

ANALIZA WPŁYWU RODZAJU KONSTRUKCJI WSPORCZEJ NA ZAWODNOŚĆ OCHRONY ODGROMOWEJ W LINIACH NAPIĘTRZNYCH O NAPIĘCIU 110 kV

Radosław PACOŃ, Mariusz BENESZ

AGH Akademia Górniczo-Hutnicza, Katedra Elektrotechniki i Elektroenergetyki
tel.: 12 617-36-53, e-mail: rpacon@interia.pl, mariusz.benesz@agh.edu.pl

Streszczenie: Niezawodność systemów przesyłu i rozdziału energii elektrycznej zależy od postępów w koordynacji izolacji, która jest uwarunkowana między innymi przez zwiększenie możliwości identyfikacji narażeń napięciowych układów izolacyjnych. W pracy przeanalizowany zostanie jeden z możliwych scenariuszy narażeń napięciowych w napowietrznych liniach elektroenergetycznych, a mianowicie zawodność ochrony odgromowej. Rezultatem pracy jest określenie charakterystycznych wartości szczytowych prądu wyładowania atmosferycznego I_{BUmax} , powyżej których ochrona odgromowa jest zachowana. Obliczenia przeprowadzono na wybranych sylwetkach konstrukcji wsporczych (typu przelotowego oraz wykonania specjalnego), stosowanych w liniach o napięciu nominalnym 110 kV. Uwzględniane sylwetki wsporcze (serii B2, C3, P94, Src, Orc i P88) różnią się pod względem geometrii zawieszenia przewodów, wysokości oraz rodzaju wykonania.

Słowa kluczowe: zawodność ochrony odgromowej, odległość decyzji, teoria elektroteometryczna, odległość aktywna.

1. WPROWADZENIE

Układy izolacyjne urządzeń elektrycznych w trakcie pracy poddawane są narażeniom napięciowym, do których można zaliczyć narażenie napięciem roboczym lub przepięciem. O ile układy izolacyjne są w stanie pracować przez pewien czas przy napięciu nieco wyższym od napięcia znamionowego, o tyle w przypadku wystąpienia przepięcia może dojść do ich uszkodzenia. Stąd z punktu widzenia m.in. koordynacji izolacji czy doboru odległości bezpiecznych do najistotniejszych narażeń, które powinny być rozważane są narażenia napięciowe wywołane bezpośrednimi wyładowaniami atmosferycznymi do elementów konstrukcyjnych linii napowietrznej [1]. Dla tego typu narażenia napięciowego rozpatruje się m.in. zawodności ochrony odgromowej [2].

O zawodności ochrony odgromowej mówimy wtedy, gdy pomimo zastosowania przewodu odgromowego może dojść do bezpośredniego wyładowania atmosferycznego do przewodu fazowego. W tym przypadku określa się maksymalną wartość prądu szczytowego wyładowania atmosferycznego I_{BUmax} , powyżej której przyjmuje się, że ochrona odgromowa jest zachowana.

W literaturze można spotkać się z wieloma modelami, na podstawie których przeprowadzić można analizy zawodności ochrony odgromowej zastosowanych przewodów odgromowych w liniach napowietrznych. Opisywane modele można podzielić na trzy grupy [2]: modele oparte na odległości decyzji, modele oparte na odległości aktywnej oraz modele uwzględniające rozkład

statystyczny odległości decyzji wyładowania do powierzchni ziemi. W każdym z tych podejść, analiza możliwości wyładowania atmosferycznego do elementów konstrukcyjnych linii lub do powierzchni ziemi, dokonywana jest na podstawie wzajemnej relacji 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).

W niniejszym artykule przedstawiono wyniki analizy zawodności ochrony odgromowej linii napowietrznej o napięciu nominalnym 110 kV. Głównym celem przeprowadzanych analiz jest określenie charakterystycznej wartości szczytowej prądu wyładowania atmosferycznego (I_{BUmax}). Wartość tą określono w oparciu o modele pierwszej i drugiej grupy. W przeprowadzonych analizach uwzględniono sylwetki konstrukcji wsporczych (serii B2, C3, P94, Src, Orc i P88), które różnią się pod względem geometrii zawieszenia przewodów, wysokości oraz rodzaju wykonania.

