

## Seminarium online

**Zasady ochrony przed porażeniem i przed  
przebieciami w sieciach nN, SN, WN i NN  
w zakresie projektowania, budowy i  
eksploatacji**

**1-2, 8-9, 14 czerwca 2021 r.**

**Blok 2. Ochrona przed przebieciami – zagadnienia szczegółowe**

dr inż. Dominik Duda

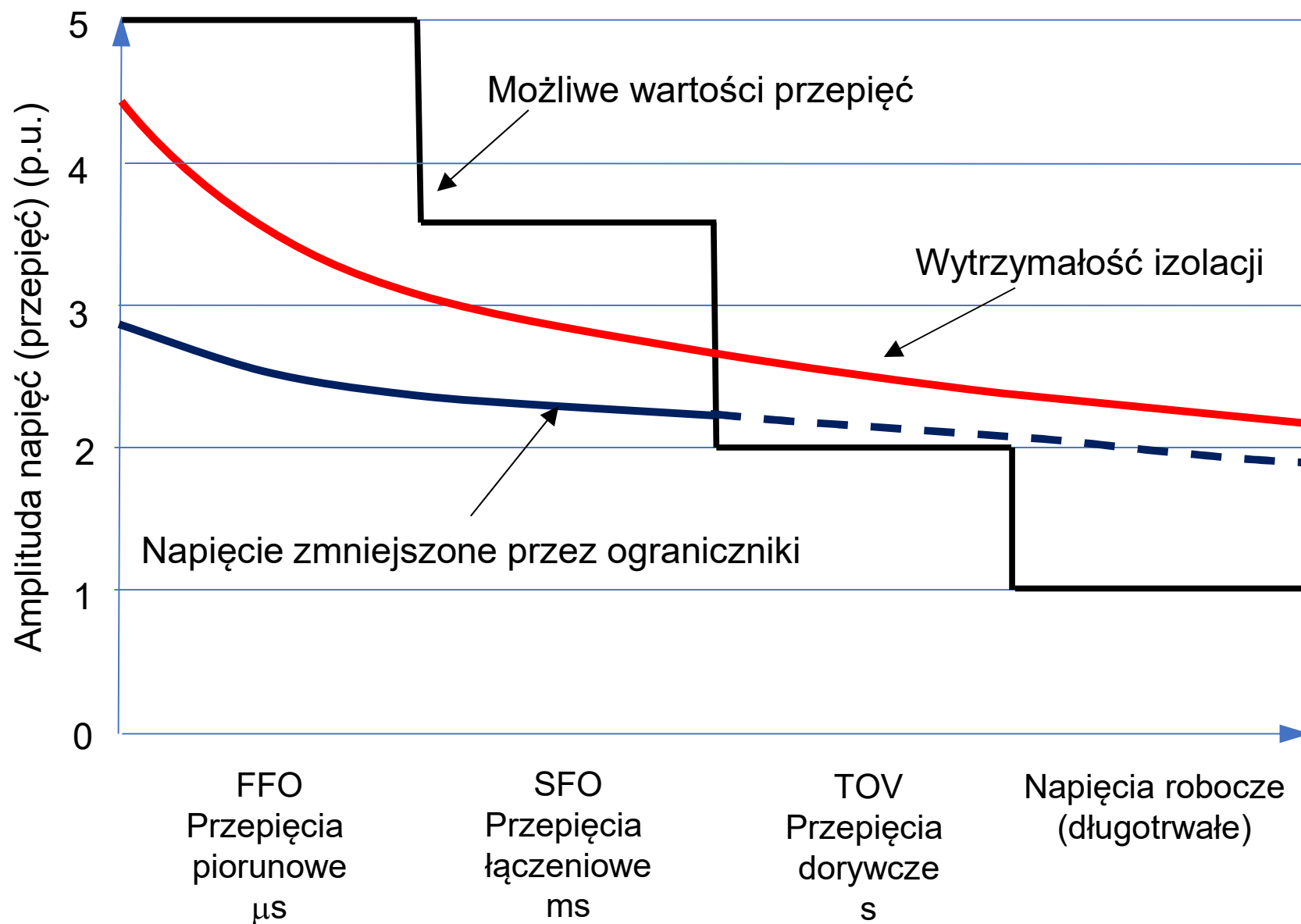


# Praktyczne omówienie zasad (studium przypadku)

## Przykłady

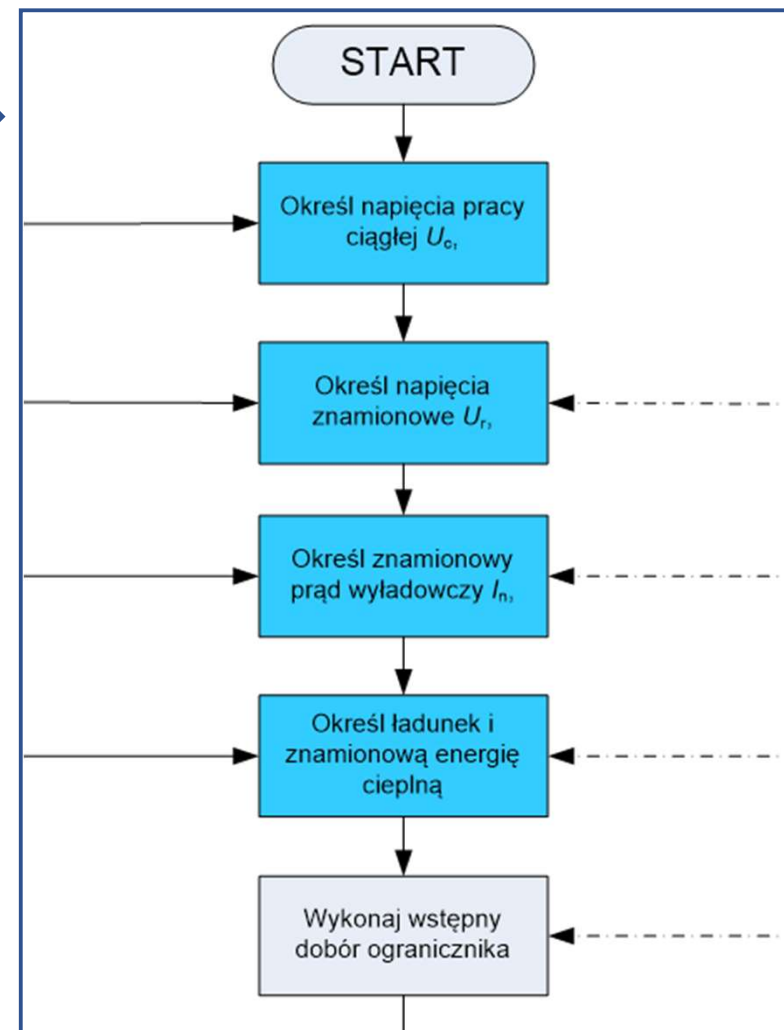
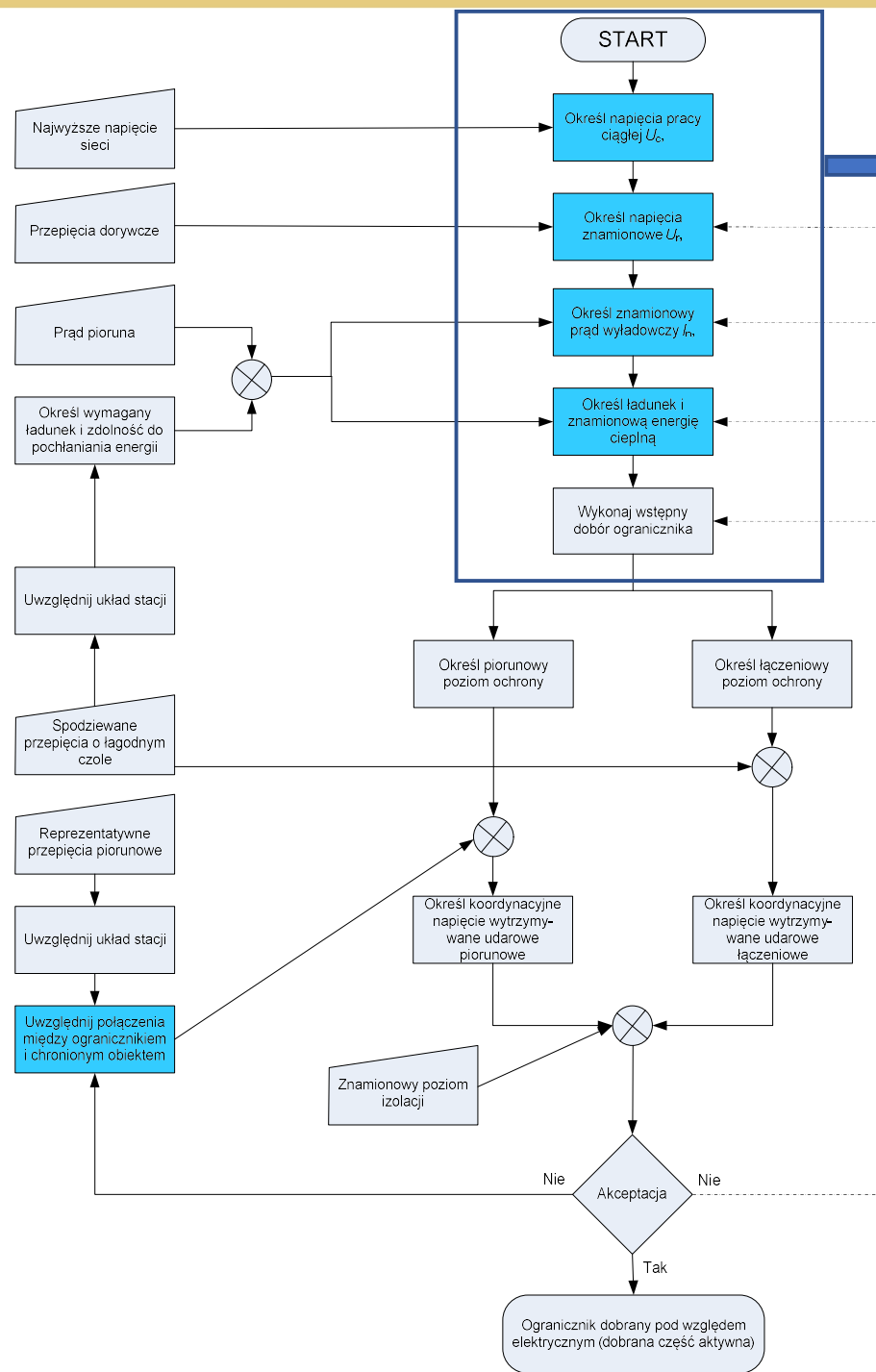
- Dobór ograniczników przepięć do ochrony izolacji głównej
- Wyznaczanie strefy ochronnej ograniczników przepięć
- Dobór ograniczników do ochrony osłon zewnętrznych kabli WN

# Koordinacja izolacji



Prawidłowa koordynacja izolacji w sieci z izolowanym punktem neutralnym

# Dobór ograniczników przepięć



Algorytm doboru ograniczników przepięć wg PN-EN IEC 60099-5  
Ograniczniki przepięć - Część 5:  
Zalecenia wyboru i stosowania

# Dobór ograniczników przepięć

Podstawowe dane techniczne ograniczników przepięć  
