

Mariusz BENESZ\*, Wojciech BĄCHOREK\*, Andrzej MAKUCH\*

## ANALIZA ZAWODNOŚCI OCHRONY ODGROMOWEJ LINII O NAPIĘCIU ZNAMIONOWYM 110 kV

W układach elektroenergetycznych elementami najbardziej narażonymi na wyładowania atmosferyczne, ze względu na swoją rozległość, są linie napowietrzne. Przy analizie tego typu narażeń linii elektroenergetycznych rozważa się m.in. uderzenie bezpośrednie pioruna w przewód fazowy. W tym przypadku opierając się jedynie na geometrii zawieszenia przewodów (fazowych i odgromowych) na analizowanej konstrukcji wsporczej można określić maksymalną wartość szczytową prądu pioruna, który może uderzyć w przewód fazowy. W referacie umieszczono wyniki analizy zawodności ochrony odgromowej dla sylwetek konstrukcji wsporczych, typu przelotowego, stosowanych w liniach o napięciu znamionowym 110 kV: serii B2 i serii SL24. W przeprowadzonych analizach uwzględniono różne podejścia wiążące wartość szczytową prądu wyładowania atmosferycznego z odległością do elementów konstrukcji wsporczej, jak i do powierzchni ziemi.

SŁOWA KLUCZOWE: zawodność ochrony odgromowej, teoria elektrogeometryczna, wyładowania atmosferyczne, odległość decyzji, odległość aktywna.

### 1. WPROWADZENIE

Wśród zakłóceń w pracy systemu elektroenergetycznego, jednym z najistotniejszych (z punktu widzenia np. koordynacji izolacji [2, 9, 11]) są narażenia napięciowe wywołane bezpośrednim wyładowaniem atmosferycznym do elementów konstrukcyjnych linii napowietrznej. Przy wyładowaniach bezpośrednich, rozpatruje się w zasadzie dwa zagadnienia: zawodność ochrony odgromowej oraz zjawisko przeskoaku odwrotnego. Pierwszy przypadek dotyczy sytuacji, w której pomimo zastosowanych przewodów odgromowych istnieje możliwość wyładowania atmosferycznego do przewodu fazowego. Z kolei drugi przypadek dotyczy sytuacją utraty wytrzymałości elektrycznej zastosowanego układu izolacyjnego. Przy analizie opisywanego narażenia wyznacza się zatem dwie charakterystyczne wartości prądu szczytowego wyładowania atmosferycznego: maksymalną wartość prądu wyładowania atmosferycznego, który może uderzyć w przewód fazowy ( $I_{UB\_max}$ ) oraz minimalną wartość prądu pioruna, który powo-

---

\* AGH Akademia Górniczo-Hutnicza

duje wystąpienie zjawiska przeskoaku odwrotnego ( $I_{PO_{min}}$ ). Pomiędzy tymi wartościami zakłada się, że zastosowana ochrona odgromowa spełnia swoje zadania.

W literaturze można spotkać wiele modeli, na podstawie których można dokonać analizy zawodności ochrony odgromowej linii napowietrznej, w zależności od spodziewanej wartości szczytowej prądu wyładowania atmosferycznego. Opisywane modele można podzielić na trzy grupy. Pierwszą grupę stanowią modele (proponowane m.in. przez [1, 4, 6, 7, 8, 10]) opierające się na teorii elektrometrycznej. W podejściach tych, analizy możliwości wyładowania atmosferycznego do elementów konstrukcyjnych linii lub do powierzchni ziemi, dokonywane są na podstawie wzajemnej relacji odległości decyzji. Odległość ta jest określana na podstawie spodziewanej wartości szczytowej prądu wyładowania atmosferycznego dla każdego z możliwych miejsc wyładowania (do przewodów fazowych i odgromowych oraz powierzchni ziemi). W grupie tej nie uwzględnia się zależności odległości decyzji od wysokości zawieszenia przewodów lub konstrukcji. Odstępstwem od tej reguły jest model IEEE Std. [6] uwzględniający wpływ średniej wysokości zawieszenia przewodów na odległość decyzji wyładowania do powierzchni ziemi. Drugą grupę stanowią modele (proponowane m.in. przez [5, 12]) uwzględniające wpływ wysokości obiektów na możliwe miejsca wyładowania. Podejścia z tej grupy opierają się na aktywnej odległości zamiast odległości decyzji, jak to ma miejsce w pierwszej grupie. Aktywna odległość jest związana z obszarem przechwytywania przez lider wyładowania oddolnego lidera wyładowania odgórnego. Ostatnią grupę stanowi model (zapropozowany przez [11]) uwzględniający statystyczny aspekt opisywanego zagadnienia. Podejście to definiuje obszar przechwytywania (analogia do podejść z drugiej grupy) opierając się na rozkładzie statystycznym odległości decyzji wyładowania do powierzchni ziemi (analogia do podejść z pierwszej grupy).