2. IDEA MODELI OCENY SKUTECZNOŚCI OCHRONY ODGROMOWEJ UWZGLĘDNIANYCH W ANALIZACH

2.1. Model pierwszy – idea odległości decyzji

Podejścia należące do pierwszego modelu bazują na teorii elektroteometrycznej, która pozwala wyznaczyć odległość decyzji wyładowania atmosferycznego w funkcji wartości szczytowej prądu pioruna. Odległość ta jest definiowana pomiędzy czołem lidera wyładowania piorunowego a elementem, do którego może nastąpić wyładowanie, przy czym metody tej grupy uwzględniają także możliwość uderzenia do powierzchni ziemi. Odległość decyzji wyładowania atmosferycznego, dla każdego z możliwych miejsc wyładowania w pobliżu linii napowietrznej, określić można na podstawie następujących zależności:

$$r_c = A_c \cdot I^B \quad (1)$$

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

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 , B_g –

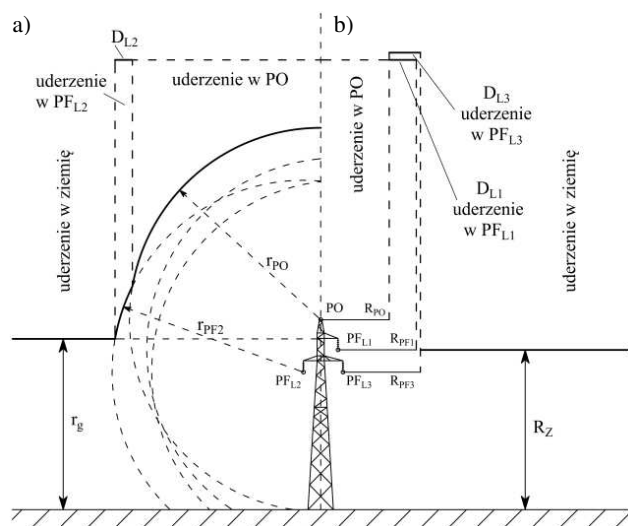
współczynniki liczbowe zależne od zastosowanego podejścia (tab. 1).

Tablica 1. Wartości współczynników liczbowych A_c , A_g , B_c , B_g rozważanych podejść należących do modelu pierwszego

Podejście	Współczynnik liczbowy			
	A_c	B_c	A_g	B_g
Young [3]	27,00	0,32	(*)	0,32
Brown[4]	6,40	0,75	7,10	0,75
IEEE WG [5]	$r_g = k_1 \cdot r_c$ (**)		8,00	0,65
IEEE Std. [6]	$r_g = k_2 \cdot r_c$ (***)		10,00	0,65

(*) $A_g = 27,00$ dla $H_T < 18$ m lub $A_g = 27 \cdot (444/462 - H_T)$ dla $H_T \geq 18$ m, gdzie H_T – wysokość konstrukcji wsporczej [m]
(**) $k_1 = 0,64$ dla $U_N \geq 800$ kV, $k_1 = 0,80$ dla $U_N > 300$ kV, dla pozostałych poziomów napięć $k_1 = 1,00$
(***) $k_2 = 0,36 + 0,17 \cdot \ln(43 - h_{sr})$ dla $h_{sr} < 40$ m lub $k_2 = 0,55$ dla $h_{sr} \geq 40$ m, gdzie h_{sr} – średnia wysokość zawieszenia przewodów

Ideę modelu analizy zawodności ochrony odgromowej, na której bazują podejścia tej grupy, przedstawiono na rysunku 1a. Wykreślone z przewodów fazowych PF i odgromowych PO łuki 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. Przy założeniu pionowego wyładowania liderowego może dojść do uderzenia w przewód fazowy poprzez obszar oznaczony jako D_{L2} . Zakłada się, że ochrona odgromowa jest zachowana dopiero wtedy, gdy okręgi od przewodów fazowych znajdują się pod krzywą powstałą z przecięcia okręgu przewodu odgromowego i prostej równoległej do powierzchni ziemi, co jest równoważne sytuacji, gdy szerokość obszaru D_{L2} będzie równa zero. Otrzymana wartość szczytowa prądu wyładowania atmosferycznego, dla którego zachowana jest ochrona odgromowa jest tożsama z określeniem poszukiwanego prądu I_{BUmax} .



