

## Analiza narażeń przepięciowych powłok kabli w liniach napowietrzno-kablowych wysokich napięć

**Streszczenie.** Przedmiotem artykułu jest analiza przepięć piorunowych w liniach napowietrzno-kablowych wysokich napięć. W praktyce stwierdza się uszkodzenia zewnętrznych powłok ochronnych kabli pochodzenia elektrycznego, świadczące o tym, że stosowana ochrona przeciwprzepięciowa nie jest wystarczająca. W celu wyjaśnienia przyczyn tych uszkodzeń przeprowadzono badania symulacyjne dla określenia istotnych czynników mających wpływ na poziom spodziewanych narażeń przepięciowych kabli w liniach napowietrzno-kablowych wysokich napięć.

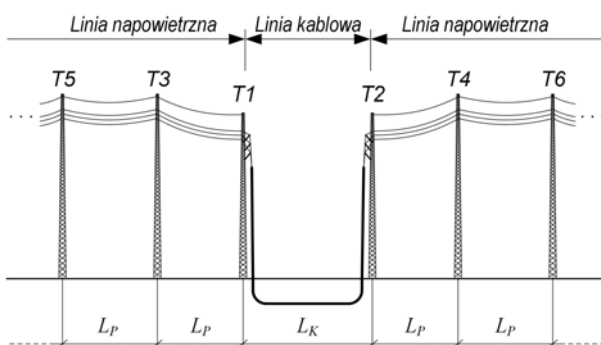
**Abstract.** The subject of this article is the analysis of lightning overvoltages of high voltage mixed overhead cable power lines. In practice electricity-evoked damage to the cable outer sheaths are found, which indicates that the effectiveness of the applied overvoltages protection is insufficient. To explain the causes of this situation, simulation studies were carried out to determine the relevant factors affecting the level of expected overvoltages in high voltage mixed overhead cable power lines. (**Lightning overvoltages analysis of cable outer sheaths in high voltage mixed overhead cable power lines**).

**Słowa kluczowe:** linie napowietrzno-kablowe wysokich napięć, narażenia zewnętrznej powłoki izolacyjnej kabla, skuteczność ochrony przepięciowej.

**Keywords:** high voltage mixed overhead cable power lines, cable outer sheath exposure, lightning protection effectiveness.

### Wstęp

Sieci elektroenergetyczne wysokich i najwyższych napięć, w których występują wyłącznie linie kablowe są rzadko spotykane. Najczęściej stanowią one połączenia linii napowietrznych i kablowych o różnych konfiguracjach. Jedną z nich, będącą przedmiotem rozważań w niniejszym artykule, jest układ typu *siphon* [1], przedstawiony na rysunku 1.

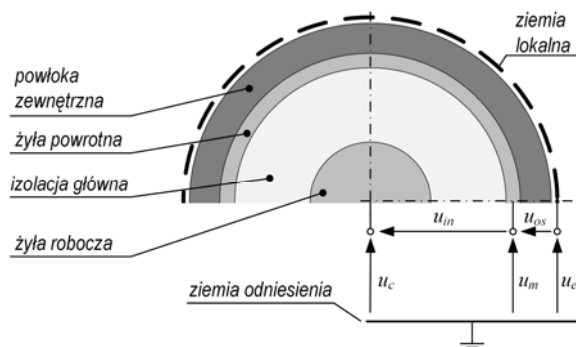


Rys.1. Układ linii napowietrzno-kablowej wysokiego napięcia typu *siphon* [1]

$T$  – słupy linii napowietrznej,  $L_p$  – długości przęseł linii napowietrznej,  $L_k$  – długość odcinka kablowego linii

W wyniku uderzeń piorunów do części napowietrznych, kabel jest narażony nie tylko na przepięcia  $u_{in}$  na izolacji głównej, ale również na przepięcia  $u_{os}$  na zewnętrznej powłoce izolacyjnej (rys.2). Przepięcia  $u_{in}$  powstają w wyniku wzrostu napięcia  $u_c$  żyły roboczej oraz  $u_m$  żyły powrotnej. Izolacja główna kabla jest chroniona za pomocą ograniczników przepięć instalowanych w miejscach połączenia linii kablowej z linią napowietrzną [1]. Natomiast zewnętrzna powłoka kabla, będąca jednocześnie izolacją żyły powrotnej, jest chroniona przez uziemianie żył powrotnych. Ograniczniki przepięć stosowane są tylko w przypadku jednostronnego uziemienia bądź krzyżowania żył powrotnych [2,3]. Uważa się, że z racji uziemiania żył powrotnych, przepięcia  $u_{os}$  są wielokrotnie mniejsze od przepięć  $u_{in}$ . W praktyce stwierdza się jednak dość liczne uszkodzenia z przyczyn elektrycznych zewnętrznych powłok kabli, co może sugerować, że również one są