przyłączanych do przewodów roboczych w sieciach o napięciu znamionowym 110 kV

Napięcie znamionowe sieci	$U_n$	kV	110
Najwyższe napięcie sieci	$U_s$	kV	123
Klasa ogranicznika	$\geq$	–	SL
Napięcie pracy ciągłej ogranicznika	$U_c \geq$	kV	77
Napięcie znamionowe ogranicznika	$U_r \geq$	kV	96
Graniczny prąd wyładowczy	$I_{hc} \geq$	kA	100
Znamionowy prąd wyładowczy 8/20 $\mu$ s	$I_n \geq$	kA	10
Piorunowy poziom ochrony	$U_{pl} \leq$	kV	300
Wytrzymałość zwarciorowa	$I_s \geq$	kA	40
Zdolność do powtarzalnego przepływu ładunku	$Q_{rs} \geq$	C	1
Znamionowa energia cieplna odniesiona do $U_r$	$W_{th}/U_r \geq$	kJ/kV	4

## Napięcie pracy ciągłej $U_c$

Wartość napięcia pracy ciągłej  $U_c$  (w kV) nie może być mniejsza od wartości napięcia długotrwałego występującego między zaciskami ogranicznika. Jest ona uzależniona od sposobu pracy punktu neutralnego sieci:

w sieciach o napięciu znamionowym 110 kV, o skutecznie uziemionym punkcie neutralnym

$$U_c \geq 1,05 \frac{U_s}{\sqrt{3}} = 1,05 \frac{123}{\sqrt{3}} = 74,5 \text{ kV},$$