Rys. 1. Graficzna interpretacja modeli obliczeniowych opartych na: a) odległości decyzji; b) odległości aktywnej

2.2. Model drugi – idea odległości aktywnej

Podejścia należące do modelu drugiego pozwalają na ocenę skuteczności ochrony odgromowej linii napowietrznej w oparciu o obliczenie odległości aktywnej wyładowania oddolnego. Odległość aktywna jest związana z obszarem przechwytywania przez lider wyładowania oddolnego lidera wyładowania odgórno w wyniku, czego może dojść do

poziomego uderzenia pioruna. Dodatkowo model ten uwzględnia wysokość zawieszenia przewodów i wysokość konstrukcji. Wartości odległości aktywnej wyładowania atmosferycznego do poszczególnych typów przewodów zależą od wysokości ich zawieszenia, zaś w przypadku wartości odległości aktywnej do powierzchni ziemi zakłada się, że jest równa wysokości zawieszenia przewodu fazowego, dla którego dokonuje się oceny zawodności ochrony odgromowej. Odległość aktywna określana jest na podstawie następującej zależności:

$$R = A_1 \cdot h^{C_1} \cdot I^{B_1} + A_2 \cdot h^{C_2} \quad (3)$$

gdzie: R – odległość aktywna [m], I – wartość szczytowa prądu wyładowania atmosferycznego [kA], h – wysokość zawieszenia przewodu [m], A_1 , C_1 , B_1 , A_2 , B_2 – współczynniki liczbowe zależne od zastosowanego podejścia (tab. 2).

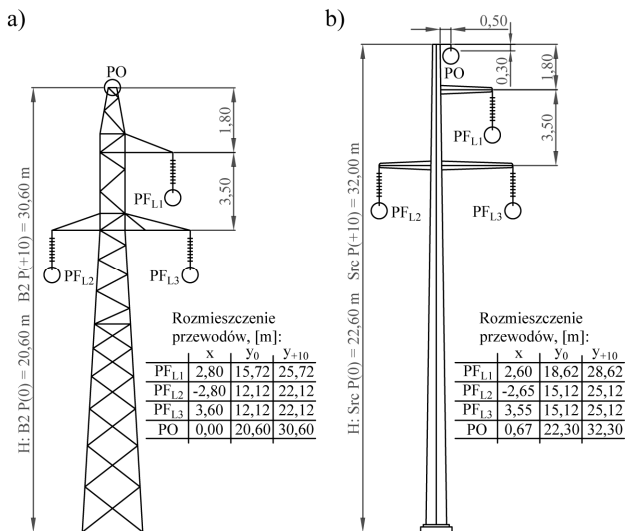
Tablica 2. Wartości współczynników liczbowych A_1 , C_1 , B_1 , A_2 , B_2 rozważanych podejść należących do modelu drugiego

Podejście	Współczynnik liczbowy				
	A_1	C_1	B_1	A_2	B_2
Eriksson [7]	0,67	0,6	0,74	0,00	0,00
Rizk [8]	1,57	0,45	0,69	0,00	0,00