narażone na znaczne przepięcia. Sytuacja taka może zaistnieć w wyniku dużego wzrostu napięcia (potencjału)  $u_m$  żył powrotnych względem napięcia (potencjału) gruntu  $u_e$  w bezpośrednim otoczeniu kabla (rys.2).



Rys.2. Przekrój jednożyłowego kabla elektroenergetycznego wysokiego napięcia

$u_{in}$  – przepięcie na izolacji głównej,  $u_{os}$  – przepięcie na zewnętrznej powłoce izolacyjnej

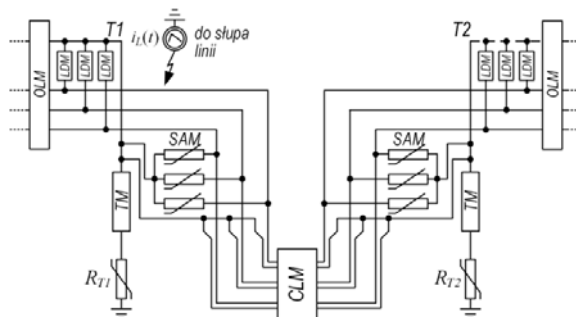
Przedmiotem artykułu jest analiza przepięć piorunowych na powłokach zewnętrznych kabli w liniach napowietrzno-kablowych wysokich napięć. W tym celu przeprowadzono wielowariantowe badania symulacyjne dla określenia wpływu istotnych czynników na poziom spodziewanych przepięć. W pierwszym etapie analizy opracowano w programie *EMTP-ATP* model obwodowy linii napowietrzno-kablowej, który umożliwił wyznaczenie napięć  $u_m$ . W etapie drugim opracowano w programach *MATLAB* polowy model elektromagnetyczny, który pozwolił na wyznaczenie potencjałów gruntu  $u_e$ , a tym samym przepięć  $u_{os}$ . Pomimo, że analiza dotyczyła linii o napięciu 110 kV, to wnioski z niej wypływające mają charakter ogólny i mogą mieć zastosowanie również dla linii o napięciach wyższych.

### Model obwodowy linii napowietrzno-kablowej

Przedmiotem badań jest wyidealizowana jednotorowa napowietrzno-kablowa linia elektroenergetyczna o napięciu 110 kV, której układ przedstawiono na rysunku 1. Założono, że część napowietrzną tworzą znajdujące się między słupami  $T$  przęśla o jednakowej długości  $L_p = 350$  m.

Natomiast pomiędzy słupami  $T1$  i  $T2$  znajduje się ułożona w ziemi linia kablowa o długości  $L_K = k \cdot 350$  m,  $k \in \{1, 3, 9\}$ .

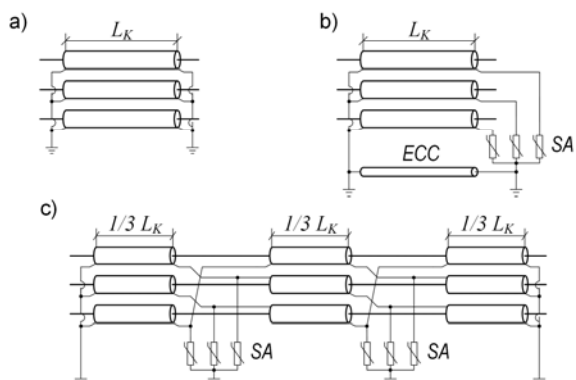
Podstawą wyznaczenia napięć  $u_c = u_c(x,t)$  i  $u_m = u_m(x,t)$  oraz przepięć  $u_{in}(x,t) = u_c - u_m$  (rys.2), dla danego czasu  $t$  oraz miejsca  $x$  w linii kablowej ( $x \in [0, L_K]$ ), jest model uwzględniający istotne zjawiska zachodzące w elementach rozważanej linii [4–7]. Fragment schematu modelu przedstawiono na rysunku 3.



