

Zbigniew GACEK

OCENA ZAGROŻENIA LINII NAPOWIETRZNYCH WYSOKIEGO NAPIĘCIA WSKUTEK BEZPOŚREDNICH UDERZEŃ PIORUNÓW

Streszczenie. W artykule scharakteryzowano wybrane parametry wyładowań atmosferycznych i oceniono zagrożenie piorunowe linii napowietrznych wysokiego napięcia wskutek bezpośrednich uderzeń piorunów. Zaproponowano metodę obliczania wskaźnika wyłączeń burzowych dla linii napowietrznych 110÷400 kV. Zaprezentowano możliwości komputerowego programu obliczeniowego, służącego do szybkiego szacowania poziomu zagrożenia piorunowego elektroenergetycznych linii napowietrznych wysokiego napięcia.

ESTIMATION OF HIGH VOLTAGE OVERHEAD LINES EXPOSURE TO DIRECT LIGHTNING STROKES

Summary. In the paper choice parameters of atmospheric discharges are characterized and high voltage overhead lines exposure to direct lightning strokes is estimated. The method for calculation of lightning sustained outage rate for 110÷400 kV overhead lines is proposed. Characteristics of the processing program, used for quick estimation of high voltage overhead power lines exposure to direct lightning strokes, are presented as well.

1. WPROWADZENIE

Burze i pioruny są przedmiotem zainteresowania nie tylko fizyków i meteorologów, ale również elektryków zajmujących się zagadnieniami ochrony odgromowej. Piorun liniowy, będący jedną z form wyładowań atmosferycznych, stwarza bowiem duże zagrożenie m.in. dla elektroenergetycznych linii i stacji napowietrznych. Poniżej rozważa się wyłącznie zagrożenie linii napowietrznych wysokiego napięcia (o napięciach znamionowych 110, 220 i 400 kV) spowodowane tzw. *przepięciami piorunowymi bezpośrednimi*, powstającymi wskutek uderzeń piorunów bezpośrednio w linię. Artykuł zawiera charakterystykę parametrów wyładowań atmosferycznych i stopnia zagrożenia linii wskutek takich przebiegów. Proponuje się metodę obliczania wskaźnika wyłączeń linii, przy uwzględnieniu prawdopodobieństwa bezpośrednich

uderzeń piorunów w wybrane elementy konstrukcyjne linii. Posługując się oryginalnym komputerowym programem obliczeniowym „Piorun”, dokonano przykładowej oceny zagrożenia piorunowego linii oraz przeanalizowano wpływ niektórych czynników na wartość wskaźnika ich wyłączeń burzowych.

2. NIEKTÓRE PARAMETRY WYŁADOWAŃ ATMOSFERYCZNYCH

Parametry wyładowań atmosferycznych i spowodowanych nimi przepięć piorunowych są wielkościami losowymi. Dane statystyczne dotyczące wartości szczytowych i przebiegów czasowych prądów piorunowych oraz innych parametrów wyładowań atmosferycznych pochodzą z badań, wykonywanych od kilkadziesiąt lat różnymi metodami przez rozmaite ośrodki naukowe (patrz np. [1] i [2]). Stwierdzono, że w ok. 50% przypadków piorunów o biegunowości ujemnej wartości szczytowe prądów lidera wyładowania głównego nie przekraczają 30÷50 kA, a tylko w co najwyżej 5% przekraczają 100 kA. Wartości szczytowe prądów piorunów o biegunowości dodatniej są bardzo rzadko większe od 200 kA. Największe stromości narastania prądów piorunowych w ok. 50% przypadków nie przekraczają 25÷30 kA/μs. Energia pola elektrycznego wyzwalamąca się podczas wyładowania głównego jest niewielka, ale moc czynna - bardzo duża. Największy wpływ na stopień zagrożenia przepięciowego mają wartości szczytowe i stromości narastania prądu piorunowego. Rozkłady prawdopodobieństwa tych parametrów dla pierwszego wyładowania głównego pioruna - decydującego zazwyczaj o zagrożeniu izolacji przy bezpośrednim uderzeniu pioruna w linię - są zbliżone do rozkładu logarytmo-normalnego. Do celów inżynierskich zaleca się stosować przybliżone aproksymacje dystrybuanty wartości szczytowej prądu pierwszej składowej wyładowania głównego pioruna (i_p) między chmurą burzową a ziemią, wyrażane jako prawdopodobieństwo¹:

$$P(i_p > i) \cong \frac{1}{1 + 5,55 \cdot 10^{-4} \cdot i^{2,2}} \quad (1a)$$

lub też jako prawdopodobieństwo:

$$P(i_p > i) \cong \frac{1}{1 + \left(\frac{i}{31}\right)^{2,6}}, \quad (1b)$$

gdzie: i - wybrana wartość szczytowa (w kA), którą przekracza prąd I_p .