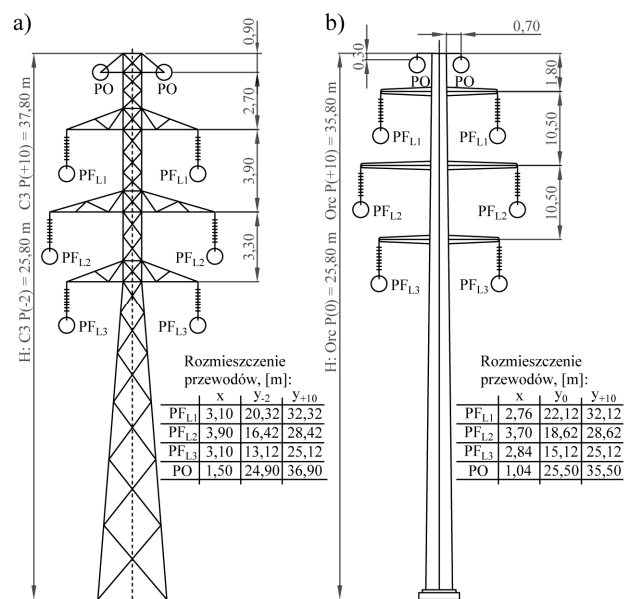
Ideę modelu analizy zawodności ochrony odgromowej, na której bazują podejścia tej grupy przedstawiono na rysunku 1b. Z przewodów fazowych i odgromowych wykreślono poziome odcinki o długościach R_{PF1} , R_{PF3} i R_{PO} w zależności od wysokości zawieszenia przewodu oraz zaznaczono poziomą prostą w odległości R_Z od powierzchni ziemi (przypadek oceny skuteczności ochrony odgromowej dla przewodu PF_{L1} – fazy L_1). W tym przypadku widoczna jest możliwość uderzenia wyładowania atmosferycznego w przewód PF_{L1} lub PF_{L3} , a szerokość zawodności ochrony odgromowej oznaczono na rysunku jako D_{L1} i D_{L3} . Zakłada się, że ochrona odgromowa jest zachowana w sytuacji, gdy szerokość obszaru D_L (dla danego przewodu fazowego) będzie równa zero (następuje zrównanie się odległości aktywnej przewodu odgromowego z odległością będącą połączeniem odległości aktywnej danego przewodu fazowego i poziomej odległości zawieszenia przewodu na konstrukcji wsporczej). Otrzymana wartość szczytowa prądu wyładowania atmosferycznego, dla którego zachowana jest ochrona odgromowa jest tożsama z określeniem poszukiwanego prądu I_{BUmax} .

3. ANALIZOWANE KONSTRUKCJE WSPORCZE

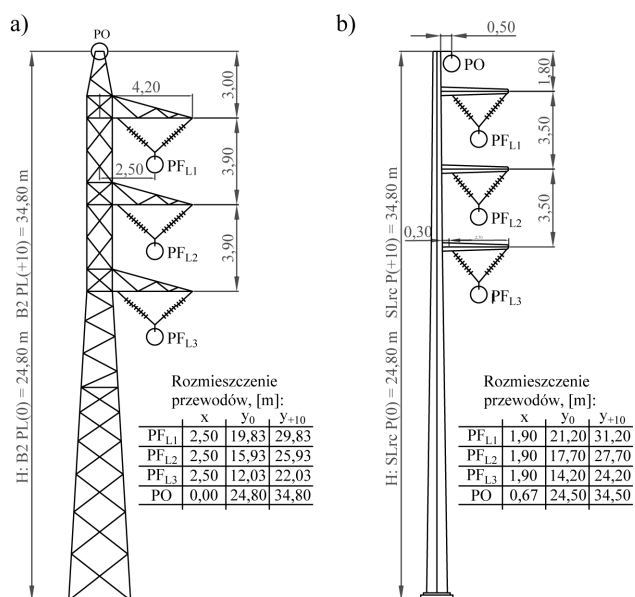
Analizę zawodności ochrony odgromowej, z wykorzystaniem zdefiniowanych wcześniej modeli obliczeniowych, przeprowadzono dla spotykanych konstrukcji wsporczych linii napowietrznych o napięciu nominalnym 110 kV. Wybrane sylwetki wraz z danymi dotyczącymi geometrii zawieszenia przewodów przedstawiono na rysunkach 2 – 5. Analizy dotyczyły konstrukcji wsporczych typu przelotowego (linie jedno- i dwutorowe), typu leśnego (linie jednotorowe) oraz konstrukcji specjalnych (linie dwutorowe). W każdym przypadku analizowane były po dwie konstrukcje w wykonaniu kratowym i rurowym oraz uwzględniono dwie wysokości konstrukcji wsporczych (z wyłączeniem konstrukcji specjalnych).



