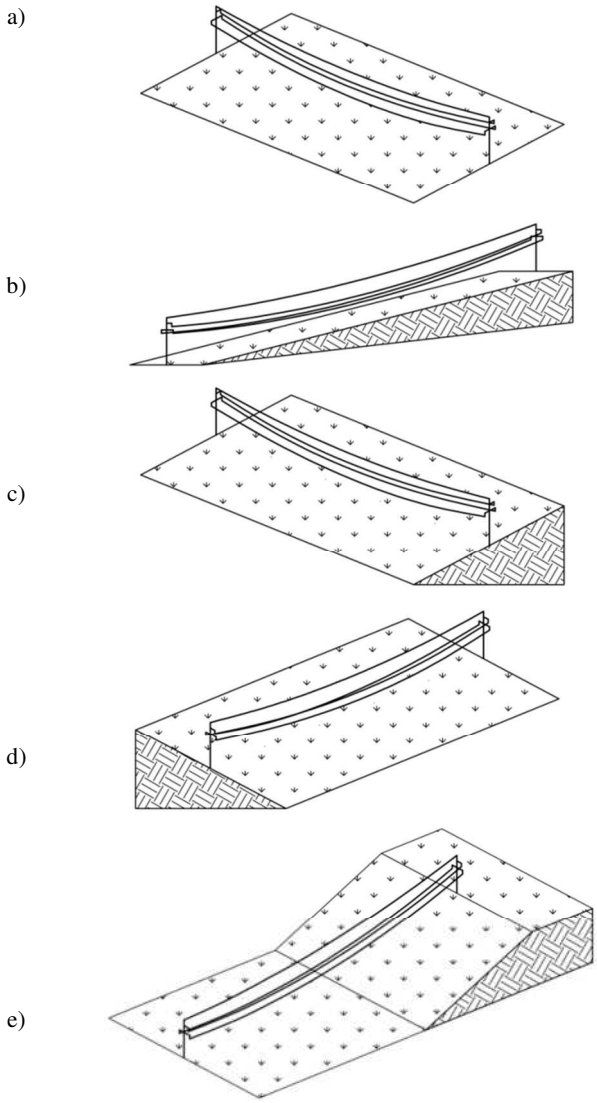
$$f_x = f\frac{(a+2x_1)(a-2x_2)}{a^2} \quad (4)$$

$$x_1 = 0{,}5 \cdot a + m \quad (5)$$

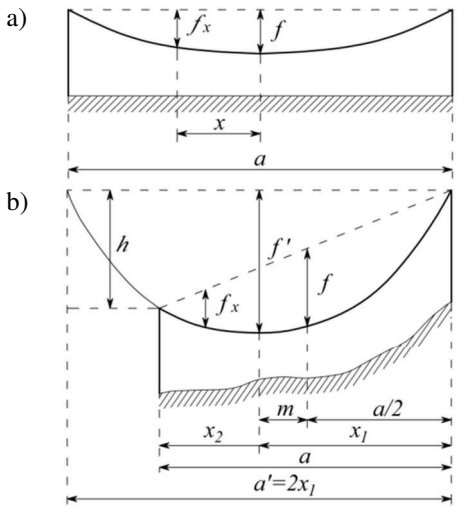
$$x_2 = 0{,}5 \cdot a - m \quad (6)$$

$$m = \frac{\sigma h}{ag} \quad (7)$$

gdzie: x_1, x_2 – odległości zdefiniowane na rysunku 3 [m], m – mimośród [m], σ – naprężenie przewodu [N/mm^2], h – różnica w poziomach zawieszenia [m], g – współczynnik obciążenia mechanicznego przewodu [N/m·mm^2].