Prawdopodobieństwa obliczone za pomocą wzorów (1a) i (1b) odnoszą się do niezbyt wysokich obiektów w terenie nizinnym i nie różnią się istotnie w prawie całym przedziale

¹ Badania potwierdzają, że udar pierwszy ma kilkakrotnie większą wartość szczytową, ale - jednocześnie - kilkakrotnie mniejszą stromość niż następne udary piorunowe.

wartości prądu piorunów (patrz tabl. 1). W dalszych obliczeniach stosuje się więc wzór (1b), zalecany obecnie przez CIGRE.

Tablica 1

Prawdopodobieństwo przekroczenia przez prąd pioruna i_p
zadanej wartości szczytowej prądu $i = 5 + 200 \text{ kA}$

Prąd i	kA	5	10	20	30	50	70	100	200
$P(i_p > i)$ wg wzoru (1a)	-	0,98	0,92	0,71	0,5	0,25	0,14	0,07	0,02
$P(i_p > i)$ wg wzoru (1b)	-	0,99	0,95	0,75	0,52	0,23	0,11	0,05	0,01

Według [4] i [8], odpowiednią aproksymantą dystrybuanty stromości czoła udaru prądu wyładowania głównego pioruna (s_i) jest zależność:

$$P(s_i > s_{i \max}) \cong \frac{1}{1,45 + 9,1 \cdot 10^{-7} \cdot s_{i \max}^{1,7}}, \quad (2)$$

gdzie: $s_{i \max} = (di/dt)_{\max}$ największa zadana stromość narastania prądu (w kA/ μ s).

Z badań i wieloletnich obserwacji wynika, że wartość szczytowa i stromość czoła prądu pioruna są wielkościami losowymi o pomijalnym stopniu skorelowania. Oznacza to, że wielkości te mogą być rozpatrywane w analizach inżynierskich w sposób od siebie niezależny.

3. ZAGROŻENIE PIORUNOWE LINII NAPOWIETRZNYCH

Zagrożenie piorunowe obiektów naziemnych wiąże się z intensywnością burzową w danym obszarze. Miarą tej intensywności są tzw. *poziomy izokerauniczne*, wyznaczone przez przeciętne dla danego obszaru liczby dni burzowych w roku (D). Według [3], liczbę spodziewanych piorunów doziemnych w ciągu roku w odniesieniu do 1 km^2 powierzchni ziemi (w krajach o klimacie umiarkowanym) można obliczyć za pomocą wzoru²:

$$N_z = 0,036 D^{1,3}. \quad (3)$$

Ponieważ w Polsce obserwuje się średnio 20 dni burzowych w ciągu roku ($D = 20$), uzyskuje się $N_z \cong 1,8$ uderzeń piorunów na 1 km^2 powierzchni ziemi w ciągu roku. W dalszych obliczeniach przyjmuje się - w zaokrągleniu - za $N_z = 2$, czyli jak w pracy [4], gdzie uzyskano wartość: $N_z \cong D n_u = 2$ uderzenia piorunów na 1 km^2 powierzchni ziemi w ciągu

² Spotyka się różne modyfikacje tego wzoru, na przykład: $N_z = 0,04 D^{1,25}$ lub $N_z = 0,04 D^{1,35}$.

roku (dla poziomu izokeraunicznego $D = 20$ i liczby uderzeń piorunów na 1 km^2 powierzchni ziemi w ciągu 1 dnia burzowego $n_u = 0,1$).

Okazuje się, że w obiekty naziemne uderza więcej piorunów, niż wynikałoby to z ilości zajmowanej przez te obiekty powierzchni i jednostkowej liczby uderzeń N_z . Jest to związane z wybiórczością wyładowań piorunowych, czyli ukierunkowaniem przebiegu ostatniej fazy wyładowania wstępnego pioruna ([1], [2] i [3]). W odniesieniu do linii napowietrznej wysokiego napięcia można wykorzystać prawidłowość stwierdzoną podczas badań modelowych. Polega ona na tym, że bezpośrednie uderzenia pioruna w linię następują dopiero wtedy, gdy odległość, po przekroczeniu której wyładowanie wstępne rozwija się już tylko w kierunku najbliższego obiektu uziemionego, nie przekracza w przybliżeniu trzykrotnej średniej wysokości zawieszenia najwyższego przewodu. Napowietrzna linia przesyłowa lub przesyłowo-rozdzielcza jest więc narażona na uderzenia piorunów, które są przejmowane w pasie o szerokości ok. $6 h_{ir}$, tzn. po $3 h_{ir}$ z każdej strony pionowej osi symetrii takiego pasa.

Powyższe dane pozwalają oszacować wskaźnik uderzeń piorunów w ciągu roku w modelową linię (o długości $l = 100 \text{ km}$) oraz dla $N_z \cong D n_u = 2$ według wzoru:

$$N_{uobl} \cong N_z S_{obl} = D n_u S_{obl} \cong 0,6 N_z h_{ir} = 1,2 h_{ir} \quad (4)$$

gdzie:

$S_{obl} \cong 6 h_{ir} l \cdot 10^{-3}$ - powierzchnia przejmowania piorunów przez linię, w km^2 ;

$h_{ir} = h_z - 2/3 f_p$ - średnia wysokość zawieszenia najwyższego przewodu, w m;

h_z - wysokość słupa, w m;

f_p - zwis najwyższego przewodu w przęśle, w m.