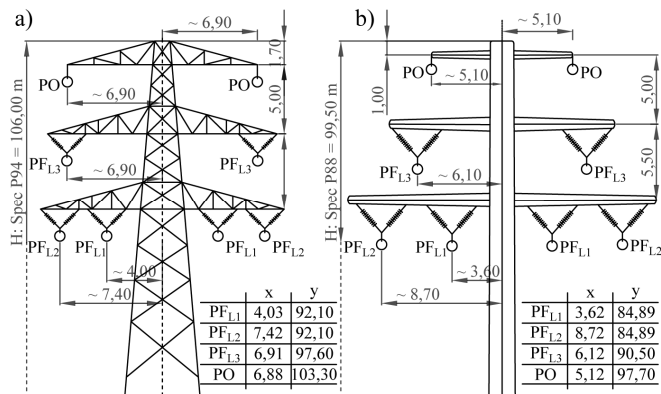
Rys. 2. Analizowane konstrukcje wsporcze linii 1-torowych typu przelotowego: a) serii B2; b) serii Src



Rys. 3. Analizowane konstrukcje wsporcze linii 2-torowych typu przelotowego: a) serii C3; b) serii Orc



Rys. 4. Analizowane konstrukcje wsporcze linii 1-torowych typu leśnego: a) serii B2; b) serii Src



Rys. 5. Analizowane specjalne konstrukcje wsporcze linii 2-torowych: a) typu P94P; b) typu P88

4. WYNIKI PRZEPROWADZONEJ ANALIZY ZAWODNOŚCI OCHRONY ODGROMOWEJ

Analizę zawodności ochrony odgromowej dokonano dla zdefiniowanych wcześniej dwóch modeli obliczeniowych. W każdym zastosowanym modelu (podejściu), szukana wartość szczytowa prądu I_{BUmax} określona została w oparciu o napisany skrypt w programie Matlab. Nadrzędnym celem napisanego skryptu było określenie (w zależności od rozpatrywanego podejścia) wartości odległości decyzji r lub odległości aktywnej R , przy których ochrona odgromowa jest skuteczna. Dokonano tego poprzez implementację warunku skutecznej ochrony odgromowej dla danego podejścia opartego na jej graficznej interpretacji (szerokość obszaru oznaczona na rysunku 1 jako D_L równa zero). Następnie, dysponując wartościami r lub R oraz opierając się na zależnościach (1) – (3) określono szukaną wartość I_{BUmax} . Otrzymane wartości I_{BUmax} zestawiono w tabelicy 3.

5. PODSUMOWANIE I WNIOSKI KOŃCOWE

W niniejszym artykule na przykładzie wybranych sylwetek konstrukcji wsporczych linii napowietrznej 110 kV dokonano oceny zawodności ochrony odgromowej. W analizach uwzględniono podejścia należące do dwóch modeli oceny skuteczności ochrony odgromowej (jeden oparty na odległości decyzji, zaś drugi na odległości aktywnej). Wyniki otrzymanych wartości prądów I_{BUmax} zależą w głównej mierze od wysokości konstrukcji wsporczej, geometrii rozmieszczenia przewodów oraz przyjętego podejścia.

Dla sylwetek wyższych trudniej o zachowanie ochrony odgromowej tzn. prądy I_{BUmax} osiągają większe wartości niż dla sylwetek niższych. Dodatkowo, niezależnie od podejścia, przewodem najbardziej narażonym na wyładowanie atmosferyczne (o największych wartościach I_{BUmax}) jest przewód fazy najbliższej położony względem przewodu odgromowego.

Kolejnym czynnikiem, który był analizowany to sposób wykonania konstrukcji. Dla rozważanych par sylwetek konstrukcji wsporczych (w wykonaniu kratowym i rurowym) w większości przypadków otrzymano zbliżone wartości I_{BUmax} (niezależnie od przyjętego postępowania). Wyjątek stanowią konstrukcje specjalne, gdzie zaobserwować można większe różnice w geometrii zawieszania przewodów niż dla pozostałych par rozpatrywanych konstrukcji wsporczych.