W niniejszym artykule przedstawiono wyniki analizy zawodności odgromowej linii napowietrznych o napięciu znamionowym 110 kV. Głównym celem przeprowadzanych analiz jest określenie maksymalnych wartości szczytowych wyładowania atmosferycznego ( $I_{BU_{max}}$ ), przy którym mimo zastosowania środków ochrony odgromowej (przewodów odgromowych) może dojść do wyładowania do przewodów fazowych. Wartość  $I_{BU_{max}}$  określono w oparciu o wybrane podejścia należące do pierwszej i drugiej grupy modeli. W przeprowadzonych analizach uwzględniono dwa sposoby geometrii zawieszenia przewodów na konstrukcji wsporczej: układ trójkątny przewodów na konstrukcji wsporczej serii B2 (typu przelotowego) oraz układ pionowy przewodów na konstrukcji wsporczej serii SL24 (typu przelotowego).

## 2. MODELE WYZNACZANIA ZAWODNOŚCI OCHRONY ODGOMOWEJ

W literaturze można spotkać się z wieloma modelami, na podstawie przeprowadza się analizy zawodności ochrony. Analiza ta powiązana jest z określeniem maksymalnej wartości szczytowej prądu wyładowania atmosferycznego, który może uderzyć bezpośrednio w przewód fazowy, pomimo zastosowanej ochrony odgromowej. Modele te można podzielić na trzy grupy: modele bazujące na odległości decyzji (grupa pierwsza), modele bazujące na odległości aktywnej (grupa druga) oraz modele oparte na podejściu statystycznym (grupa trzecia).

### 2.1 Idea modeli należących do pierwszej grupy

Modele należące do tej grupy, oparte są na tzw. odległości decyzji wyładowania atmosferycznego. Odległość ta definiowana jest jako odległość między położeniem czoła lidera podążającego w stronę ziemi (w krytycznym momencie wyboru miejsca uderzenia) a elementem obiektu, do którego nastąpi wyładowanie. Niezależnie od zastosowanego modelu z tej grupy, w każdym z nich zakłada się zależność, wiążącą odległość decyzji z wartością szczytową prądu wyładowania atmosferycznego, w postaci:

$$r = A \cdot I^B \quad (1)$$

gdzie:  $r$  – odległość decyzji [m],  $I$  – wartość szczytowa prądu wyładowania atmosferycznego [kA],  $A$ ,  $B$  – współczynniki, których wartość zależy od zastosowanego modelu (tabela 1).

Tabela 1. Współczynniki stosowane w podejściach należących do pierwszej grupy.

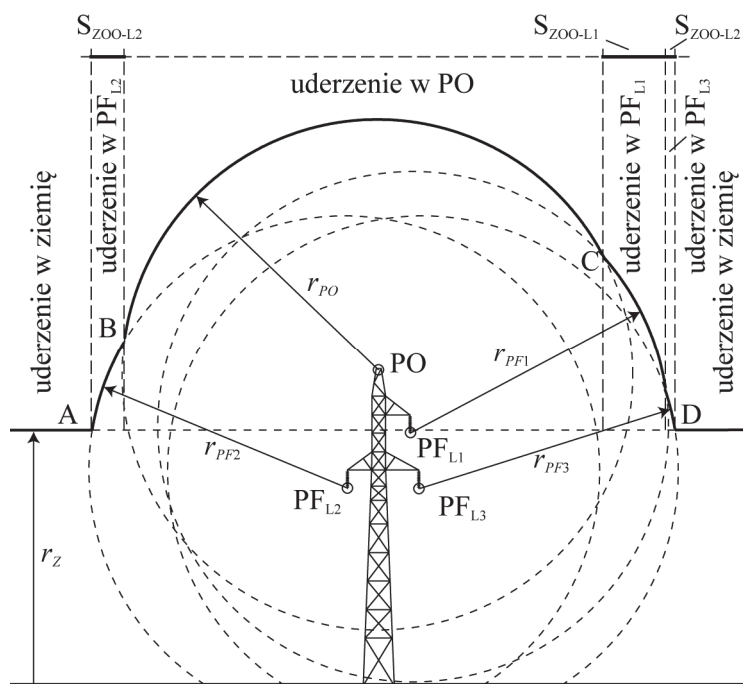
Model	Współczynnik		
	$A$	$B$	$k$
Amstrong-Whitehead [1]	6,72	0,80	0,9
Brown-Whitehead [4]	7,10	0,75	0,9
Love [10]	10,0	0,65	1,0
IEEE WG [7, 8]	8,00	0,65	0,64 dla $U_N \geq 800$ kV 0,80 dla $U_N > 300$ kV 1,00 dla pozostałych napięć
IEEE Std. [6]	10,0	0,65	$0,36+0,17 \cdot \ln(43-h_{sr})$ dla $h_{sr} < 40$ m 0,55 dla $h_{sr} \geq 40$ m

W modelach z tej grupy, zakłada się równe wartości długości decyzji dla wyładowań atmosferycznych do przewodów fazowych i odgromowych oraz mniejsze wartości promienia decyzji (w większości przypadków) dla wyładowań do powierzchni ziemi:

$$r_{PF} = r_{PO} = \frac{r_Z}{k} = r \quad (2)$$

gdzie:  $r_{PF}$ ,  $r_{PO}$ ,  $r_Z$  – odległość decyzji wyładowania odpowiednio do przewodu fazowego, przewodu odgromowego i powierzchni ziemi [m],  $k$  – współczynnik, którego wartość zależy od zastosowanego modelu (tabela 1).