Rys.3. Fragment modelu z rysunku 1 zawierający połączenie linii kablowej z linią napowietrzną  
 $OLM$  – model linii napowietrznej,  $CLM$  – model linii kablowej,  $TM$  – model słupa,  $SAM$  – model ograniczników przepięć,  $LDM$  – model wytrzymałości udarowej układu izolacyjnego linii napowietrznej,  $R_T$  – nieliniowa rezystancja udarowa uziomu słupa,  $T$  – słup,  $i_L(t)$  – model źródła prądu pioruna

W modelu wyodrębniono słupy kablowe  $T1$  i  $T2$ , pomiędzy którymi znajduje się model linii kablowej  $CLM$ , zbudowanej z trzech jednożyłowych kabli 64/110 kV 2XS(FL)2Y [8] o przekroju żyły roboczej  $800$  mm<sup>2</sup> i przekroju żyły powrotnej  $95$  mm<sup>2</sup>, ułożonych w układzie płaskim. Piorunowe napięcie probiercze tego kabla wynosi  $550$  kV, natomiast napięcie probiercze powłoki ochronnej według [9] wynosi  $37,5$  kV.

Model linii kablowej ( $CLM$ ) odwzorowano w postaci sześcioprzewodowej linii długiej o parametrach zależnych od częstotliwości. W artykule rozważono trzy długości odcinków linii kablowych ( $350$  m,  $1050$  m i  $3150$  m) dla trzech konfiguracji połączeń żył powrotnych (rys.4).

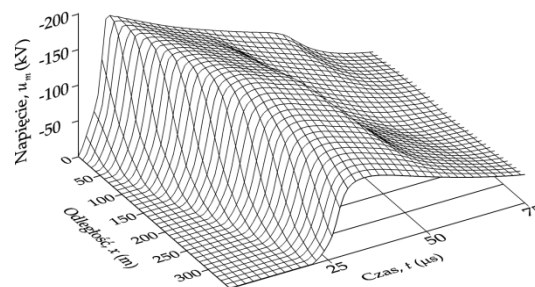


Rys.4. Analizowane konfiguracje linii kablowej: a) obustronne uziemienie żył powrotnych ( $BEB$ ), b) jednostronne uziemienie żył powrotnych ( $SPB$ ), c) krzyżowanie żył powrotnych ( $CB$ ).  
 $SA$  – ogranicznik przepięć,  $ECC$  – kabel łączący uziomy słupów kablowych

Przedstawiony powyżej model odwzorowano w programie  $EMTP-ATP$ . Umożliwił on przeprowadzenie wielowariantowej analizy napięć  $u_m = u_m(x,t)$  stanowiących podstawę do następnego etapu badań. Jego celem było wyznaczenie potencjałów  $u_e = u_e(x,t)$  w otoczeniu kabla dla określenia przepięć  $u_{os} = u_{os}(x,t)$  na izolacji żyły powrotnej.

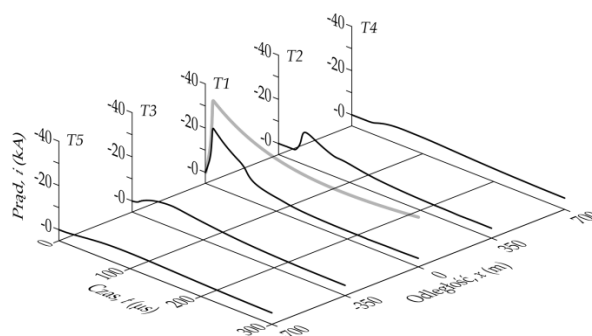
### Analiza przepięć na izolacji żył powrotnych kabli

Napięcia  $u_m = u_m(x,t)$  żył powrotnych, wywołane są częścią prądu pioruna wpływającą do żył powrotnych kabli połączonych z uziomem słupa. Wartości tych napięć zależą nie tylko od parametrów układu uziomowego, ale również od miejsca uderzenia pioruna i są największe przy bezpośrednim wyładowaniu do konstrukcji słupa kablowego [5]. Napięcia  $u_m$  mają charakter przebiegów tłumionych i przesuniętych w czasie wzdłuż długości kabla. Na rysunku 5 przedstawiono ich przykładowy rozkład czasowo-przestrzenny, wyznaczony dla mediany wartości szczytowej prądu pioruna  $I_F = 33,3$  kA [6].