Rys. 2. Rozpatrywane warianty ukształtowania powierzchni terenu: a) wariant 1; b) wariant 2; c) wariant 3a; d) wariant 3b; e) wariant 4

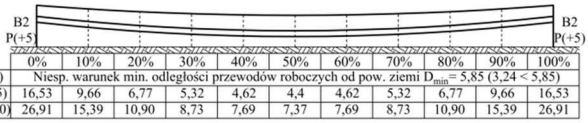


Rys. 3. Ideowy rysunek przęsła: a) poziomego b) pochyłego

4. WYNIKI PRZEPROWADZONEJ ANALIZY

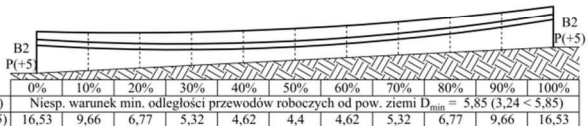
Szukane wartości prądu I_{UBmax} określono w oparciu o napisany skrypt w programie Matlab, wyznaczający wartości odległości decyzji r przy którym ochrona odgromowa jest skuteczna Następnie, dysponując wartościami r i opierając się na zależnościach (1) – (2) wyznaczono szukaną wartość I_{UBmax}. Otrzymane wartości I_{UBmax} w zależności od rozpatrywanego wariantu rzeźby terenu przedstawiono na rysunku 4. Ze względów na niespełnienie kryterium minimalnej odległości przewodów od powierzchni ziemi (zgodnie z wytycznymi normy PN-EN 50341-2-22:2016-04 dla linii o napięciu nominalnym 110 kV odległość ta powinna być nie mniejsza niż 5,85 m) nie we wszystkich rozważanych wariantach można było uwzględnić konstrukcje typu P(0).

a)



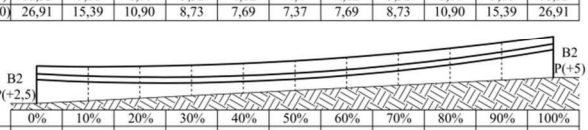
		0%	10%	20%	30%	40%	50%	60%	70%	80%	90%	100%
I_{BUmax} kA	P(0)	Niesp. warunek min. odległości przewodów roboczych od pow. ziemi D_{min} = 5,85 (3,24 < 5,85)										
	P(+5)	16,53	9,66	6,77	5,32	4,62	4,4	4,62	5,32	6,77	9,66	16,53
	P(+10)	26,91	15,39	10,90	8,73	7,69	7,37	7,69	8,73	10,90	15,39	26,91

b)



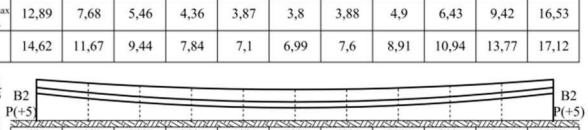
		0%	10%	20%	30%	40%	50%	60%	70%	80%	90%	100%
I_{BUmax} kA	P(0)	Niesp. warunek min. odległości przewodów roboczych od pow. ziemi D_{min} = 5,85 (3,24 < 5,85)										
	P(+5)	16,53	9,66	6,77	5,32	4,62	4,4	4,62	5,32	6,77	9,66	16,53
	P(+10)	26,91	15,39	10,90	8,73	7,69	7,37	7,69	8,73	10,90	15,39	26,91

c)



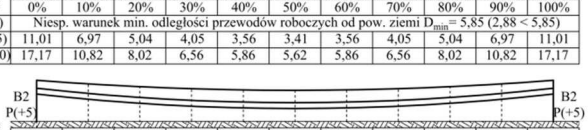
	0%	10%	20%	30%	40%	50%	60%	70%	80%	90%	100%
I_{BUmax} kA	12,89	7,68	5,46	4,36	3,87	3,8	3,88	4,9	6,43	9,42	16,53
D m	14,62	11,67	9,44	7,84	7,1	6,99	7,6	8,91	10,94	13,77	17,12

d)



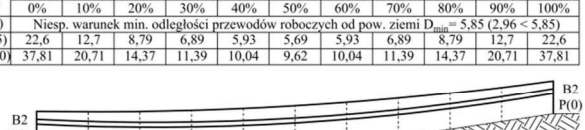
		0%	10%	20%	30%	40%	50%	60%	70%	80%	90%	100%
I_{BUmax} kA	P(0)	Niesp. warunek min. odległości przewodów roboczych od pow. ziemi D_{min} = 5,85 (2,88 < 5,85)										
	P(+5)	11,01	6,97	5,04	4,05	3,56	3,41	3,56	4,05	5,04	6,97	11,01
	P(+10)	17,17	10,82	8,02	6,56	5,86	5,62	5,86	6,56	8,02	10,82	17,17

e)