Tablica 3. Wartości szczytowe prądu wyładowania atmosferycznego I_{BUmax} , kA

Sylwetka	Wysokość	Model pierwszy				Model drugi	
		Young	Brown	IEEE WG	IEEE Std.	Eriksson	Rizk
B2 P(0)	20,60	2,47	11,61	17,36	8,78	7,74	7,43
B2 P(+10)	30,60	10,54	20,93	34,18	22,71	9,82	10,57
Src P(0)	22,60	2,95	12,2	18,09	10,02	7,32	7,19
Src P(+10)	32,00	11,04	20,85	33,51	24,99	9,08	9,88
B2 PL(0)	24,80	3,64	13,18	19,6	10,84	7,25	7,25
B2 PL(+10)	34,80	12,34	21,61	34,76	25,4	8,86	9,75
SLrc P(0)	24,80	2,79	11,51	16,41	9,69	5,84	5,78
SLrc P(+10)	34,80	9,21	18,71	29,01	22,36	7,09	7,72
C3 P(0)	25,80	2,03	9,77	13,38	8,25	4,46	4,32
C3 P(+10)	37,80	8,04	17,3	25,81	22,69	5,62	6,07
Orc P(0)	25,80	4,57	14,48	21,92	13,63	7,63	7,77
Orc P(+10)	35,80	14,61	23,23	37,71	35,6	9,22	10,28
Spec P94	106,00	67,39	40,7	65,94	96,17	0,68	0,79
Spec P88	99,50	158,28	55,68	98,01	213,86	7,09	9,63

Ostatnim czynnikiem, wpływającym na wartości I_{BUmax} jest przyjęty model. W tym przypadku uwidacznia się różnica w tworzeniu danego modelu oceny ochronny odgromowej. W podejściach modelu pierwszego otrzymane wyniki w głównej mierze zależą od współczynników liczbowych (A_x i B_x) – im większy parametr A_x , a mniejszy B_x tym niższe wartości I_{BUmax} . Dla podejść modelu drugiego otrzymane wyniki są zbliżone do siebie, ale zdecydowanie mniejsze niż dla podejść modelu pierwszego.

Dokonana analiza pokazała możliwości i problemy w ocenie zawodności ochrony odgromowej, ważnej z punktu widzenia m.in. koordynacji izolacji.

6. 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. Young F.S., Clayton J.M., Hileman A.R.: Shielding of Transmission Lines, IEEE Trans. On PA&S, Vol.S82, 1963, s. 132 – 154
4. Brown G.W., Whitehead E.R.: Field and Analytical Studies of Transmission Line Shielding – II, IEEE Trans. On PA&S, Vol. 88, 1969, s. 617 – 626
5. IEEE Working Group on Estimating Lightning Performance of Transmission Lines: A Simplified Method for Estimating Lightning Performance of Transmission Lines, IEEE Trans. Vol. PAS-104 No.4, April 1985, s. 919 – 932
6. IEEE Standard 1243-1997: IEEE guide for improving the lightning performance of transmission lines, 1997
7. Eriksson A.J.: An Improved Electrogeometric Model for Transmission Line Shielding Analysis, IEEE Trans. PWRD, Vol. 2, July 1987, s. 871 – 886
8. Rizk F.A.M.: Modeling of Transmission Line Exposure to Direct Lightning Strokes, IEEE Trans. On PWRD, Vol. 5, No.4, October 1990, s. 1983 – 1997

ANALYSIS OF THE INFLUENCE OF THE TOWER TYPE ON SHIELDING FAILURE IN 110 kV OVERHEAD POWER LINE

The reliability of electrical power transmission and distribution systems depends on progress in the coordination of insulation, which depends, among other things, on increasing the ability to identify risks of overvoltage in insulation 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 hit into the phase conductor by atmospheric discharge.

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 on selected profiles of tower (lattice and tubular), used in overhead power lines with rated voltage of 110 kV and taking into account two types of approaches (base on distance of decision or on active distance). The tower profiles (B2, C3, P94, Src, Orc and P88 series) differ in terms of conductors suspension geometry, height and type of construction.

Keywords: shielding failure, electrogeometric theory, distance of decision, active distance.