Rys.5. Rozkład czasowo-przestrzenny napięć  $u_m$  żyły powrotnej linii kablowej w układzie  $BEB$  przy uderzeniu do słupa  $T1$  pioruna o prądzie  $I_F = 33,3$  kA

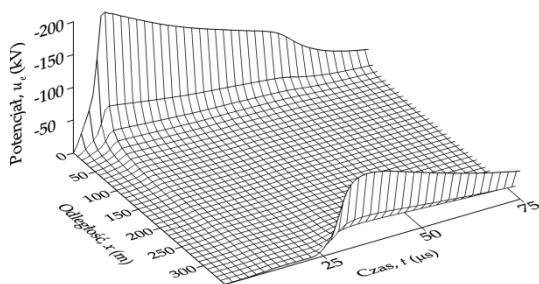
Obliczenia potencjałów  $u_e$  gruntu w otoczeniu kabla, wymagają uprzedniego wyznaczenia prądów wpływających do uziomów słupów. Przykładowy rozptył prądu pioruna o wartości szczytowej  $I_F = 33,3$  kA, uderzającego bezpośrednio do konstrukcji słupa  $T1$  przedstawiono na rysunku 6. Wynika z niego, że z punktu widzenia narażeń powłok kabli najistotniejsze są prądy wpływające do uziomów słupów kablowych  $T1$  i  $T2$ .



Rys.6. Rozptył prądów uziomowych dla linii kablowej w układzie  $BEB$ , przy uderzeniu do konstrukcji słupa  $T1$  pioruna o wartości szczytowej prądu  $I_F = 33,3$  kA

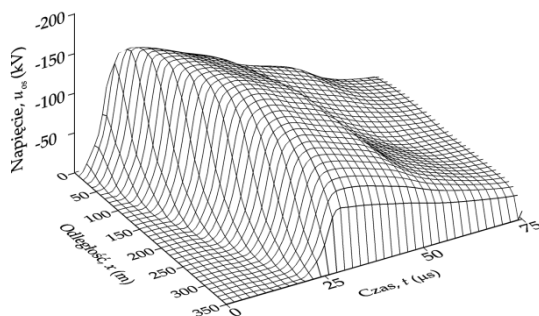
Do obliczeń potencjałów  $u_e$  przyjęto półkulisty model geometryczny uziomu słupa, dla którego opracowano z wykorzystaniem teorii potencjałów opóźnionych [10], algorytm i program w środowisku  $MATLAB$ . Przeprowadzone w programie  $COMSOL$  obliczenia porównawcze dla modelu prętowego uziomu [5], wykazały, że największe wartości błędów dla modelu półkulistego względem modelu prętowego, występują w bezpośrednim otoczeniu elektrod uziomowych i wynoszą ok.  $20\div 25\%$ . Ta dość duża wartość błędu nie jest jednak istotna, ponieważ różnica napięć żyły powrotnej oraz konstrukcji słupa i ziemi w otoczeniu uziomu jest bliska zero. Ponadto błąd ten szybko maleje wraz z odległością od osi uziomu (osi słupa) i w odległości około  $12$  m nie przekracza wartości  $1\%$ .

Podstawową korzyścią wynikającą z zastosowania modelu półkulistego jest uproszczenie procesu modelowania i znaczne skrócenie czasu obliczeń. Na rysunku 7 przedstawiono przykładowy rozkład czasowo-przestrzenny potencjału gruntu  $u_e(x,t)$  w otoczeniu linii kablowej, wyznaczony dla pioruna o prądzie  $I_F = 33,3$  kA atakującego słup  $T1$ .



Rys.7. Rozkład czasowo-przestrzenny potencjału gruntu  $u_e$  wzdłuż linii kablowej w układzie BEB przy uderzeniu pioruna o prądzie  $I_F = 33,3$  kA do konstrukcji słupa  $T1$

Na rysunku 8 przedstawiono rozkład czasowo-przestrzenny napięcie  $u_{os}(x,t) = u_m(x,t) - u_e(x,t)$ , będących przepięciami na powłoce zewnętrznej kabla.