Istnieją również bardziej złożone wzory, służące do szacowania wskaźnika uderzeń piorunów w linii:

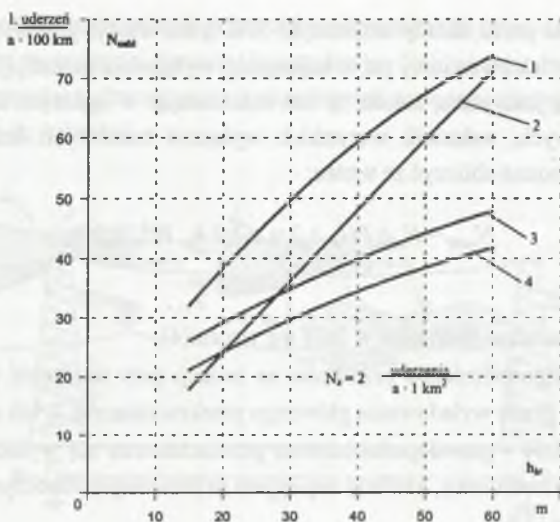
$$N_{uobl} = 2,7 N_z h_{ir}^{0,5} \quad \text{wg [3]}, \quad (5a)$$

$$N_{uobl} = 3,2 N_z h_{ir}^{0,6} \quad \text{wg [1]}, \quad (5b)$$

$$N_{uobl} = 3,8 N_z h_{ir}^{0,45} \quad \text{wg [9]}. \quad (5c)$$

Zależności wskaźnika uderzeń piorunów $N_{uobl} = f(h_{ir})$ w przedziale $h_{ir} = 20 \div 60 \text{ m}$ (dla $N_z = 2$), obliczone według wzorów (4) i (5a)-(5c), przedstawione są na rys. 1. Ponieważ wzór (4) daje wartości pośrednie i - jednocześnie - jest najprostszy, dlatego też wykorzystuje się go w dalszych obliczeniach i analizach.

Jednym z bardzo niekorzystnych efektów bezpośrednich uderzeń piorunów w linię są przepięcia piorunowe bezpośrednie. Nie rozpatrywane dalej przepięcia piorunowe pośrednie indukowane w przewodach wskutek uderzeń piorunów w pobliżu linii rzadko przekraczają wartość szczytową 200 kV i są groźne jedynie dla linii niskiego i średniego napięcia.



Rys.1. Wskaźnik uderzeń piorunów obliczony według: 1) wzoru (5b), 2) wzoru (4), 3) wzoru (5c), 4) wzoru (5a)

Fig. 1. The frequency of lightning strokes calculated according to 1) the formula (5b), 2) the formula (4), 3) the formula (5c), 4) the formula (5)

Przebiecia piorunowe bezpośrednie stwarzają duże zagrożenie dla izolacji liniowej, co wynika z ryzyka wystąpienia przeskoków na izolacyjnych odstępach powietrznych i łańcuchach izolatorów (lub nawet przebicia izolacji stałej). Bezpośrednie uderzenia piorunów są również źródłem bardzo silnych zaburzeń elektromagnetycznych, rozprzestrzeniających się m.in. wzdłuż przewodów roboczych. Stwarzają one duże zagrożenie nie tylko dla izolacji liniowej, ale także stacyjnej (urządzeń i aparatów). To ostatnie zagadnienie nie jest jednak rozpatrywane.

Wielkościami charakteryzującymi odporność izolacji liniowej na przebiecia piorunowe bezpośrednio są:

- *dopuszczalny poziom udarowy prądowy* I_d , tj. największa wartość szczytowa prądu pioruna nie powodującego jeszcze przeskoku na izolatorach;
- *dopuszczalna stromość udaru prądowego* s_{id} , tj. największa stromość czoła prądu pioruna nie powodującego jeszcze przeskoku w powietrzu w środku przęsła.

Od powyższych wielkości zależy m.in. liczba spodziewanych wyłączeń linii zazwyczaj znacząco mniejsza od liczby spodziewanych uderzeń piorunów w linię, ponieważ:

- 1) przeskoki na izolatorach występują tylko wtedy, gdy wartość szczytowa prądu pioruna przekroczy dopuszczalny poziom prądowy udarowy I_d ,
- 2) przeskoki w środku przęsła (między przewodami odgromowymi a roboczymi) wystąpią tylko wtedy, gdy stromość czoła udaru prądowego pioruna przekroczy stromość s_{id} ,

3) linie są wyłączane przez układy automatyki SPZ tylko wtedy, gdy wyładowanie iskrowe przekształci się w łuk zwarciowy (są to najczęściej wyłączenia przemijające).