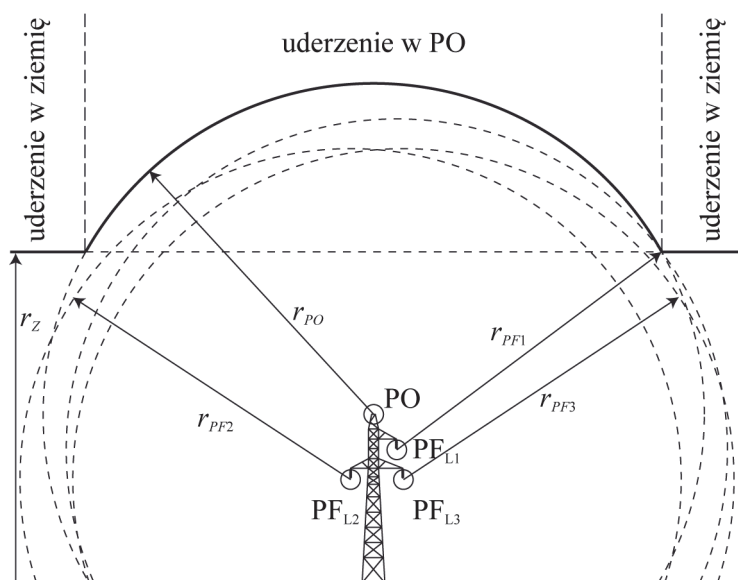
Ideę analizy zawodności ochrony odgromowej, na której bazują podejścia tej grupy przedstawiono na rysunku 1.



Rys. 1. Graficzna interpretacja zawodności ochrony odgromowej w modelach pierwszej grupy

Tworząc elektrogeometryczny model ochrony odgromowej wykreśla się okręgi o środkach w punktach zawieszenia przewodów (odgromowych i fazowych) o promieniach  $r_{PF}$  i  $r_{PO}$  oraz prostą równoległą do powierzchni ziemi na wysokości  $r_Z$ . Ochrona odgromowa jest zachowana w sytuacji, w której okręgi wykreślone z przewodów fazowych znajdują się w pod krzywą powstałą z połączenia okręgu wykreślonego z przewodu odgromowego i prostej równoległej do powierzchni ziemi (rys. 2). W przypadku zawodności ochrony odgromowej,

istnieje możliwość wyładowania atmosferycznego do przewodu fazowego (szerokość zawadności ochrony odgromowej oznaczono na rysunku 1, jako  $S_{ZOO}$ ).



Rys. 2. Graficzna interpretacja skutecznej ochrony odgromowej w modelach pierwszej grupy

Chcąc wyznaczyć wartość maksymalnego prądu szczytowego wyładowania atmosferycznego  $I_{BU\_max}$ , który może uderzyć bezpośrednio w przewód fazowy pomimo zastosowanej ochrony odgromowej, szerokość zawadności ochrony odgromowej musi być równa zero. Sytuacja taka jest równoznaczna z pokryciem się punktów A i B oraz C i D na rysunku 1.

## 2.2 Idea modeli należących do drugiej grupy

Modele należące do tej grupy, oparte są na tzw. aktywnej odległości wyładowania oddolnego. Odległość ta związana jest z obszarem, w którym może dojść do przechwytywania przez lider wyładowania oddolnego lidera podążającego w stronę powierzchni ziemi. Niezależnie od stosowanego podejścia z tej grupy, w każdej z nich zakłada zależność, wiążącą aktywną odległość z wartością szczytową prądu wyładowania atmosferycznego oraz wysokością zawieszenia przewodów, w postaci:

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

gdzie:  $R$  – aktywna odległość [m],  $I$  – wartość szczytowa prąd wyładowania atmosferycznego [kA],  $h$  – wysokość zawieszenia przewodu,  $A_1$ ,  $C_1$ ,  $B_1$ ,  $A_2$ ,  $C_2$  – współczynniki, których wartość zależy od zastosowanego modelu (tabela 2).

Tabela 2. Współczynniki stosowane w wybranych modelach drugiej grupy.

Model	Współczynnik				
	$A_1$	$C_1$	$B_1$	$A_2$	$B_2$
Eriksson [5]	0,670	0,60	0,74	0,00	0,00
Rizk [12]	1,570	0,45	0,69	0,00	0,00
Borghetti [3]	0,028	1,00	1,00	3,00	0,60

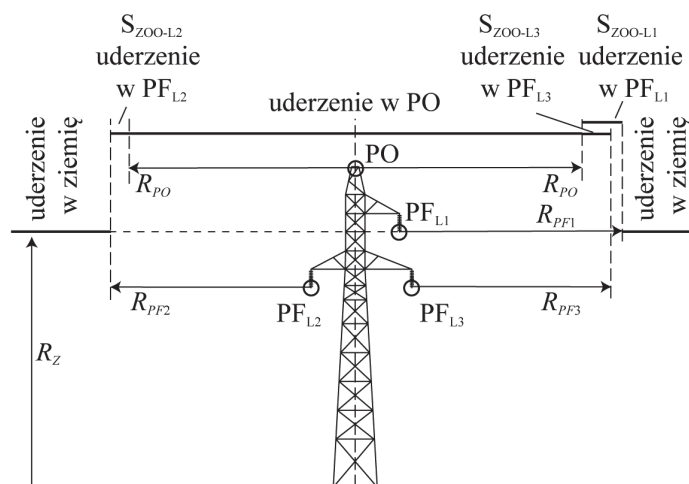
W podejściach z tej grupy, zakłada się różne wartości aktywnej długości dla wyładowań atmosferycznych do przewodów fazowych i odgromowych (wynikającej z zależności promienia od wysokości zawieszenia danego przewodu) oraz zakłada się wartość aktywnej długości dla wyładowań do powierzchni ziemi równy wysokości zawieszenia przewodu fazowego, dla którego określana jest zawodność ochrony odgromowej:

$$R_{PF} \neq R_{PO} = f(h) \quad (4)$$

$$R_Z = h_{PF}$$

gdzie:  $R_{PF}$ ,  $R_{PO}$ ,  $R_Z$  – aktywna odległość wyładowania odpowiednio do przewodu fazowego, przewodu odgromowego i powierzchni ziemi [m],  $h$  – wysokość zawieszenia danego przewodu.