Rys.8. Rozkład czasowo-przestrzenny przepięcie  $u_{os}$  na zewnętrznej powłoce kabla linii kablowej w układzie BEB przy uderzeniu pioruna o prądzie  $I_F = 33,3$  kA do konstrukcji słupa  $T1$

Z punktu widzenia oceny zagrożenia izolacji żył powrotnych istotne są największe wartości  $U_{os}$  napięcie  $u_{os}(x,t)$ . Przeprowadzone badania wykazały, że wartości przepięcie  $U_{os}$  silnie rosną wraz ze wzrostem wartości szczytowej prądu pioruna  $I_F$  oraz wartości parametrów nieliniowej rezystancji udarowej  $R_u$  uziomów słupów [6, 11]:

$$(1) \quad R_u(i) = \frac{R_{st}}{\sqrt{1 + \frac{2\pi R_{st}^2 i}{E_g \rho_E}}}$$

gdzie:  $i$  – wartość chwilowa prądu uziomowego (A),  $R_{st}$  – rezystancja statyczna uziomu ( $\Omega$ ),  $\rho_E$  – rezystywność gruntu ( $\Omega \cdot m$ ),  $E_g$  – natężenie pola elektrycznego jonizacji gruntu (V/m).

Natomiast konfiguracja żył powrotnych w mniejszym stopniu wpływa na wartości tych przepięcie. Ilustruje to rysunek 9, na którym przedstawiono wartości  $U_{os}$  dla rozpatrywanych konfiguracji żył powrotnych, wybranych wartości parametrów  $R_{st}$  i  $\rho_E$  oraz dwóch wartości prądu  $I_F = 33,3$  kA (rys.9a) oraz  $I_F = 115,4$  kA (rys.9b). Napięcia

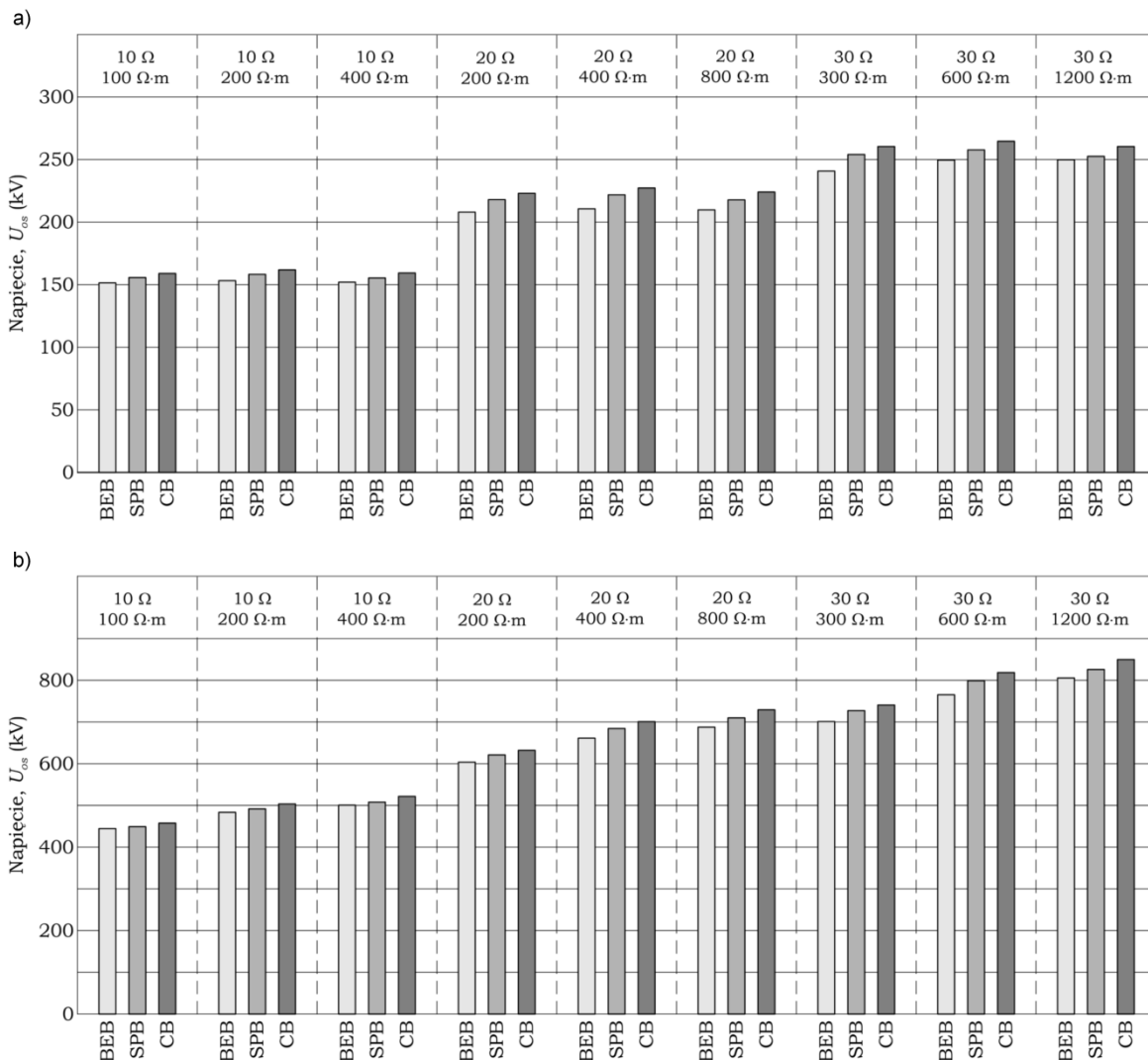
przedstawione na rysunku 9a odpowiadają wartościom przepięcie, których prawdopodobieństwo przekroczenia wynosi 50%. Z kolei napięcia z rysunku 9b, mogą być traktowane jako przepięcia statystyczne w procedurach koordynacji izolacji, bowiem prawdopodobieństwo ich przekroczenia wynosi 2% [12,13], gdyż według [6] prawdopodobieństwo  $P(I_F \geq 115,4 \text{ kA}) = 2\%$ . Wyznaczone wartości  $U_{os}$  uwzględniają ograniczniki przepięcie zainstalowane na słupach kablowych, których piorunowe napięcie obniżone wynosi 259 kV dla prądu wyładowczego 8/20  $\mu s$ , 10 kA, a także ograniczniki o piorunowym napięciu obniżonym 22,5 kV (8/20  $\mu s$ , 10 kA) przyłączone do żył powrotnych kabli w układach SPB i CB.