Traktując linię jako jedną całość, tj. nie rozróżniając w ogólnym ujęciu jej istotnych elementów składowych, wskaźnik wszystkich wyłączeń burzowych linii (przemijających i trwałych łącznie) można obliczyć ze wzoru:

$$N_{wobl} = N_{wobl} P(I_{\phi}, s_{id}) \eta \cong 1,2 h_{sr} P(I_{\phi}, s_{id}) \eta, \quad (6)$$

gdzie:

N_{wobl} - wskaźnik uderzeń piorunów w linię wg wzoru (4),

$P(I_{\phi}, s_{id})$ - prawdopodobieństwo przeskoku na izolacji przy uderzeniu pioruna o parametrach prądu wyładowania głównego przekraczających I_d lub s_{id} ,

$\eta \cong 0,015 E_{sr} - 0,04$ - prawdopodobieństwo przekształcenia się wyładowania iskrowego w łuk zwarciowy, zasilany napięciem przemiennym roboczym (wzór empiryczny wg [7]),

$E_{sr} = U_m / \sqrt{3} a$ - wartość skuteczna średniego roboczego natężenia pola elektrycznego w układzie izolacyjnym, w kV/m,

a - długość rozpatrywanego układu izolacyjnego (łańcucha izolatorów lub odstępów powietrznych między przewodem odgromowym a roboczym), w m,

U_m - największe napięcie międzyprzewodowe linii, w kV.

Częstość wyłączeń burzowych linii można zmniejszyć poprzez obniżenie prawdopodobieństwa przeskoku na izolacji liniowej oraz prawdopodobieństwa powstawania łuków zwarciowych, dzięki stosowaniu:

- łańcuchów izolatorów o wystarczająco dużej wytrzymałości elektrycznej udarowej,
- przewodów odgromowych zawieszonych nad przewodami roboczymi,
- konstrukcji wsporczych z uziomami o niewielkich rezystancjach udarowych.

Skutecznym środkiem ochrony przed trwałymi wyłączeniami burzowymi linii są układy automatyki SPZ. W wyniku ich działania (w cyklu WZ lub WZWZ) większość wyłączeń ma charakter przemijający. Oznacza to, że liczba wyłączeń trwałych (głównie w wyniku uszkodzeń izolatorów lub osprzętu) jest znacząco mniejsza od wyłączeń przemijających linii, będących efektem skutecznego działania SPZ.

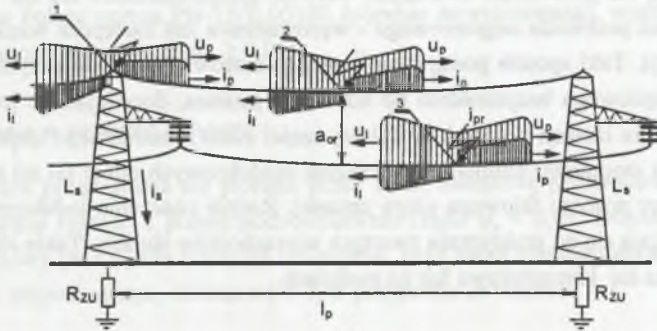
4. LICZBA WYŁĄCZEŃ LINII WSKUTEK UDERZEŃ PIORUNÓW

W liniach napowietrznych o napięciu znamionowym 110 kV i wyższym wyróżniają się trzy przypadki bezpośredniego uderzenia pioruna (rys. 2) z zadaniem prawdopodobieństwem ψ :

- 1) w słup lub przewód odgromowy w pobliżu słupa ($\psi_s \cong 0,5 \div 0,6$),
- 2) w środek przęsła przewodu odgromowego ($\psi_o \cong 0,4 \div 0,5$),

3) w przewód roboczy, mimo istnienia przewodów odgromowych ($\psi_r \leq 0,01$).

Uderzenia piorunów w wybrane elementy konstrukcyjne linii są więc traktowane jako zdarzenia losowe, występujące alternatywnie z określonymi prawdopodobieństwami ψ_s , ψ_o i ψ_r (dopełniającymi się do jedności).



Rys. 2. Charakterystyczne przypadki uderzenia pioruna w linię napowietrzną wysokiego napięcia z przewodami odgromowymi: 1) uderzenie w słup, 2) uderzenie w środek przęsła przewodu odgromowego, 3) uderzenie w przewód roboczy

Fig. 2. Characteristic cases for lightning stroke to the high voltage line with ground conductors: 1) stroke to the tower, 2) stroke to midspan of the ground conductor, 3) stroke to the phase conductor