		0%	10%	20%	30%	40%	50%	60%	70%	80%	90%	100%
I_{BUmax} kA	P(0)	Niesp. warunek min. odległości przewodów roboczych od pow. ziemi D_{min} = 5,85 (2,96 < 5,85)										
	P(+5)	22,6	12,7	8,79	6,89	5,93	5,69	5,93	6,89	8,79	12,7	22,6
	P(+10)	37,81	20,71	14,37	11,39	10,04	9,62	10,04	11,39	14,37	20,71	37,81

f)



	0%	10%	20%	30%	40%	50%	60%	70%	80%	90%	100%
I_{BUmax} kA	9,91	7,03	5,99	5,77	6,15	7,10	8,83	7,69	7,31	7,79	9,91
D m	12,72	11,44	10,88	11,02	11,88	13,44	15,72	13,85	12,8	12,4	12,72

Rys. 4. Wartości prądu I_{UBmax} wzdłuż przęsła dla ukształtowania powierzchni terenu: a) wariant 1; b) wariant 2a; c) wariant 2b; d) wariant 3a; e) wariant 3b; f) wariant 4

Analizując otrzymane wartości prądów I_{UBmax} można zauważyć, że w przypadkach stałego nachylenia powierzchni terenu (warianty 1 – 3) wraz ze wzrostem wysokości zawieszenia przewodów rośnie ryzyko bezpośredniego wyładowania atmosferycznego do przewodu fazowego (największe wartości prądów I_{UBmax} występują na początku i końcu przęseł – na konstrukcjach wsporczych, zaś najmniejsze w punkach o największym zwisie). Dodatkowo można zauważyć symetrię otrzymywanych wyników w przypadkach, gdy na końcach przęsła są rozpatrywane takie same typu konstrukcji wsporczych.

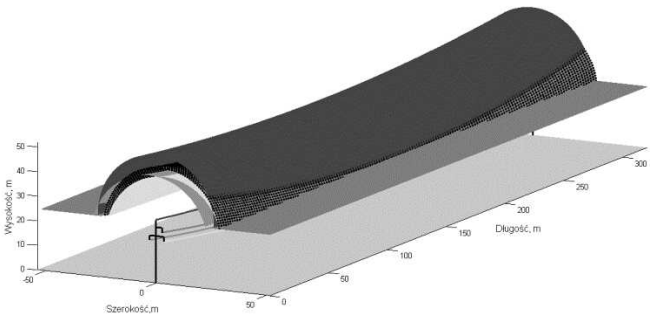
Porównując wyniki wartości prądów I_{UBmax} dla wariantów rzeźby terenu 1 i 2a, zauważyć można, że są takie same, a jest to spowodowane założeniem jednakowej wartości zwisu przewodów fazowych i odgromowych

w środku rozpiętości przęsła. Według [5] dla przęseł pochyłych o różnicy zawieszenia przewodów nie przekraczającej 0,1 rozpiętości przęsła można stosować zależności jak dla przęsła poziomego. W tym przypadku nachylenie wynosi 5%, zatem wartość 0,1 nie została przekroczona. Dlatego wyróżniono wariant 2b, w którym konstrukcje wsporcze na początku i końcu przęsła są różne – P(+2,5) i P(+5).

Duży wpływ ukształtowania rzeźby terenu na otrzymywane wartości prądów I_{UBmax} można zauważyć w wariantach 3a i 3b. Dla wariantu 3a, w którym założono dodatni kierunek nachylenia terenu (patrząc na sylwetkę ukazaną na rysunkach 1 i 4), ukształtowanie terenu zmniejsza ryzyko bezpośredniego wyładowania atmosferycznego do przewodu fazowego. Powiązać to należy z ideą modelu obliczeniowego – punkt przecięcia okręgu wykreślonego z przewodu odgromowego i prostej równoległej do powierzchni ziemi przesuwa się w górę (w odniesieniu do wariantu z płaską rzeźbą terenu), przez co okręgi wykreślone z przewodów fazowych szybciej znajdą się pod krzywą zawierającą prostą równoległą do powierzchni ziemi i łuk wykreślony z przewodu odgromowego. Dla wariantu 3b mamy do czynienia z sytuacją odwrotną – ujemne nachylenie terenu powoduje, że punkt przecięcia przy najbardziej zagrożonej fazie przesuwa się w dół co skutkuje wzrostem ryzyka bezpośredniego wyładowania do przewodu fazowego.