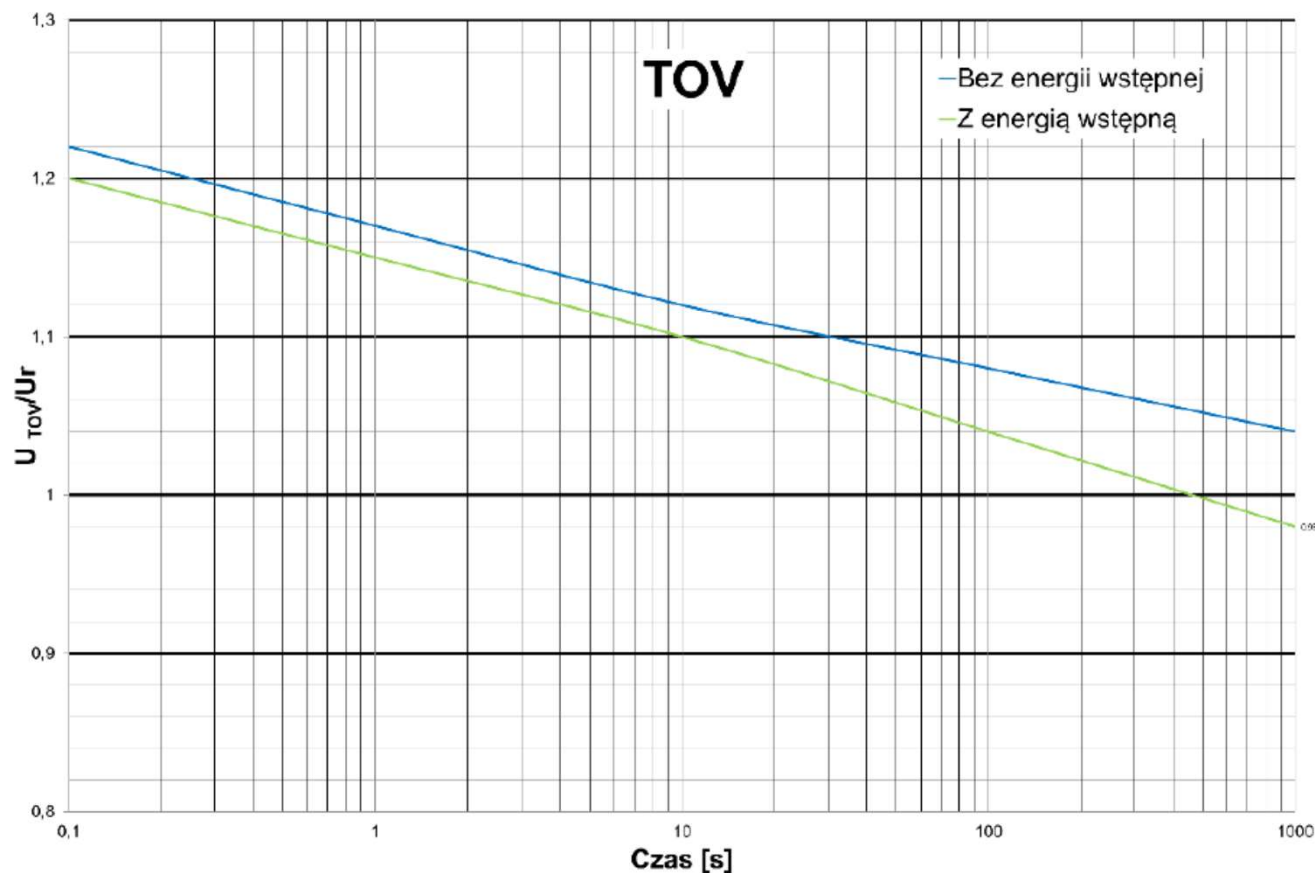
w sieciach o napięciu znamionowym (6÷30) kV, o izolowanym punkcie neutralnym lub niektórych sieciach z kompensacją prądu zwarcia doziemnego, w których możliwa jest długotrwała praca sieci z doziemieniem jednej fazy

$$U_c \geq U_s.$$

Jeżeli przepięcia ziemnozwarciowe (zwarcia jednofazowe) likwidowane są w krótkim czasie

$$U_c \geq \frac{U_s}{T_c},$$

# Dobór ograniczników przepięć



## CHARAKTERYSTYKA TOV

Napięcie przemienne w odniesieniu do charakterystyki TOV bez energii wstępnej

$U_{TOV}$  dla  $t=1$  s     $1.170 U_r = 1.463 U_c$

$U_{TOV}$  dla  $t=3$  s     $1.145 U_r = 1.431 U_c$

$U_{TOV}$  dla  $t=10$  s     $1.120 U_r = 1.400 U_c$

Napięcie przemienne w odniesieniu do charakterystyki TOV z energią wstępną.

$U_{TOV}$  dla  $t=1$  s     $1.150 U_r = 1.438 U_c$

$U_{TOV}$  dla  $t=3$  s     $1.125 U_r = 1.406 U_c$

$U_{TOV}$  dla  $t=10$  s     $1.100 U_r = 1.375 U_c$

Przykładowa charakterystyka TOV

## Napięcie znamionowe $U_r$

Napięcie znamionowe ograniczników przepięć powinno być tak dobrane, aby charakterystyki napięciowo-czasowe wytrzymałości ograniczników na napięcie o częstotliwości sieciowej leżały powyżej charakterystyk określających amplitudy spodziewanych przepięć dorywczych

$$U_r \geq \frac{U_{\text{TOV}}}{T_r}$$

- $T_r$  – współczynnik charakteryzujący wytrzymałość ogranicznika na przepięcia dorywcze (TOV), odniesionym do napięcia  $U_r$ , określony dla czasu trwania tego przepięcia,
- $U_{\text{TOV}}$  – największa wartość (skuteczna) przepięcia dorywczego występującego w sieci, w której ma zostać zainstalowany ogranicznik.

W sieciach o napięciu znamionowym 110 kV, w których następuje automatyczna eliminacja jednofazowego zwarcia doziemnego

$$U_r \geq k_z \frac{U_s}{\sqrt{3} \cdot T_r} = 1,4 \frac{123}{\sqrt{3} \cdot 1,15} = 86,5 \text{ kV}$$



# Dobór ograniczników przepięć

## Znamionowy prąd wyładowczy $I_n$

wartość szczytowa udaru prądowego piorunowego, który jest wykorzystywany do klasyfikowania ograniczników

Szacowane prądy wyładowcze dla sieci 110 kV – zakłada się, że poziom przepięć na przewodach fazowych może być ok. 20% wyższy od wytrzymałości udarowej izolacji liniowej (przy wyższych napięciach następują przeskoki), stąd:

$$I_w = (3 \div 8) \text{ kA}$$

Zatem przyjmuje się, że  $I_n \geq 10 \text{ kA}$ .

W sieciach SN ze słupami przewodzącymi (uziemiającymi poprzecznikami) prąd wyładowczy płynący przez ogranicznik przy przepięciach przenoszonych przewodami linii może być na poziomie 2,5 kA (sieć 20 kV).

W sieciach SN ze słupami nieprzewodzącymi prądy wyładowcze mogą osiągać 28 ÷ 46 kA. W tym przypadku przepięcie występuje we wszystkich fazach, zatem przez ogranicznik jednej fazy przepływa prąd wyładowczy rzędu 10 ÷ 15 kA.