Uderzenie w słup lub w przewód odgromowy w pobliżu słupa

Po uderzeniu w słup lub w przewód odgromowy w pobliżu słupa większa część prądu pioruna płynie przez konstrukcję wsporczą do ziemi, a reszta przemieszcza się w obie strony przewodu odgromowego ku sąsiednim słupom. Rezystancja udarowa uziemienia słupa jest bowiem znacząco mniejsza od impedancji falowej przewodu. Występujące wtedy dynamiczne procesy falowe są bardzo skomplikowane i trudne do ujęcia analitycznego. Spośród kilku składowych przebiegów napięcia na słupie decydujące znaczenie ilościowe ma spadek napięcia na rezystancji udarowej słupa ([3], [4] i [8]). Dlatego też w celu określenia warunku uniknięcia przeskoku odwrotnego na łańcuchu izolatorów (od słupa do przewodu roboczego) uzasadnione jest stosowanie przybliżonej metody obliczeniowej, opartej na dopuszczalnym poziomie udarowym prądowym (w kA), wyrażonym wzorem empirycznym:

$$I_{ud} \cong \frac{U_{50}}{R_{zu} + \delta_p h_s}, \quad (7)$$

gdzie:

U_{50} - 50-procentowe udarowe napięcie przeskoku łańcucha izolatorów, w kV,

R_{zu} - rezystancja udarowa uziemienia, w Ω ,

$\delta_p = 0,15 \div 0,3$ - współczynnik uwzględniający wpływ napięć indukowanych na rezystancję udarową uziemienia słupa (dla linii z dwoma i jednym przewodem odgromowym);

h_s - wysokość słupa, w m.

We wzorze (7) - zamiast składowych spadków napięcia na indukcyjności własnej słupa i indukowanych na przewodzie roboczym wskutek przemieszczania się fal elektromagnetycznych wzdłuż przewodu odgromowego - wprowadzona jest zastępcza wielkość o charakterze rezystancji. Taki sposób postępowania można stosować tylko do przybliżonego opisu procesu przepięciowego bezpośrednio po uderzeniu pioruna, decydującego jednak o zagrożeniu piorunowym izolacji liniowej. W dalszej części stanu nieustalonego impedancja falowa przewodów jest stopniowo eliminowana wskutek wielokrotnych odbić fal od sąsiednich słupów, a charakter procesu falowego ulega zmianie. Rośnie znaczenie indukcyjności przewodów i fale odbijają się od praktycznie zwartych wierzchołków słupów. Takie złożone procesy falowe odtwarza się komputerowo lub na modelach.

Uderzenie w środek przęsła przewodu odgromowego

Najwyższe napięcie występujące w miejscu uderzenia między przewodem odgromowym a roboczym jest uwarunkowane długością przedziału czasu upływającego od chwili uderzenia do nadejścia fali odbitej od wierzchołka najbliższego słupa. Rezystancja udarowa uziemienia słupa jest wielokrotnie mniejsza od impedancji falowej przewodów, więc wierzchołki sąsiednich słupów można uważać (w przybliżeniu) za zwarte punkty węzłowe. Dla prądu pioruna o ukośnym czole i impedancji falowej przewodu odgromowego $Z = 400 \Omega$ można udowodnić [4], że największa wartość napięcia (w kV) na odstępnie powietrznym przewodzie odgromowym - przewodzie roboczym w miejscu uderzenia pioruna wyraża się wzorem:

$$U_{iz} = U_w (1 - k_u) \cong 100 s_i (1 - k_u) \frac{l_p}{v}, \quad (8)$$

natomiast dopuszczalną stromość czola (w kA/ μ s) udarowego prądu pioruna określa wzór:

$$s_{id} \cong \frac{U_{s0} v}{(1 - k_u) 100 l_p} \cong \frac{750 a_{or} v}{(1 - k_u) 100 l_p} = \frac{2250 a_{or}}{(1 - k_u) l_p}, \quad (9)$$

gdzie:

U_w - największa wartość napięcia na porażonym przewodzie odgromowym, w kV,

$k_u = 0,3(0,4) \div 0,5(0,6)$ - udarowy współczynnik sprzężenia przewodów odgromowego i roboczego dla linii 400 kV i 110 \div 220 kV (bez nawiasów z jednym przewodem odgromowym, w nawiasach z dwoma przewodami odgromowymi),

s_i - stromość czola udaru prądu pioruna, w kA/ μ s,

l_p - rozpiętość przęsła, w m,

$v = 300$ m/ μ s - prędkość przemieszczania się fali elektromagnetycznej w powietrzu,

$U_{50} \cong 750 a_{or}$ - 50-procentowe udarowe napięcie przeskoku między przewodem odgromowym i roboczym, w kV,

a_{or} - odstęp powietrzny między przewodem odgromowym i roboczym w środku przęsła, w m.

Odstęp między przewodem odgromowym i przewodem roboczym dobiera się w ten sposób, aby ograniczyć do minimum ryzyko przeskoku w środku przęsła. W tym zakresie obowiązuje w Polsce norma PN-75/E-05100 (obecnie nowelizowana), według której powinien być spełniony warunek: $a_{or}/l_p \geq 0,015$.