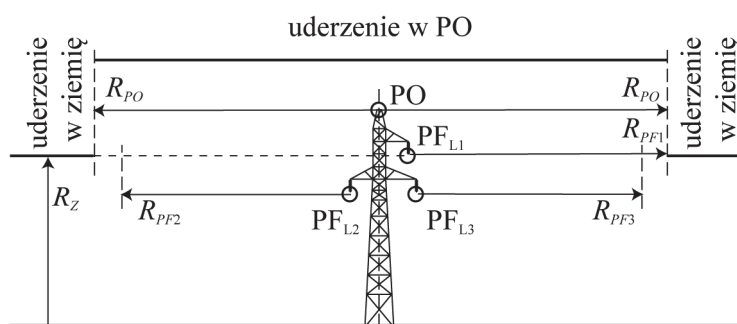
Ideę analizy zawodności ochrony odgromowej, na której bazują praktycznie wszystkie podejścia tej grupy przedstawiono na rysunku 3.



Rys. 3. Graficzna interpretacja zawodności ochrony odgromowej – model Rizk [12]

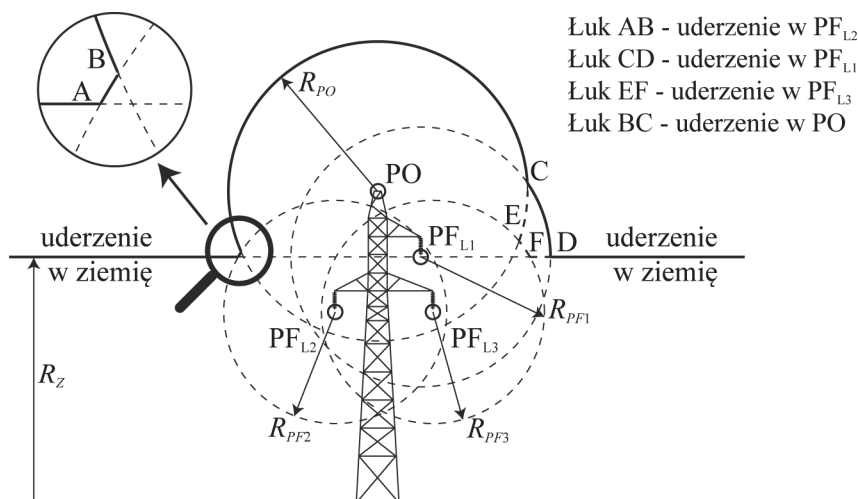
Tworząc model ochrony odgromowej wykreśla się poziome odcinki o początkach w punktach zawieszenia przewodów (odgromowych i fazowych) i dłu-

gościach  $R_{PF}$  i  $R_{PO}$  oraz prostą równoległą do powierzchni ziemi na wysokości  $R_Z$ . Ochrona odgromowa jest zachowana w sytuacji, w której odcinki wykreślone z przewodów fazowych znajdują się w pod krzywą powstałą z połączenia odcinka wykreślonego z przewodu odgromowego i prostej równoległej do powierzchni ziemi (rys. 4). Z kolei zawodność ochrony odgromowej jest w sytuacji, w której istnieje możliwość wyładowania atmosferycznego do przewodu fazowego (szerokość zawodności ochrony odgromowej oznaczono na rysunku 3, jako  $S_{Z00}$ ).



Rys. 4. Graficzna interpretacja skutecznej ochrony odgromowej – model Rizk [12]

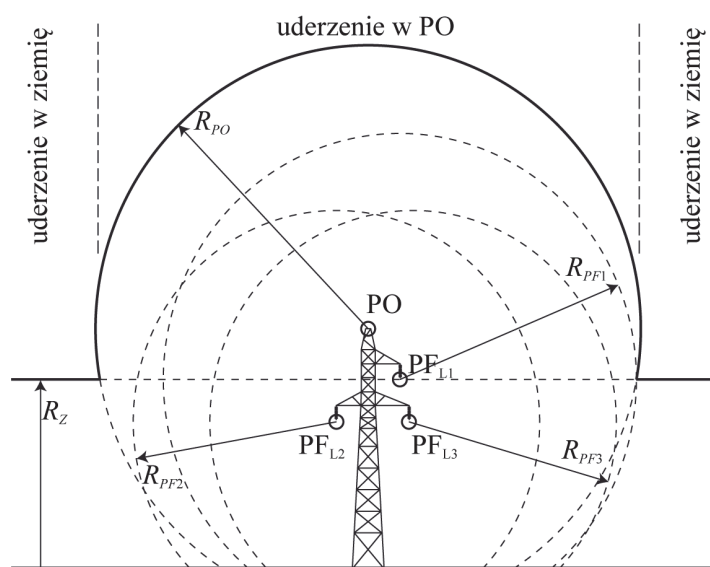
Odstępstwem od tej idei jest podejście zaproponowane przez Erikssona [5], które zostało przedstawione na rysunku 5.