Dla takich sieci można zatem stosować ograniczniki o znamionowych prądach wyładowczych odpowiednio  $I_n = 5 \text{ kA}$  lub  $I_n = 10 \text{ kA}$ .

Dla ujednolicenia wymagań przyjęto w wytycznych  $I_n \geq 10 \text{ kA}$ , ze wskazaniem, że w warunkach trudnych terenowo  $I_n = 20 \text{ kA}$ .

# Dobór ograniczników przepięć

Znamionowy prąd wyładowczy pozwala na wstępne określenie klasy ogranicznika

## Klasyfikacja ograniczników

Klasa ogranicznika	Stacyjne			Dystrybucyjne		
Oznaczenie	SH	SM	SL	DH	DM	DL
$I_n$ (kA)	20	10	10	10	5	2,5
$I_{SW}$ (kA)	2	1	0,5	—	—	—
$Q_{rs}$ (C)	$\geq 2,4$	$\geq 1,6$	$\geq 1,0$	$\geq 0,4$	$\geq 0,2$	$\geq 0,1$
$W_{th}$ (kJ/kV)	$\geq 10$	$\geq 7$	$\geq 4$	—	—	—
$Q_{th}$ (C)	—	—	—	$\geq 1,1$	$\geq 0,7$	$\geq 0,45$
Litery „H”, „M” i „L” w oznaczają typ „high”, „medium” oraz „low”						

# Dobór ograniczników przepięć

Mając obliczone i ustalone napięcie pracy ciągłej, napięcie znamionowe, znamionowy prąd wyładowczy można wstępnie wytypować ogranicznik

## DANE ELEKTRYCZNE

Klasyfikacja ogranicznika według PN-EN 60099-4:2015

Klasa rozładowania linii według PN-EN 60099-4:2009

Napięcie systemu ( $U_m$ )

Napięcie znamionowe ( $U_r$ )

Znamionowy prąd wyładowczy  $I_n$  8/20  $\mu s$

Prąd graniczny  $I_{hc}$  4/10  $\mu s$

Zdolność przepływu ładunku  $Q_{rs}$

Znamionowa energia cieplna  $W_{th}$

Zdolność pochłaniania energii pojedynczego udaru (od 2 do 4 ms)

Wytrzymałość na udary prądowe długotrwałe, 2000  $\mu s$  (na podstawie  $Q_{rs}$ )

Wytrzymałość zwarciorowa

SL (Station Low)

Klasa 2

7.2 – 145 kV

6.0 – 144 kV

10 kA

100 kA

1.6 C

7.0 kJ/kV  $U_r$

3,5 kJ/kV  $U_r$

600 A

50 kA/0.2s

Napięcie znamionowe  Ur	Maksymalne napięcie ciągłej pracy Uc	TOV <sup>1)</sup>		Napięcie obniżone w kV (wartość szczytowa) przy różnych prądach udarowych										
		rms		Udar 1/... μs	Udar 8/20 μs					Udar 30/60 μs				
		1 s	10 s		10kA	2.5kA	5kA	10kA	20kA	40kA	125A	250A	500A	1000A
kV	kV	kV	kV	kV	kV	kV	kV	kV	kV	kV	kV	kV	kV	kV
92	73.6	105.5	100.9	273.5	209.3	217.6	237.8	264.0	297.3	176.0	180.8	185.5	195.0	204.5
96	77.0	110.4	105.6	286.4	219.1	227.8	249.0	276.4	311.3	184.3	189.2	194.2	204.2	214.1
102	82.0	117.3	112.2	304.8	233.2	242.5	265.0	294.2	331.3	196.1	201.4	206.7	217.3	227.9

# Dobór ograniczników przepięć

**Ładunek odprowadzany przez ogranicznik przepięć w wyniku przepięcia piorunowego**

$$Q = \left[ 2 \cdot U_f - N \cdot U_{\text{res}} \cdot \left( 1 + \ln \left( 2 \cdot \frac{U_f}{N \cdot U_{\text{res}}} \right) \right) \right] \cdot \frac{T_1}{Z}$$

- $U_{\text{res}}$  – napięcie na ograniczniku przy przepływie określonego prądu pioruna (można użyć  $U_{\text{pl}}$ )  
 $U_f$  – napięcie przeskoku izolacji liniowej (biegunowość ujemna)  
 $Z$  – impedancja falowa linii  
 $N$  – liczba linii przyłączonych do ogranicznika  
 $T_1$  – zastępczy czas trwania wyładowania piorunowego (pierwsze i kolejne wyładowania zwrotne); typowa wartość  $3 \cdot 10^{-4}$  s

Dla wstępnie dobranego ogranicznika:  $U_c = 77$  kV,  $U_r = 96$  kV  $U_{\text{res}} \cong U_{\text{pl}} = 249$  kV  
Pozostałe parametry:  $U_f = 800$  kV,  $Z = 450 \Omega$ ,  $N = 1$ ,  $T_1 = 3 \cdot 10^{-4}$  s

$$Q = \left[ 2 \cdot 800000 - 1 \cdot 249000 \cdot \left( 1 + \ln \left( 2 \cdot \frac{800000}{1 \cdot 249000} \right) \right) \right] \cdot \frac{3 \cdot 10^{-4}}{450} = 0,6 \text{ C}$$

Znamionowa energia cieplna  $W_{th}$  (odniesiona do  $U_r$ )

$$W_{th} = Q \cdot \frac{U_{pl}}{U_r}$$

Zatem dla parametrów wstępnie dobranego ogranicznika

$$W_{th} = 0,6 \cdot \frac{249}{96} = 1,5 \frac{\text{kJ}}{\text{kV}}$$

## Wytrzymałość zwarciorowa $I_s$

Wytrzymałość zwarciorowa ogranicznika instalowanego w układzie faza – ziemia powinna być równa lub większa od maksymalnego prądu zwarcia w miejscu zainstalowania ogranicznika w sytuacji gdy sam ogranicznik staje się przyczyną zwarcia:

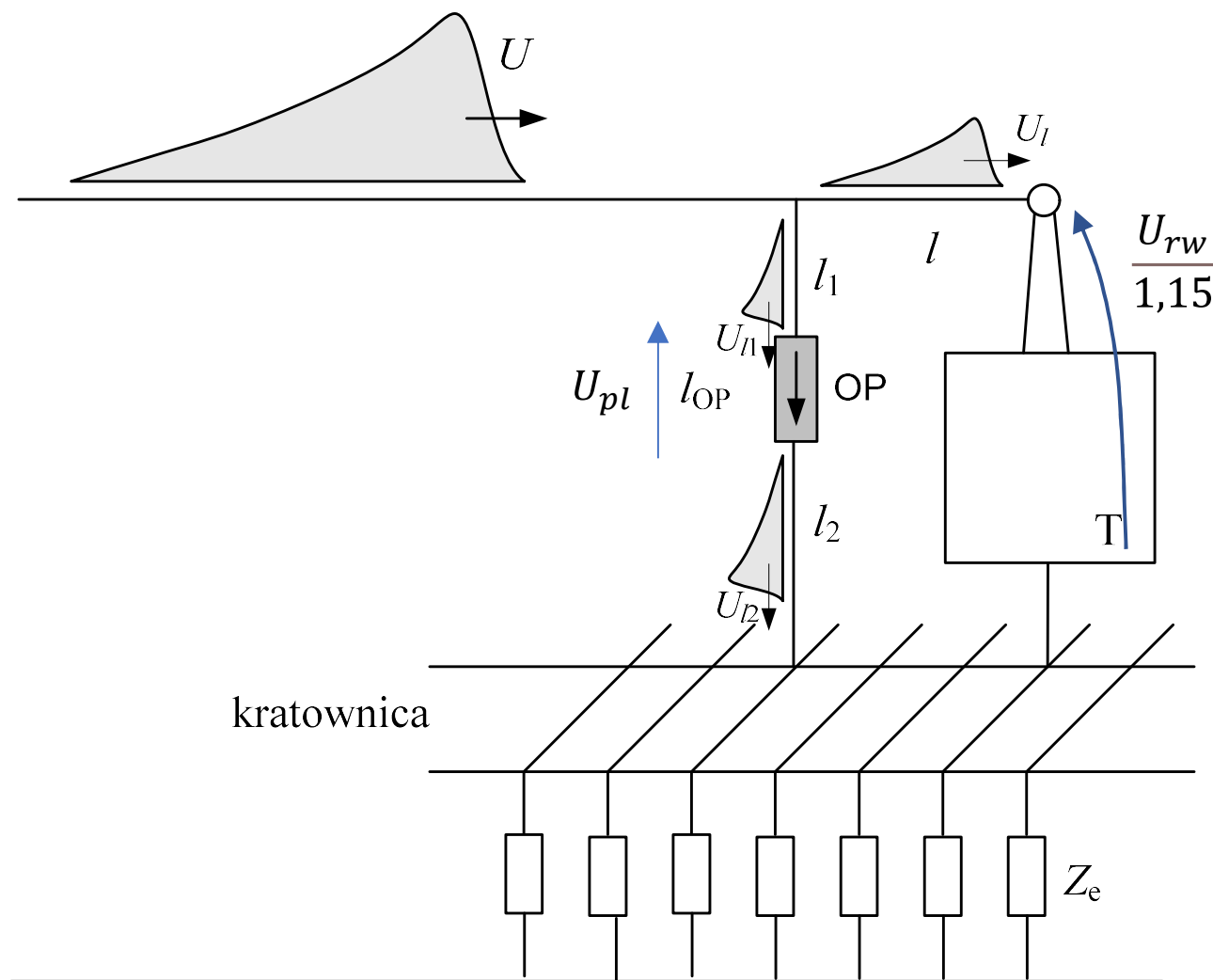
- w sieci 110 kV – większa od prądu zwarcia jednofazowego

# Dobór ograniczników przepięć

Podstawowe dane techniczne ograniczników przepięć  
przyłączanych do przewodów roboczych w sieciach o napięciu znamionowym 110 kV

Napięcie znamionowe sieci	$U_n$	kV	110		
Najwyższe napięcie sieci	$U_s$	kV	123		
Klasa ogranicznika	$\geq$	–	SL		SL
Napięcie pracy ciągłej ogranicznika	$U_c \geq$	kV	77	74,5	77
Napięcie znamionowe ogranicznika	$U_r \geq$	kV	96	86,5	96
Graniczny prąd wyładowczy	$I_{hc} \geq$	kA	100		100
Znamionowy prąd wyładowczy 8/20 $\mu$ s	$I_n \geq$	kA	10	8	10
Piorunowy poziom ochrony	$U_{pl} \leq$	kV	300		249
Wytrzymałość zwarciorowa	$I_s \geq$	kA	40	?	50
Zdolność do powtarzalnego przepływu ładunku	$Q_{rs} \geq$	C	1	0,6	1,6
Znamionowa energia cieplna odniesiona do $U_r$	$W_{th}/U_r \geq$	kJ/kV	4	1,5	7

# Strefy ochronne ograniczników przepięć



Jeżeli napięcie obniżone ogranicznika wynosi  $U_{pl} = 249 \text{ kV}$ , a na izolacji chronionego obiektu napięcie nie powinno przekraczać  $\frac{U_{rw}}{1,15} = 478 \text{ kV}$ , to jaka jest dopuszczalna długość przewodów łączących, na których występują udarowe napięcia?

# Strefy ochronne ograniczników przepięć

$$L_p = \frac{n}{(A \cdot f_s)} \left[ \left( \frac{U_{rw}}{1,15} \right) - U_{pl} \right] \cdot (L_{sp} + L_f),$$

gdzie:

- $L_p$  – strefa ochronna;
- $U_{rw}$  – wymagane napięcie wytrzymywane udarowe piorunowe;
- $U_{pl}$  – piorunowy poziom ochrony;
- $A$  – współczynnik z tabeli 7 wyrażony w kV;
- $f_s$  – współczynnik redukcji stromości przepięcia (w wyniku tłumienia ulotowego);
- $n$  – jest liczbą linii podłączonych do stacji ( $n = 1$  lub  $n = 2$ );
- $L_{sp}$  – jest długością przęsła;
- $L_f = R_a / r$ ;
- $R_a$  – dopuszczalny wskaźnik uszkodzeń (liczba awarii na jednostkę czasu) chronionego sprzętu;
- $r$  – wskaźnik piorunowych wyłączeń linii napowietrznej (liczba wyłączeń na jednostkę czasu i długość jednostkową) rocznie, dla konstrukcji linii na pierwszym kilometrze przed stacją. Jeśli  $n = 2$ , współczynniki należy dodać.