Uderzenie w przewód roboczy

Przypadek przedostania się pioruna przez strefę osłonową przewodów odgromowych występuje bardzo rzadko, z prawdopodobieństwem rzędu $\psi_r < 0,01$. Dopuszczalny poziom udarowy prądowy (w kA) dla łańcucha izolatorów, przy uwzględnieniu ekranującego działania przewodu odgromowego, oblicza się w tym przypadku ze wzoru:

$$I_{rd} \cong \frac{U_{50}}{100(1-k_u)}, \quad (10)$$

w którym U_{50} - 50-procentowe udarowe napięcie przeskoku dla łańcucha izolatorów, w kV.

Znając probabilistyczne charakterystyki prądu pioruna oraz główne parametry konstrukcyjne i wytrzymałościowe układów izolacyjnych można obliczyć spodziewaną liczbę wyłączeń burzowych linii w ciągu roku. Wyniki tych obliczeń są wprawdzie przybliżone i zwykle zawyżone, ale pozwalają na oszacowanie zagrożenia burzowego linii napowietrznych wysokiego napięcia oraz - pośrednio - zastosowanej ochrony odgromowej. Uwzględniając trzy alternatywne przypadki uderzenia pioruna w linię (z prawdopodobieństwami ψ_s , ψ_o i ψ_r), wskaźnik wyłączeń burzowych linii modelowej (o długości 100 km) można obliczyć ze wzoru:

$$N_{wobl} \cong 1,2 h_{ir} \{ \psi_s P(I_{sd}, s_{id}) \eta_s + \psi_o P(s_{id}) \eta_o + \psi_r P(I_{dr}) \eta_r \}. \quad (11)$$

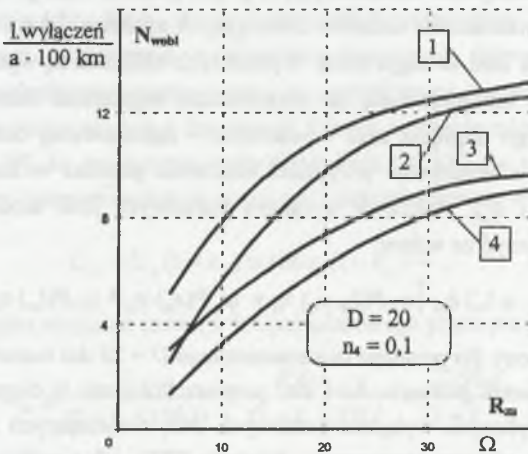
Wskaźnik ten, obliczony dla poziomu izokeraunicznego $D = 20$ dni burzowych w ciągu roku i wartości $n_u = 0,1$ uderzeń piorunów na 1 km² powierzchni ziemi w ciągu 1 dnia burzowego, odnosi się do sumarycznych wyłączeń burzowych linii, obejmujących zarówno wyłączenia przemijające (będące efektem skutecznego działania SPZ), jak i wyłączenia trwałe (będące efektem uszkodzeń izolacji i osprzętu).

5. WYZNACZANIE POZIOMU ZAGROŻENIA PIORUNOWEGO LINII

Do oceny zagrożenia linii napowietrznej wysokiego napięcia wskutek bezpośrednich uderzeń piorunów opracowano komputerowy program obliczeniowy „Piorun”, który może być realizowany na mikrokomputerze klasy PC IBM [5]. Podstawowymi danymi wejścio-

wymi do tego programu są: napięcie znamionowe linii (110, 220 lub 400 kV), liczba przewodów odgromowych (1 lub 2), znamionowe udarowe piorunowe napięcie probiercze izolacji liniowej (wg PN-81/E-05001), udarowy współczynnik sprzężenia przewodów $k_u = 0,4 \div 0,5$ (odpowiednio dla linii z jednym i dwoma przewodami odgromowymi), współczynnik obliczeniowy $\delta_p = 0,15 \div 0,30$ (odpowiednio dla linii z dwoma i jednym przewodem odgromowym). Poza tym, w kolejnych tablicach należy zadeklarować następujące dane obliczeniowe: wartość rezystancji udarowej uziemienia słupa R_{zu} , stosunek odstępu między przewodem odgromowym i roboczym (w środku przęsła) do rozpiętości przęsła a_{or}/l_p , wysokość słupa h_s , długość łańcucha izolatorów a_{iz} , prawdopodobieństwa trafienia pioruna w słup ψ_s , oraz przewód odgromowy ψ_o i przewód roboczy ψ_r , odległość między przewodem roboczym a odgromowym w środku przęsła a_{or} , poziom izokeraamiczny D , długość linii l , spodziewaną liczbę uderzeń piorunów w odniesieniu do 1 km² i 1 dnia burzowego n_u . Program jest zabezpieczony przed wpisywaniem wartości danych zbyt daleko odbiegających od wartości rzeczywistych.