Biorąc pod uwagę, że czynnikami decydującymi o przepięciach  $U_{os}$  są wartości prądu pioruna oraz parametry układu uziomowego, które praktycznie nie zależą od napięcia znamionowego linii, to można sformułować wniosek ogólny, że porównywalne wartości przepięcie będą występować również w liniach napowietrzno-kablowych o napięciach znamionowych wyższych od 110 kV. Mediana przepięcie  $U_{os}$  może więc zawierać się w przedziale od około 150 kV do około 265 kV, natomiast wartości przepięcie statystycznych w przedziale od około 440 kV do około 850 kV. Wymienione wartości są wielokrotnie większe niż normatywne napięcia probiercze powłok, które dla kabli wysokich napięć zawierają się w przedziale od 30 kV do 72,5 kV [9], w zależności od napięcia probierczego izolacji żył roboczych (od 325 kV do 750 kV). Jeżeli założyć, że rzeczywista wytrzymałość powłoki jest dwukrotnie większa niż wytrzymywane napięcie probiercze, to przepięcia o wartościach odpowiadających medianie będą już powodowały uszkodzenia zewnętrznych powłok izolacyjnych. Należy jednak wziąć pod uwagę, że ryzyko uszkodzenia powłok izolacyjnych jest również zależne od warunków burzowych specyficznych dla danego regionu świata i prawdopodobieństwa uderzenia pioruna do konstrukcji słupów kablowych.

### Podsumowanie

Opracowane modele obwodowe i polowe pozwoliły na analizę przepięcie piorunowych i skuteczności ochrony przepięciowej powłok zewnętrznych kabli elektroenergetycznych w liniach napowietrzno-kablowych wysokich napięć. Przeprowadzone z wykorzystaniem tych modeli wielowariantowe badania symulacyjne, umożliwiły określenie wpływu wielu czynników na wartości spodziewanych przepięcie. Na kształt i wartości przepięcie najistotniejszy wpływ mają: wartość szczytowa prądu pioruna, miejsce uderzenia pioruna w linii napowietrznej, parametry układu uziomowego słupów oraz zastosowana ochrona przepięciowa. Wartości przepięcie są proporcjonalne do wartości szczytowej prądu pioruna. Na przepięcia wpływa miejsce uderzenia pioruna w linii napowietrznej, a największe ich wartości występują przy wyładowaniach piorunowych do słupów kablowych. Kolejnym istotnym czynnikiem mającym wpływ na poziom przepięcie jest rezystywność gruntu i rezystancja uziemienia słupa.