# Strefy ochronne ograniczników przepięć

Wartości współczynnika A do obliczania stref ochronnych ograniczników dla różnych linii napowietrznych

Konfiguracja linii napowietrznych	A (kV)
<b>Linie SN (możliwe przeskoki międzyfazowe)</b>	
- z uziemionym poprzecznikiem (przeskok do ziemi przy stosunkowo niskim napięciu)	900
- linie ze słupami nieprzewodzącymi (przeskok do ziemi przy stosunkowo wysokim napięciu)	2 700
<b>Linie WN (możliwe jednofazowe przeskoki do ziemi)</b>	
- pojedynczy przewód	4 500
- wiązka dwuprzewodowa	7 000

# Strefy ochronne ograniczników przepięć

$$L_p = \frac{n}{(A \cdot f_s)} \left[ \left( \frac{U_{rw}}{1,15} \right) - U_{pl} \right] \cdot (L_{sp} + L_f),$$

gdzie:

$$U_{rw} = 550 \text{ kV};$$

$$U_{pl} = 249 \text{ kV};$$

$$A = 4500 \text{ kV};$$

$$f_s = 0,5;$$

$$n = 1;$$

$$L_{sp} = 250 \text{ m};$$

$$R_a = 0,0025 \text{ uszkodzenia/rok wg PN-EN IEC 60071-2: 2018 i PN-EN IEC 60099-5: 2018};$$

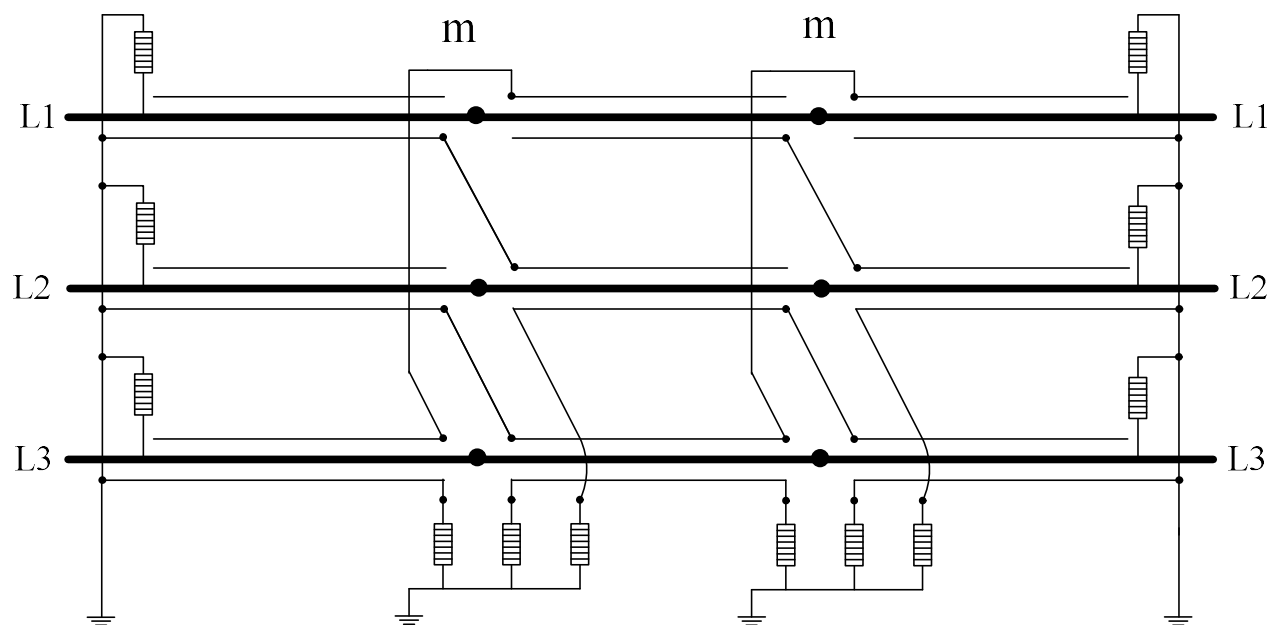
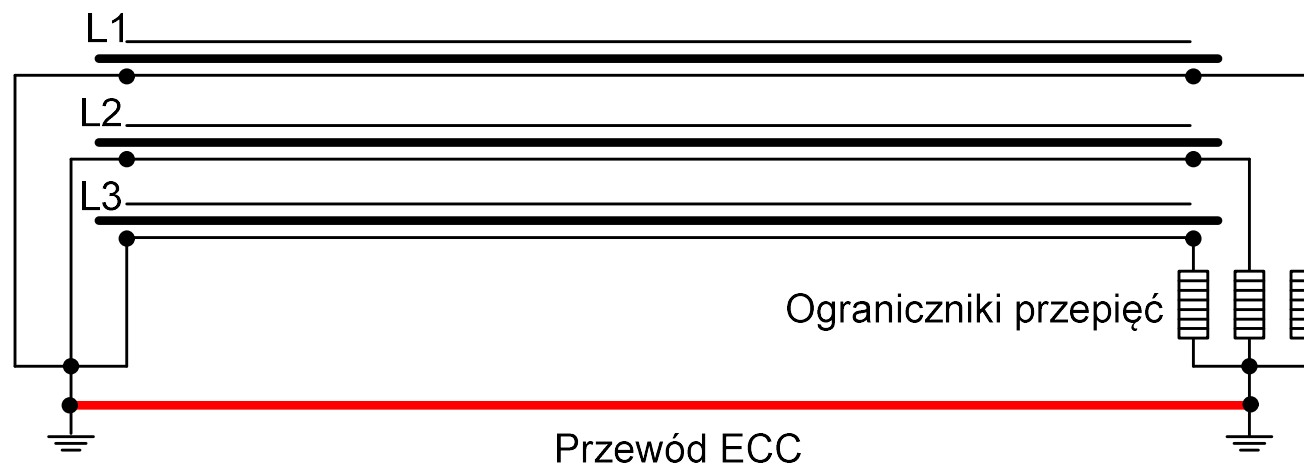
$$r = 2 \text{ uszkodzenia/(100 km} \cdot \text{rok)};$$

$$L_f = R_a / r = 125 \text{ m}.$$

$$L_p = \frac{1}{(4500 \cdot 0,5)} \left[ \left( \frac{550}{1,15} \right) - 249 \right] \cdot (250 + 125) = 38 \text{ m},$$