Rys. 5. Graficzna interpretacja zawodności ochrony odgromowej – model Eriksson [5]

Różnica wynika ze sposobu określania szerokości obszaru zawodności ochrony odgromowej – w modelu Rizk jest on definiowany jako odległość pozioma będąca różnicą aktywnych promieni  $R_{PO}$  i  $R_{PF}$  (rys. 3), zaś w modelu Erikksón jest to długość łuku (rys. 5).

Tworząc model ochrony odgromowej w podejściu Erikksóna [5] postępuje się analogicznie, jak w przypadku podejść pierwszej grupy, a zachowana ochrona odgromowa jest w sytuacji, w której okręgi wykreślone z przewodów fazowych znajdują się w pod krzywą powstałą z połączenia okręgu wykreślonego z przewodu odgromowego i prostej równoległej do powierzchni ziemi (rys. 6).



Rys. 6. Graficzna interpretacja skutecznej ochrony odgromowej – model Eriksson [5]

### 2.3 Idea modeli należących do trzeciej grupy

Podejście proponowane przez [11] sugeruje uwzględnienie statystycznej natury opisywanego zagadnienia. Podejście to definiuje obszar przechwytywania (analogia do podejść z drugiej grupy) opierając się na rozkładzie statystycznym odległości decyzji wyładowania do powierzchni ziemi (analogia do podejść z pierwszej grupy), w postaci:

$$\left( \frac{R}{R_z}, \sigma \right) = c_1 \cdot \ln\left(\frac{h}{R_z}\right) + c_2 \quad (4)$$

gdzie:  $R$  – aktywna odległość wyładowania do przewodu fazowego lub odgromowego [m],  $R_z$  – aktywna odległość wyładowania do powierzchni ziemi [m],  $\sigma$



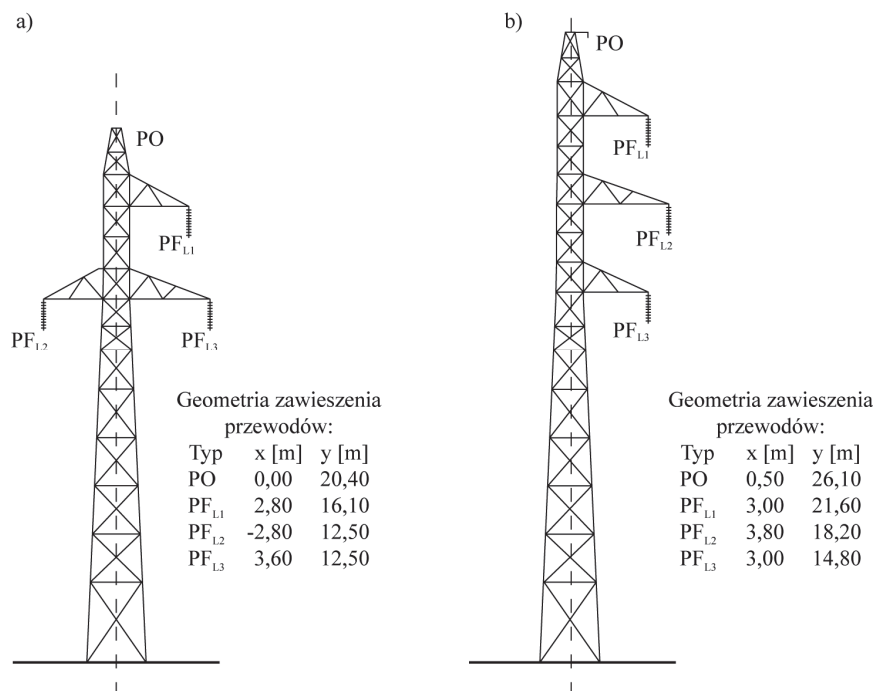
– odchylenie standardowe (tabela 2),  $c_1$  i  $c_2$  – współczynniki zależne od biegunowości wyładowania (tabela 2).

Tabela 3. Współczynniki stosowane w modelach statystycznych [11].

Biegunowość władowania	Współczynnik		$\sigma$ [%]
	$c_1$	$c_2$	
Dodatnia	0,235	0,90	$1,9 \cdot (h/R_Z)^{-0,75}$
Ujemna	0,272	1,24	$5,0 \cdot (h/R_Z)^{-0,43}$

### 3. ANALIZOWANE KONSTRUKCJE WSPORCZE

Sylwetki konstrukcji wsporczej wykorzystane w przykładzie obliczeniowym zostały przedstawione na rysunku 7. Dodatkowo na tym rysunku, zamieszczono najważniejsze parametry (geometrię zawieszenia przewodów) z punktu widzenia przeprowadzanych analiz. Analiza dotyczy konstrukcji wsporczych stosowanych w liniach napowietrznych 1-torowych o napięciu znamionowym 110 kV, uwzględniające spotykane układy zawieszenia przewodów na konstrukcjach (trójkątny i pionowy).