Na rys. 3 przedstawiono przykłady obliczeń wskaźnika sumarycznych wyłączeń burzowych linii 110 kV w zależności od rezystancji udarowej uziemienia słupa; przyjęto typowe wartości poziomu izokeraamicznego $D = 20$ i jednostkowego wskaźnika $n_u = 0,1$ uderzeń

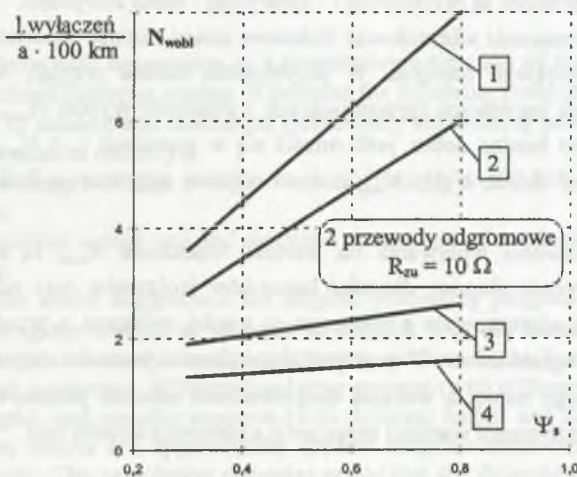


Rys. 3. Wskaźnik wyłączeń burzowych linii 110 kV w zależności od rezystancji uziemienia słupa: 1 - linia z jednym przewodem odgromowym i łańcuchami z izolatorów o długości $a_{iz} = 1,3$ m, 2 - linia z dwoma przewodami odgromowymi i łańcuchami o długości $a_{iz} = 1,3$ m, 3 - linia z jednym przewodem odgromowym i łańcuchami o długości $a_{iz} = 1,7$ m, 4 - linia z dwoma przewodami odgromowymi i łańcuchami o długości $a_{iz} = 1,7$ m

Fig. 3. Lightning sustained outage rate for 110 kV lines as a function of the resistance to earth of the tower: 1 - line with one ground conductor and insulator sets of $a_{iz} = 1.3$ m, 2 - line with two ground conductors and insulator sets of $a_{iz} = 1.3$ m, 3 - line with one ground conductor and insulator sets of $a_{iz} = 1.7$ m, 4 - line with two ground conductors and insulator sets of $a_{iz} = 1.7$ m

piorunów na 1 km^2 i jeden dzień burzowy. Rozważano linie z jednym lub dwoma przewodami odgromowymi, wyposażone - alternatywnie - w łańcuchy izolatorów o długości $a_z = 1,3 \div 1,7 \text{ m}$ (znamionowe udarowe napięcie probiercze $450 \div 550 \text{ kV}$). Wynika stąd, że przy wzroście rezystancji do ok. 20Ω następuje wyraźny wzrost wartości analizowanego wskaźnika. Powyżej tej rezystancji przyrost wartości wskaźnika jest mniej znaczący, a ponadto zmniejsza się wyraźnie wpływ liczby przewodów odgromowych i długości (wytrzymałości udarowej) izolatorów. Ostatnia z właściwości ma jednak istotne znaczenie, gdy rezystancja R_{zw} nie osiąga znacznych wartości. Przykładowo, dla $R_{zw} = 10 \Omega$ stosunki wartości wskaźników wyłączeń burzowych linii z łańcuchami przelotowymi izolatorów o długościach $1,3$ i $1,7 \text{ m}$ wynoszą aż ok. $1,6 \div 1,7$ (odpowiednio dla linii z jednym i dwoma przewodami odgromowymi).

Na wartość wskaźnika wyłączeń burzowych linii wpływają również inne wyszczególnione powyżej parametry i wielkości, m.in. proporcje między prawdopodobieństwami uderzenia pioruna w określone elementy konstrukcyjne linii. Świadczą o tym wykresy na rys. 4, wyrażające zależności wskaźnika wyłączeń linii $110, 220$ i 400 kV z dwoma przewodami odgromowymi od prawdopodobieństwa uderzenia pioruna w słup (przy jednoczesnym



Rys. 4. Wskaźnik wyłączeń burzowych linii $110+400 \text{ kV}$ w zależności od prawdopodobieństwa uderzenia pioruna w słup: 1 - linii 110 kV i łańcuchach izolatorów o długości $1,3 \text{ m}$, 2 - linii 110 kV i łańcuchach izolatorów o długości $1,7 \text{ m}$, 3 - linii 220 kV i łańcuchach izolatorów o długości $2,5 \text{ m}$, 4 - linii 400 kV i łańcuchach izolatorów o długości 5 m

Fig. 4. Lightning sustained outage rate for $110+400 \text{ kV}$ lines as a function of the probability of lightning stroke to the tower for: 1 - 110 kV line with insulator sets of 1.3 m , 2 - 110 kV line with insulator sets of 1.7 m , 3 - 220 kV line with insulator sets of 2.5 m , 4 - 400 kV line with insulator sets of 5 m

zmniejszaniu się prawdopodobieństwa uderzenia w przeszło przewodu odgromowego) dla stałej rezystancji uziemienia słupa $R_{zu} = 10 \Omega$. Ponieważ ze wzrostem prawdopodobieństwa ψ_s wartość wskaźnika rośnie, więc newralicznymi elementami linii podczas wyładowań atmosferycznych są zazwyczaj łańcuchy izolatorów liniowych, czyli - mimo niewielkiej wartości rezystancji R_{zu} - ryzyko przeskoku odwrotnego jest nie do pominięcia. Zależność wskaźnika wyłączeń od prawdopodobieństwa uderzenia pioruna w słup staje się mniej istotna w miarę wzrostu napięcia znamionowego linii, gdyż w liniach bardzo wysokich i najwyższych napięć są stosowane coraz dłuższe łańcuchy izolatorów.