Dla  $f_s = 1$  (brak tłumienia ulotowego)  $L_p = 19 \text{ m}$

# Dobór ograniczników do ochrony osłon zewnętrznych kabli WN

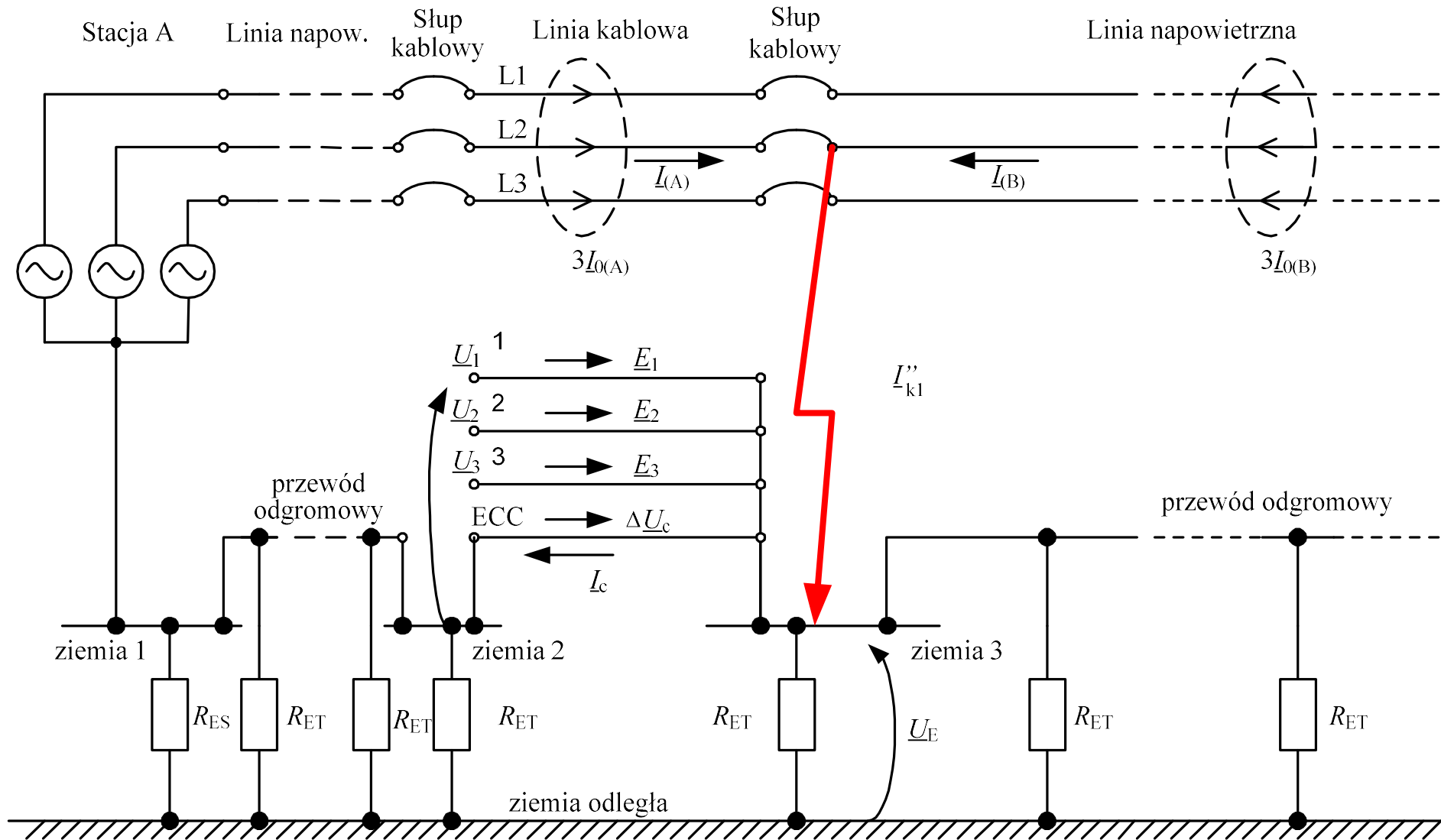


Sposoby łączenia i uziemiania żył powrotnych kabli wymagające dodatkowej ochrony osłon kabli (muf)

# Dobór ograniczników do ochrony osłon zewnętrznych kabli WN

- W układach SPB w celu ochrony osłon kabli należy na otwartych (nieuziemionych) końcach żył powrotnych tych kabli instalować ograniczniki przepięć SN, możliwie blisko głowic.
- Ograniczniki te mają za zadanie ochronę osłon kabli WN przed przepięciami o charakterze udarowym (przepięcia piorunowe i łączeniowe), natomiast nie są w stanie bez zniszczenia chronić przed przepięciami o częstotliwości sieciowej występującymi np. podczas zwarc. Stąd konieczność doboru takich parametrów ograniczników, które zapewniają ich działanie dopiero po przekroczeniu maksymalnych wartościach napięć w układzie żyła powrotna – ziemia lokalna występujących podczas zwarc.
- Samo ograniczanie wartości maksymalnych napięć w układzie żyła powrotna – ziemia lokalna powinno odbywać się na zasadzie doboru odpowiedniego układu połączeń i uziemień żył powrotnych i zastosowania odpowiedniego kabla lub kabli ECC.
- Napięcie pracy ciągłej  $U_c$  ogranicznika przepięć do ochrony osłon kabli WN powinno być wyższe od największej wartości napięcia indukowanego w układzie żyła powrotna – ziemia, przy maksymalnym prądzie zakłóceńowym.
- Najgorszym przypadkiem zakłócenia jest dla układu SPB zwarcie jednofazowe zlokalizowane poza rozważaną linią kablową.

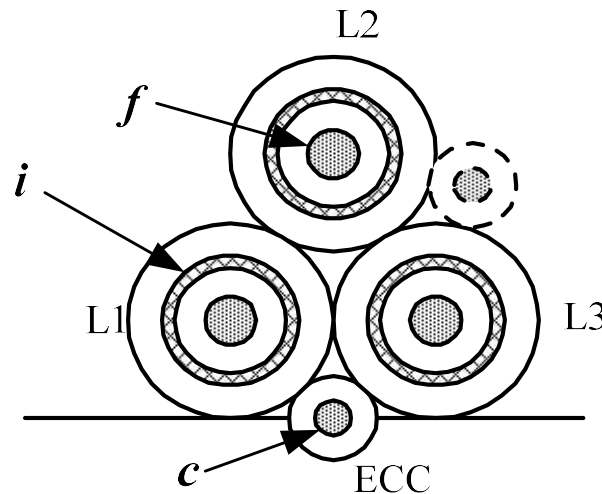
# Dobór ograniczników do ochrony osłon zewnętrznych kabli WN



# Dobór ograniczników do ochrony osłon zewnętrznych kabli WN

Napięcie pracy ciągłej  $U_c$  ogranicznika przepięć do ochrony osłon kabli WN, przy zastosowaniu przewodu ECC powinno być dobrane na podstawie nierówności

$$5 \text{ kV} \geq U_c \geq \left| - \left[ R'_c + j0,145 \lg \frac{2S_{cf}^2}{d \cdot \gamma_c} \right] \cdot \underline{I}_f \cdot L \right|$$



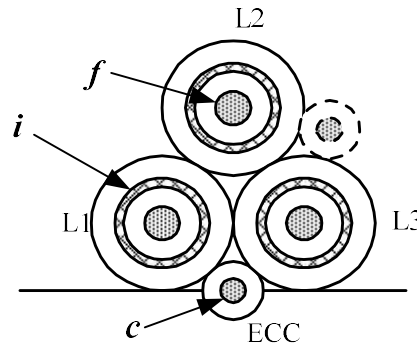
- $\underline{I}_f$  – prąd płynący w kablu fazowym linii WN przy zwarcu 1-fazowym poza kablem,
- $L$  – długość linii kablowej, w km,
- $\gamma_c$  – geometryczny promień zastępczy żyły kabla ECC (w przybliżeniu jest równy 0,75 średnicy żyły kabla ECC/2), w m,
- $S_{cf}$  – średnia geometryczna odległość kabla fazowego (dotkniętego zwarcie) i kabla ECC), w m,
- $d$  – średnia geometryczna średnica żyły powrotnej (można przyjąć średnią wartość obliczoną z średnicy wewnętrznej i zewnętrznej żyły powrotnej), w m,
- $R'_c$  – rezystancja jednostkowa żyły kabla ECC, w  $\Omega/\text{km}$ .