Rys. 7. Analizowane sylwetki konstrukcji wsporczej typu przelotowego: a) serii B2; b) serii SL24

#### 4. WYNIKI PRZEPROWADZONEJ ANALIZY ZAWODNOŚCI OCHRONY ODGROMOWEJ

Analizy zawodności ochrony odgromowej linii napowietrznej o napięciu znamionowym 110 kV, dokonano uwzględniając wybrane podejścia należące do pierwszej i drugiej grupy modeli.

W każdym zastosowanym modelu wartość prądu  $I_{BU\_max}$  określono dla każdego przewodu fazowego z osobna (przy założeniu ewentualnego ominięcia przez wyładowanie atmosferyczne przewodu fazowego wyżej zawieszono). Wartość ta została określona w oparciu o napisany skrypt w programie Matlab.

Nadrzędnym celem napisanego skryptu było określenie (w zależności od rozpatrywanego podejścia) wartości odległości decyzji  $r$  lub aktywnej odległości  $R$ , przy których ochrona odgromowa jest skuteczna. Dokonano tego poprzez implementację warunku skutecznej ochrony odgromowej dla danego podejścia opartego na jej graficznej interpretacji. Opierając się na interpretacjach ochrony odgromowej (przedstawione na rysunku 2, rysunku 4 i rysunku 6, odpowiednio dla modeli z pierwszej grupy, podejścia zaproponowanego przez Rizka i podejścia zaproponowanego przez Erikssona) określono, dla każdego rozpatrywanego modelu graficzne warunki skuteczności odgromowej:

- dla modeli z pierwszej grupy: współrzędne punktów przecięcia prostej  $y = r_z$  i okręgiem o środku  $(x_{PO}, y_{PO})$  i promieniu  $r_{PO}$  muszą być tożsame ze współrzędnymi punktów przecięcia okręgu o środku  $(x_{PO}, y_{PO})$  i promieniu  $r_{PO}$  i okręgu o środku  $(x_{PF}, y_{PF})$  i promieniu  $r_{PF}$ ;
- dla modeli z drugiej grupy (z wyłączeniem podejścia zaproponowanego przez Erikssona): długość aktywnej odległości dla przewodu odgromowego  $R_{PO}$  musi być większa od długości aktywnej odległości dla przewodu fazowego  $R_{PF}$  o poziomą różnicę w geometrii ich zawieszenia.

W przypadku podejścia zaproponowanego przez Erikssona, graficzne kryterium jest analogiczne go kryterium podejść pierwszej grupy, zamieniając odległość decyzji ( $r_{PO}$  i  $r_{PF}$ ) na aktywną odległość ( $R_{PO}$  i  $R_{PF}$ ).

Dysponując wartościami odległości decyzji  $r$  lub aktywnej odległości  $R$ , przy których mamy skuteczną ochronę odgromową, oraz opierając się na zależnościach (1) ÷ (4) określono szukaną wartość szczytową prądu  $I_{BU\_max}$ .

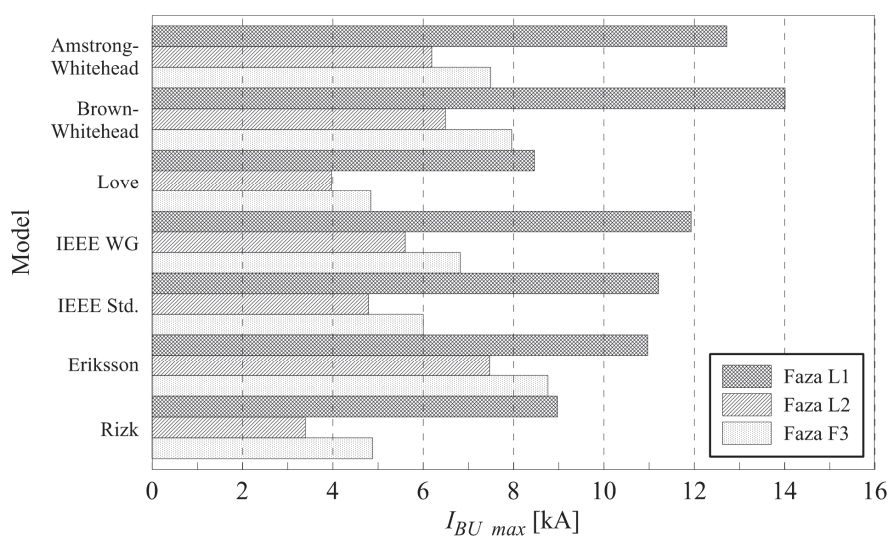
Dla każdej rozpatrywanej sylwetki konstrukcji wsporczej określono zbiór parametrów związanych z zawodnością ochrony odgromowej, przy czym:

- dla modeli z pierwszej grupy są to takie parametry, jak:  $I_{BU\_max}$ ,  $r_{PFi}$  i  $r_{PO}$ ;
- dla modeli z drugiej grupy są to takie parametry, jak:  $I_{BU\_max}$ ,  $R_{PFi}$  i  $R_{PO}$ .

Wartości otrzymanych parametrów zestawiono w tabelach 4 i 5, odpowiednio dla sylwetki konstrukcji wsporczej typu B2 i SL24. Z kolei graficzną interpretację uzyskanych wartości  $I_{BU\_max}$  przedstawiono na rysunkach 8 i 9, odpowiednio dla sylwetki konstrukcji wsporczej typu B2 i SL24.