Z kolei w wariancie 4 można zauważyć, że parametry wzniesienia (nachylenie) może doprowadzić do sytuacji, w której największą wartość szczytową prądu wyładowania atmosferycznego, które może uderzyć w przewód fazowy należy określać w miejscu, w którym przewody fazowe są najwyżej zawieszone względem ziemi, a nie w miejscach posadowienia konstrukcji wsporczych.

Ponadto, dla rozpatrywanych wariantów ukształtowania terenu i wybranej wartości szczytowej prądu wyładowania atmosferycznego można stworzyć przestrzenny model elektrogeometryczny (rysunek 5).



Rys. 5. Przestrzenny model elektrogeometryczny dla płaskiej rzeźby terenu (wariant 1) i wartości szczytowej pioruna 4,4 kA

5. PODSUMOWANIE I WNIOSKI KOŃCOWE

W artykule na przykładzie reprezentatywnych przypadków ukształtowania powierzchni terenu dokonano oceny zawodności ochrony odgromowej w ujęciu przestrzennym. Przeprowadzona analiza jednoznacznie wykazała, że ukształtowanie powierzchni terenu, nad którym przechodzi linia napowietrzna, wpływa na rozkład wartości I_{UBmax} wzdłuż przęsła. Ukształtowanie terenu może zarówno zmniejszyć, jak i zwiększyć ryzyko bezpośredniego wyładowania atmosferycznego – odpowiednio zmniejszyć i zwiększyć wartości prądu I_{UBmax}.

W większości rozpatrywanych wariantów najmniejsze wartości prądu I_{UBmax} otrzymano w połowie długości przęsła, a największe w punkcie zawieszenia przewodów na konstrukcjach wsporczych. Dodatkowo dla przypadków, stałego nachylenia powierzchni terenu i tych samych typów konstrukcji na początku i końcu przęsła otrzymywano wartości I_{UBmax} symetryczne względem środka przęsła. Dla przypadków ukształtowania powierzchni terenu bardziej nieregularnych (wariant 4) istnieje potrzeba oceny zawodności ochrony odgromowej wzdłuż całego przęsła.

5. BIBLIOGRAFIA

1. Benesz M.: Zastosowanie metod statystycznych do poprawy jakości dostawy energii elektrycznej. Rozprawy Doktorskie, Monografie - Akademia Górniczo-Hutnicza im. Stanisława Staszica w Krakowie. Wydawnictwa Naukowe AGH, 2017
2. Benesz M., Bąchorek W., Makuch A.: Analiza zawodności ochrony odgromowej linii o napięciu znamionowym 110 kV. Poznan University of Technology Academic Journals. Electrical Engineering, 2018; 94;135 – 148
3. Pacoń R., Benesz M.,: Analiza wpływu rodzaju konstrukcji wsporczej na zawodność ochrony odgromowej w liniach napowietrznych o napięciu 110 kV, Zeszyty Naukowe Wydziału Elektrotechniki i Automatyki Politechniki Gdańskiej, Nr 60, 2018, s. 101-104
4. IEEE Standard 1243-1997: IEEE guide for improving the lightning performance of transmission lines, 1997
5. Kotlarski W.: Sieci elektryczne, WSiP, 1974
6. Kiessling F., Nefzger P., Nolasco J. F., Kaintzyk U.: Overhead power lines. Planning, design, construction. Springer-Verlag Berlin Heidelberg New York, 2003.

SHIELDING FAILURE ANALYSIS IN THREE-DIMENSIONAL ASPECT

The ability to identify of overvoltage in insulation systems significantly affects the efficiency in the coordination of insulation, which increases the reliability of electrical power transmission and distribution systems. The purpose of the paper is to present the problems related to one of the possible scenarios of overvoltages caused by atmospheric discharge, which is shielding failure. In this scenario, despite the ground wires used, it is possible to direct hiss into the phase conductor by atmospheric discharge. Lightning protection conditions may be additionally affected by the lay of the land, which was checked in this paper. The result of the work is the determination of characteristic peak values of the lightning current I_{BUmax}, above which lightning protection is maintained. Calculations were carried out for a typical B2 tower profile with different height and four cases taking into account different terrain.

Keywords: shielding failure, electrogeometric theory, distance of decision, three-dimensional.