6. PODSUMOWANIE

- Wieloletnie badania i analizy mechanizmów oraz parametrów wyładowań piorunowych pozwoliły znacznie ujednoczyć poglądy w tym zakresie. Wartości tych parametrów przyjmowane w latach siedemdziesiątych i obecnie niewiele się od siebie różnią. Probabilistyczne charakterystyki prądu pioruna oraz parametry konstrukcyjne i wytrzymałościowe układów izolacyjnych pozwalają na obliczanie spodziewanej liczby wyłączeń burzowych linii w ciągu roku. Wyniki tych obliczeń są przybliżone i - zazwyczaj - nieco zawyżone.
- Trudno jest jednoznacznie sformułować ilościowe miary stopnia odporności burzowej linii napowietrznych wysokiego napięcia. W przybliżeniu można przyjąć, że jeśli wskaźnik wszystkich wyłączeń burzowych (przemijających i trwałych) wynosi $N_{wobl} \leq 1$, to ochrona odgromowa linii jest bardzo dobra, jeśli mieści się w granicach $1 < N_{wobl} \leq 4$, to ochrona odgromowa linii jest dobra, a gdy $N_{wobl} \geq 4$, to ochronę odgromową linii należy uznać na niewystarczającą.
- Praktyczne możliwości wpływania na wartość wskaźnika N_{wobl} są raczej niewielkie. Parametry geometryczne słupów, długości łańcuchów izolatorów oraz odstępów powietrznych między przewodem odgromowym a roboczym są z sobą związane, a przedziały zmienności ich wartości dość ograniczone. W praktyce zmniejszenie poziomu zagrożenia linii napowietrznych wysokiego napięcia wskutek bezpośrednich uderzeń piorunów można uzyskać jedynie poprzez zmniejszenie wartości rezystancji uziemienia słupów linii.

LITERATURA

1. Anderson R.B., Erikson A.J.: Lightning and Thunderstorm Parameters. IEE Publ. No 236 "Lightning and Power Systems", London 1984.
2. CIGRE Publ. 63, 1991. Guide to Procedures for Estimating the Lightning Performance of Transmission Lines.
3. Flisowski Z.: Technika wysokich napięć. WNT, wyd. 3, Warszawa 1995.

4. Gacek Z.: Technika wysokich napięć. Izolacja wysokonapięciowa w elektroenergetyce. Przepięcia i ochrona przeciwprzepięciowa. Skrypt Pol. Śląskiej nr 1830, wyd.2, Gliwice 1994.
5. Gacek Z., Rusek T., Sosiński R.: Komputerowe wyznaczanie stopnia zagrożenia piorunowego w liniach przesyłowych. Mat. Konf. ZKwE'98, Poznań-Kiekrz 1998.
6. IEEE Working Group Report: Estimating Lightning Performance of Transmission Lines II. IEEE Trans. on PWRD, Vol. 8, No 3, 1993.
7. Stiepanczuk K. F., Tiniakow N. A.: Technika wysokich napiężeń. Wysszaja Szkoła, Mińsk 1982.
8. Szpor S., Samuła J.: Ochrona odgromowa (wiadomości podstawowe), t.1, WNT, Warszawa 1983.
9. Rizk A. M. F.: Modeling of Transmission Line Exposure to Direct Lightning Strokes. IEEE Trans. on PWRD, Vol. 5, No 4, 1990.

Recenzent: Prof. dr hab. inż. Zbigniew Pohl

Wpłynęło do Redakcji dn. 16 czerwca 1998 r.

Abstract

The paper deals with suggestions of a quantitative estimation of high voltage overhead lines exposure to direct lightning strokes. It includes the following problems:

- characterization of atmospheric discharges (particularly considering parameters of the lightning current as a random quantity),
- estimation of the danger to high voltage overhead lines (110÷400 kV) coming from direct lightning strokes,
- estimation of expected outage rate and sustained outage rate of overhead lines due to direct lightning strokes.

Basing on the above suggestions the original processing program "Piorun" has been developed. The program enables to estimate in a quick way the sustained outage rate of 110 ÷ 400 kV overhead lines due to direct lightning strokes. These lines may be equipped with: 1 or 2 ground conductors, different insulating systems (with different length and electrical impulse strength), and metallic supports (with different height and impulse resistance to earth). Calculation results are approximate; applied simplifications come to some extent overestimated results. The calculation examples prove that the following quantities: impulse resistance to earth, insulation strength and probability of direct lightning stroke to a choice line element influence high voltage overhead line exposure to direct lightning stroke.