Tabela 4. Wyniki analizy zawodności ochrony odgromowej dla sylwetki typu B2.

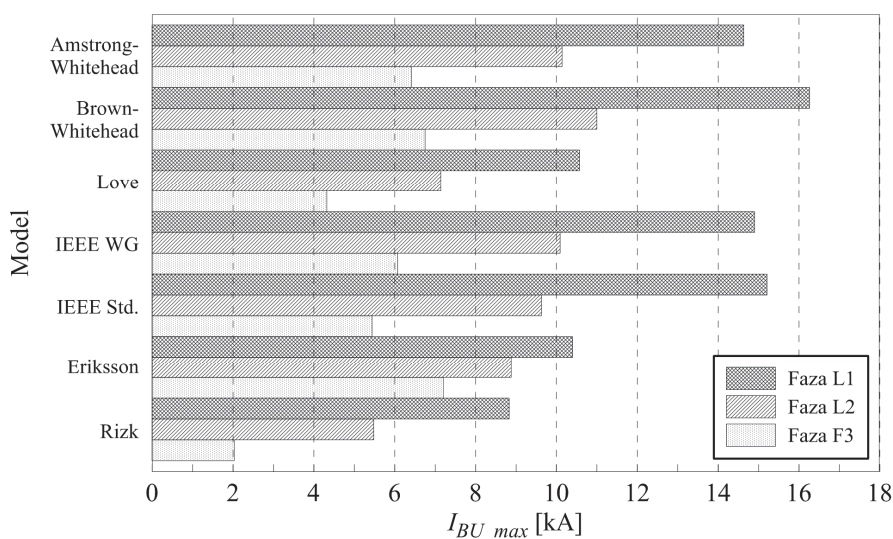
Model	Analizowana faza	$I_{BU\_MAX}$ [kA]	$r_{L1}/R_{L1}$ [m]	$r_{L2}/R_{L2}$ [m]	$r_{L3}/R_{L3}$ [m]	$r_{PO}/R_{PO}$ [m]	$r_Z/R_Z$ [m]
Amstrong-Whitehead	L1	12,72	51,41				46,27
	L2	6,19	28,89				26,00
	L3	7,49	33,65				30,29
Brown-Whitehead	L1	14,01	51,41				46,27
	L2	6,49	28,89				26,00
	L3	7,96	33,65				30,29
Love	L1	8,46	40,07				40,07
	L2	3,97	24,52				24,52
	L3	4,84	27,86				27,86
IEEE WG	L1	11,93	40,07				40,07
	L2	5,60	24,52				24,52
	L3	6,82	27,86				27,86
IEEE Std.	L1	11,21	48,12				44,47
	L2	4,79	27,69				24,52
	L3	6,00	32,05				27,86
Eriksson	L1	10,97	20,88	17,94	17,94	24,07	16,10
	L2	7,47	15,71	13,50	13,50	18,12	12,50
	L3	8,76	17,69	15,20	15,20	20,39	12,50
Rizk	L1	8,97	24,91	22,23	22,23	27,71	16,10
	L2	3,39	12,72	11,35	11,35	14,15	12,50
	L3	4,88	16,36	14,60	14,60	18,20	12,50



Rys. 8. Graficzne porównanie otrzymanych wartości  $I_{BU\_max}$  – sylwetka typu B2

Tabela 5. Wyniki analiza zawadności ochrony ogromowej dla sylwetki typu SL24.

Model	Analizowana faza	$I_{BU\_MAX}$ [kA]	$r_{L1}/R_{L1}$ [m]	$r_{L2}/R_{L2}$ [m]	$r_{L3}/R_{L3}$ [m]	$r_{PO}/R_{PO}$ [m]	$r_Z/R_Z$ [m]
Amstron-Whitehead	L1	14,63	57,49				51,74
	L2	10,14	42,89				38,60
	L3	6,41	29,72				26,75
Brown-Whitehead	L1	16,26	57,49				51,74
	L2	11,00	42,89				38,60
	L3	6,75	29,72				26,75
Love	L1	10,57	46,30				46,30
	L2	7,14	35,88				35,88
	L3	4,32	25,90				25,90
IEEE WG	L1	14,90	46,30				46,30
	L2	10,09	35,88				35,88
	L3	6,07	25,90				25,90
IEEE Std.	L1	15,21	58,66				52,31
	L2	9,63	43,59				38,87
	L3	5,44	30,08				26,82
Eriksson	L1	10,40	23,95	21,61	19,09	26,83	21,60
	L2	8,88	21,32	19,23	16,99	23,88	18,20
	L3	7,21	18,27	16,48	14,56	20,46	14,80
Rizk	L1	8,83	28,12	26,04	23,72	30,62	21,60
	L2	5,48	20,24	18,74	17,07	22,04	18,20
	L3	2,03	10,19	9,43	8,60	11,07	14,80

Rys. 9. Graficzne porównanie otrzymanych wartości  $I_{BU\_max}$  – sylwetka typu SL24