Przedstawione w artykule badania przepięcie potwierdziły hipotezę, że pomimo uziemienia żył powrotnych i stosowania na nich ograniczników przepięcie, może nastąpić uszkodzenie zewnętrznej powłoki izolacyjnej kabla. Przyczynić się to może do szybszej degradacji zarówno żyły powrotnej jak i izolacji kabla, a co za tym idzie do skrócenia czasu eksploatacji i zmniejszenia niezawodności linii kablowej.



Rys.9. Największe wartości przepięć  $U_{os}$  na powłoce zewnętrznej kabla dla różnych układów konfiguracji połączeń żył powrotnych oraz parametrów  $R_{st}$  i  $\rho_E$  przy uderzeniu pioruna do konstrukcji słupa T1: a) dla  $I_f = 33,3$  kA; b) dla  $I_f = 115,4$  kA

**Autorzy:** mgr inż. Jakub Gajdzica, E-mail: [jakub.gajdzica@agh.edu.pl](mailto:jakub.gajdzica@agh.edu.pl); dr hab. inż. Wiesław Nowak, prof. AGH, E-mail: [wieslaw.nowak@agh.edu.pl](mailto:wieslaw.nowak@agh.edu.pl); dr inż. Rafał Tarko, E-mail: [rtarko@agh.edu.pl](mailto:rtarko@agh.edu.pl), AGH Akademia Górniczo-Hutnicza, Katedra Elektrotechniki i Elektroenergetyki, al. Mickiewicza 30, 30-059 Kraków

#### LITERATURA

- [1] International Council on Large Electric Systems, Working Group 21/33, TB 189: Insulation Co-ordination for HV AC Underground Cable System, *CIGRE* (2001)
- [2] International Council on Large Electric Systems, Working Group B1.18, TB 283: Special Bonding of High Voltage Power Cables, *CIGRE* (2005)
- [3] International Council on Large Electric Systems, Working Group B1.50, TB 797: Sheath bonding systems of ac transmission cables - design, testing, and maintenance Paris, *CIGRE* (2020)
- [4] Nowak W., Tarko R., Computer Modelling and Analysis of Lightning Surges in HV Substations due to Shielding Failure, *IEEE Trans. on Power Del.*, 25 (2010), No. 2, 1138-1145
- [5] Tarko R, Gajdzica J, Nowak W, Szypra W. Study of the Lightning Overvoltage Protection Effectiveness of High Voltage Mixed Overhead Cable Power Lines, *Energies* 14(8):2329 (2021)
- [6] International Council on Large Electric Systems, Working Group 01, TB 63: Guide to Procedures for Estimating the Lightning Performance of Transmission Lines, *CIGRE* (1991)
- [7] IEEE Modeling and Analysis of System Transients Working Group. Modeling guidelines for fast front transient, *IEEE Trans. Power Deliv.* 11 (1996), 493–506
- [8] IEC 60840, Power cables with extruded insulation and their accessories for rated voltages above 30 kV ( $U_m = 36$  kV) up to 150 kV ( $U_m = 170$  kV) – Test methods and requirements, *International Electrotechnical Commission* (2020)
- [9] IEC 60229, Electric Cables—Tests on Extruded Oversheaths with a Special Protective Function 3rd ed., *International Electrotechnical Commission* (2007)
- [10] Griffiths D.J., Introductions to Electrodynamics 4th ed., *Cambridge University Press: Cambridge*, UK 2017
- [11] Grcev L.D., Computer analysis of transient voltages in large grounding systems, *IEEE Trans. on Power Del.*, 11 (1996), No. 2, 815–823
- [12] IEC 60071-1:2019, Insulation Co-Ordination—Part 1: Definitions, Principles and Rules, *International Electrotechnical Commission* (2019)
- [13] IEC 60071-2:2018, Insulation Co-Ordination—Part 2: Application Guidelines, *International Electrotechnical Commission* (2018)