# Dobór ograniczników do ochrony osłon zewnętrznych kabli WN

Przykład:

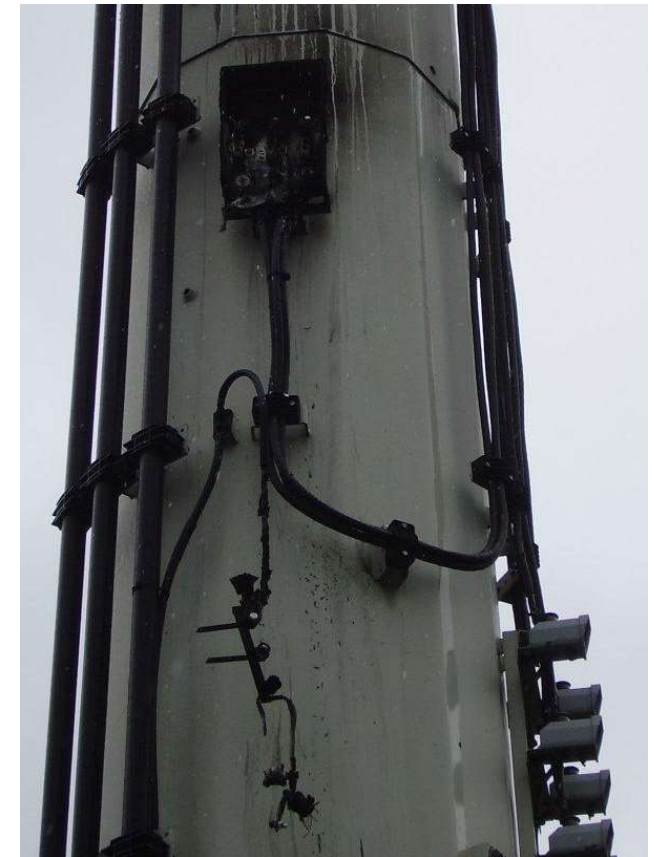
Dobrać ograniczniki przepięć osłon kabli XRUHKXS 1x800RMC/210 64/110 (123) kV w układzie SPB. W układzie zastosowano przewód ECC o przekroju 300 mm<sup>2</sup> (Al).

$I_f$  – 20 kA,  
 $L$  – 0,5 km,  
 $\gamma_c$  – 0,007613 m,  
 $S_{cf}$  – 0,118 m,  
 $d$  – 0,0742 m,  
 $R'_c$  – 0,101 w  $\Omega/\text{km}$ .



$$U_o = \left| - \left[ 0,101 + j0,145 \lg \frac{20,118^2}{0,0742 \cdot 0,007613} \right] \cdot 20 \cdot 0,5 \right| = 2,7 \text{ kV}$$

$$5 \text{ kV} \geq U_c \geq 2,7 \text{ kV}$$



# Dobór ograniczników do ochrony osłon zewnętrznych kabli WN

Napięcie znamionowe $U_r$	Maksymalne napięcie ciągłej pracy $U_c$	Napięcie obniżone w kV (wartość szczytowa) przy różnych prądach uderowych							
		Udar 1/... $\mu s$	Udar 8/20 $\mu s$				Udar 30/60 $\mu s$		
		10kA	2.5kA	5kA	10kA	20kA	125A	250A	500A
kV	kV	kV	kV	kV	kV	kV	kV	kV	kV
1.2	1.0	3,55	2.8	2.9	3.2	3.5	2.3	2.3	2.4
2.2	1.8	6,49	5.0	5.4	5.9	6.5	4.2	4.3	4.5
2.5	2.0	7,38	5.7	6.1	6.8	7.4	4.7	4.9	5.1
3	2.4	8.85	6.9	7.4	8.1	8.8	5.7	5.9	6.1
4	3.2	11,68	9.2	9.8	10.8	11.8	7.6	7.8	8.2

Jeżeli wiadomo, że zwarcie jest wyłączane po 1 s, można wykorzystać możliwość pochłonięcia określonej energii przez ograniczniki (wykorzystać współczynnik  $T_c$ )

$$U_c \geq \frac{U_o}{T_c} = \frac{2,7}{1,386} = 1,95 \text{ kV}$$

Napięcie przemienne w odniesieniu do charakterystyki TOV bez energii wstępnej

$U_{TOV}$  dla  $t=1$  s      1.178  $U_r$  = 1.473  $U_c$   
 $U_{TOV}$  dla  $t=3$  s      1.150  $U_r$  = 1.438  $U_c$   
 $U_{TOV}$  dla  $t=10$  s      1.119  $U_r$  = 1.399  $U_c$

Napięcie przemienne w odniesieniu do charakterystyki TOV z energią wstępną 1.1 As

$U_{TOV}$  dla  $t=1$  s      1.109  $U_r$  = 1.386  $U_c$   
 $U_{TOV}$  dla  $t=3$  s      1.078  $U_r$  = 1.348  $U_c$   
 $U_{TOV}$  dla  $t=10$  s      1.040  $U_r$  = 1.300  $U_c$



# Dobór ograniczników do ochrony osłon zewnętrznych kabli WN

## DANE ELEKTRYCZNE

Klasyfikacja ogranicznika według PN-EN 60099-4:2015

Klasa rozładowania linii według PN-EN 60099-4:2009

Napięcie systemu ( $U_m$ )

Napięcie znamionowe ( $U_r$ )

Znamionowy prąd wyładowczy  $I_n$  8/20  $\mu s$

Prąd graniczny  $I_{hc}$  4/10  $\mu s$

Zdolność przepływu ładunku  $Q_{rs}$

Znamionowy ładunek cieplny  $Q_{th}$

Wytrzymałość na udary prądowe długotrwałe, 2000  $\mu s$

Wytrzymałość zwarciova

DH (Distribution High)

Klasa 1

3.6 – 36 kV

1.2 – 45 kV

10 kA

100 kA

0.4 C

1.1 C

325 A

31.5 kA/0.2s

Klasa ogranicznika	–	DH		DH
Napięcie pracy ciągłej ogranicznika $U_c$	kV	$\leq 5$	1,95	2
Znamionowy prąd wyładowczy 8/20 $\mu s$ $I_n$	kA	10	10	10
Zdolność do powtarzalnego przepływu ładunku $Q_{rs}$	C	$\geq 0,4$		0,4
ładunek dopuszczalny termicznie	C	$\geq 1,1$		1,1
Wytrzymałość zwarciova	kA		20	31,5