#### 4. PODSUMOWANIE I WNIOSKI KOŃCOWE

W referacie przedstawiono wyniki analizy ochrony odgromowej opierając się na dwóch grupach podejść spotykanych w literaturze. Wszystkie zastosowane modele biorą pod uwagę geometrię zawieszenia przewodów oraz zależność modelu ochrony odgromowej od spodziewanej wartości szczytowej wyładowania atmosferycznego. Różnice uwidaczniają się dopiero w sposobie tworzenia takiego modelu. Podejścia z pierwszej grupy, przy tworzeniu modelu ochrony odgromowej, opierają się na odległości decyzji lidera podążającego w stronę powierzchni ziemi. Z kolei podejścia z drugiej grupy, opierają tworzenie modelu ochrony odgromowej na aktywnej odległości oddolnego wyładowania. Porównania podejść analizy odgromowej dokonano na przykładzie sylwetek konstrukcji wsporczych serii B2 i SL24, dla których określono maksymalną wartość szczytową wyładowania atmosferycznego  $I_{BU\_max}$  oraz odpowiadające tej wartości odległości decyzji lub aktywne odległości (tabela 4 i tabela 5).

Niezależnie od podejścia, przewodem najbardziej narażonym na wyładowanie atmosferyczne (o największych wartościach  $I_{BU\_max}$ ) jest przewód fazy najbliższej położony względem przewodu odgromowego (przewód fazy L1). W przypadku sylwetki B2 otrzymano wartości  $I_{BU\_max}$  z przedziału od 8,97 kA do 14,01 kA. Z kolei dla sylwetki SL24 otrzymano wartości  $I_{BU\_max}$  z przedziału od 8,83 kA do 16,26 kA. Z kolei przewodem najmniej narażonym jest przewód fazy L2 (dla sylwetki B2) oraz przewód fazy L3 (dla sylwetki SL24) – uwidacznia się tutaj wpływ układu przewodów. W obu przypadkach granice przedziału zmienności  $I_{BU\_max}$  otrzymano dla tych samych modeli tj. dla modelu Rizk i dla modelu Brown, a różnice związane są geometrią zawieszenia przewodów na konstrukcji wsporczej.

Przedstawione zagadnienia analizy zawodności ochrony odgromowej stanowią bardzo ważne kwestie m.in. w szeroko rozumianej koordynacji izolacji. Wyniki analiz mogą być przydatne przy określaniu m.in. poziomu narażeń napięciowych spowodowanych wyładowaniem atmosferycznym w różnych miejscach (węzłach) systemu elektroenergetycznego.

#### LITERATURA

- [1] Armstrong H. R., Whitehead E. R., Field and analytical studies of transmission line shielding, IEEE Transactions on Power Apparatus and Systems, Volume PAS-87, Number 1, 1968.
- [2] 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 (w druku).
- [3] Borghetti A., Nucci C.A., Paolone M., Estimation of statistical distribution of lightning current parameters at ground level from the data recorded by instru-

- mented towers, IEEE Transactions on Power Delivery, Volume 19, Number 3, 2004.
- [4] Brown G. W, Whitehead E. R., Field and analytical studies of transmission line shielding: Part II, IEEE Transactions on Power Apparatus and Systems, Volume PAS-88, Number 5, 1969.
  - [5] Eriksson A. J., An improved electrogeometric model for transmission line shielding analysis, IEEE Transactions on Power Delivery, Volume PWRD-2, Number 3, 1987.
  - [6] IEEE Standard 1243-1997, IEEE guide for improving the lightning performance of transmission lines, ISBN 1-55937-937-5, 1997.
  - [7] IEEE Working Group on Lightning Performance of Transmission Lines, A simplified method for estimating lightning performance of transmission lines, IEEE Transactions on Power Apparatus and Systems, Volume PAS-104, Number 4, 1985.
  - [8] IEEE Working Group on Lightning Performance of Transmission Lines, Estimating lightning performance of transmission lines II – updates to analytical models, IEEE Transactions on Power Delivery, Volume 8, Number 3, 1993.
  - [9] Kalaga S., Yenumula P., Design of electrical transmission lines: structures and foundations, Volume 1, CRC Press/Balkema, 2017, ISBN 978-1-138-00091-9.
  - [10] Love E. R., Improvements in lightning stroke modeling and applications to design of EHV and UHV transmission line, MSc dissertation, University of Colorado, Denver, CO, 1973.
  - [11] Mikropoulos P. N., Tsovilis T. E., Lightning attachment models and maximum shielding failure current of overhead transmission lines: implications in insulation coordination of substations, IET Generation, Transmission & Distribution, Volume 4, Issue 12, 2010.
  - [12] Rizk F. M., Modeling of transmission line exposure to direct lightning strokes, IEEE Transactions on Power Delivery, Volume 5, Number 4, 1990.

#### **ANALYSIS OF SHIELDING FAILURE OF 110 kV RATED VOLTAGE OVERHEAD POWER LINE**

In the electrical power systems, the most exposed to atmospheric discharges, due to their size, are overhead lines. When analyzing this type of electricity line exposure, consideration is direct lightning strike into the phase conductor. In this case, based only on the wire suspension geometry (phases and grounding) on the analyzed support structure, it is possible to determine the maximum peak value of the lightning current that can hit the phase conductor. The paper presents the results of the analysis of the shielding failure for profiles of support structures, used in lines with a rated voltage of 110 kV: series B2 and series SL24. The analyzes carried out took into account various approaches binding the peak value of the atmospheric discharge with the distance to the structural elements of the supporting structure as well as to the surface of the ground.

*(Received: 08.02.2018, revised: 09.03.2018)*