

ZBIGNIEW GACEK

WIKTOR KIS

Instytut Elektrotechniki i Sterowania  
Układów Politechniki ŚląskiejOCENA NARAŻENIA IZOLACJI DOZIEMNEJ W SIECIACH  
MIESZANYCH ŚREDNIEGO NAPIĘCIA PRZY PRZEPIĘCIACH PIORUNOWYCH

**Streszczenie.** W artykule zarysowano problem określania i oceny narażeń przepięciowych w elektroenergetycznych sieciach mieszanych napowietrzno-kablowych średniego napięcia. Rozważania przeprowadzono dla najprostszego a jednocześnie najbardziej zagrożonego pod względem przepięciowym układu sieciowego: linia napowietrzna - linia kablowa - stacja (z otwartym odłącznikiem liniowym).

Jakościowy opis przebiegów falowych oparty jest o klasyczną teorię fal wędrownych, przemieszczających się w obwodach o parametrach rozłożonych. W rozważaniach ilościowych wykorzystano wyniki zagranicznych analiz i badań modelowych, odnoszących się do sieci mieszanych średniego napięcia. Uwzględniono jedynie przepięcia spowodowane przez bezpośrednie uderzenia piorunów w elementy konstrukcyjne linii napowietrznej (przy założeniu jednakowego prawdopodobieństwa uderzenia w słupy i przewody robocze).

Spodziewane wartości szczytowe przepięć uzależniono od odległości miejsca uderzenia piorunu od głowicy kablowej, rozróżniając trzy możliwe przedziały długości strefy narażenia piorunowego. Podjęto próbę ilościowej oceny narażenia przepięciowego izolacji doziemnej urządzeń w konkretnym układzie sieciowym 30 kV, zarówno przy pominięciu, jak i przy uwzględnieniu odgromników zaworowych w pobliżu głowicy kablowej.

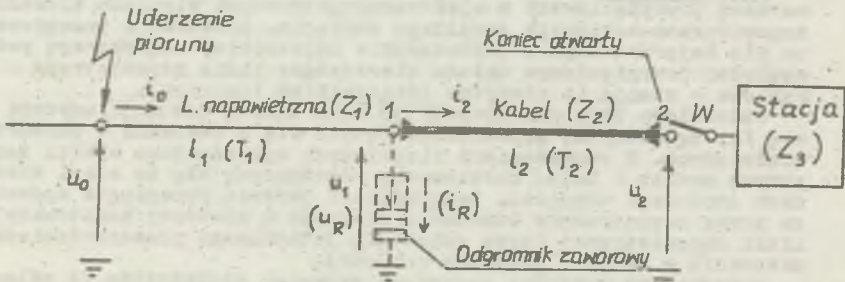
## 1. Wprowadzenie

Układy napowietrzno-kablowe, zwane również mieszany, zawierają odcinki linii kablowych połączone z liniami napowietrznymi (bezpośrednio lub za pośrednictwem transformatorów). Są one coraz częściej fragmentami sieci rozdzielczych miejskich i przemysłowych, przede wszystkim średniego napięcia (SN), tzn. od 6 do 30 kV. W celu określenia poprawnej współpracy linii napowietrznych i kablowych konieczna jest m.in. ocena specyficznego narażenia przepięciowego układów mieszanych, spowodowanego przede wszystkim uderzeniami piorunów w elementy linii napowietrznych lub w ich pobliżu [4]. Obydwa przypadki są równoznaczne z wprowadzeniem do układu fal przepięciowych, rozchodzących się z dużą prędkością od miejsca uderzenia piorunu. W referacie dokonano próby oceny narażenia przepięciowego wybranych elementów sieci mieszanych SN, w oparciu o wyniki obliczeń i pomiarów - przy uwzględnieniu środków ochrony przeciwprzepięciowej.

## 2. Teoretyczne podstawy opisu przebiegów piorunowych w wybranych sieciach mieszanych

W rozważaniach technicznych, zjawiska przebiegów w sieciach mieszanych rozpatruje się najczęściej w oparciu o klasyczną teorię fal wędrownych w obwodach o stałych rozłożonych [1,2] .

Zakłada się przy tym uproszczony, jedнопроводовый schemat obliczeniowy w postaci układu doziemnego jednej linii napowietrznej, połączonej z urządzeniami stacyjnymi za pośrednictwem kabla (rys. 1). Zwykle rozpatruje się przypadek najprostszы i jednocześnie najgroźniejszy, gdy układ nie jest chroniony odgromnikami a wyłącznik na stacyjnym końcu kabla jest otwarty.



Rys. 1. Uproszczony schemat do obliczeń przebiegów w sieci mieszanej  
Fig. 1. Simplified scheme for calculation of overvoltages in overhead-cable line networks

Ze względu na znacznie zróżnicowane wartości doziemnych impedancji falowych linii napowietrznej ( $Z_1 = 350 \dots 500 \Omega$ ) i linii kablowej ( $Z_2 = 15 \dots 75 \Omega$ ) skutkiem nadejścia fali początkowej ( $u_0, i_0$ ) do punktu węzłowego (1) jest dynamiczny stan nieustalony, który można opisać ogólnie za pomocą układu równań:

$$u_0 + u_{11} = u_{2p} \quad \text{oraz} \quad i_0 + i_{11} = i_{2p} \quad (1)$$

gdzie:  $i_0 = \frac{u_0}{Z_1}$  - fala prądowa początkowa;  $i_{2p} = \frac{u_{2p}}{Z_2}$  - fala prądowa przepuszczona na linię kablową;  $i_{11} = -\frac{u_{11}}{Z_1}$  - składowa fala prądowa odbita od punktu węzłowego (wracająca na linię napowietrzną). Dla określonego rodzaju napięcia wymuszającego (w postaci wędrownego fali przebiegowej  $u_0$ ) oraz zadanych parametrów falowych po obu stronach węzła 1, układ równań (1) umożliwi obliczenia fali napięciowej przepuszczanej:

$$u_{2p} = \frac{2Z_2}{Z_1 + Z_2} u_0 = \alpha_{12} u_0 \quad (2)$$

przy czym  $\alpha_{12} = \frac{2Z_2}{Z_1 + Z_2} < 1$  - współczynnik przepuszczenia z linii napowietrznej na linię kablową.

Fala przepuszczona, opisana równaniem (2), dochodząc do końca kabla trafia na punkt węzłowy 2, dla którego są również słuszne zależności określone dla węzła 1, [2] tym jednak, że jako falę nadchodzącą (wymuszającą) należy traktować falę  $u_{2p}$ ,  $i_{2p}$ . Wynika stąd, że napięciowa fala przepuszczona może być w tym przypadku opisana formalnie następująco:

$$u_{3p} = \frac{2Z_3}{Z_2 + Z_3} u_{2p} = \alpha_{23} u_0 \quad (3)$$

przy czym  $\alpha_{23} = \frac{2Z_3}{Z_2 + Z_3}$  - współczynnik przepuszczenia z linii kablowej do stacji (o zastępczej impedancji obliczeniowej  $Z_3$ ).

Najniekorzystniejszy przypadek teoretyczny - podwojenie się napięcia w węzle 2 - występuje wtedy, gdy koniec kabla jest otwarty ( $Z_3 = \infty$ ). Praktycznie takie samo spiętrzenie napięcia ma miejsce również w przypadku przyłączenia transformatora stacyjnego SN o znacznej pojemności wejściowej ( $C_w = 1000 \dots 4000$  pF) i obliczeniowej impedancji falowej ( $Z_3 = 2000 \dots 4000 \Omega$ ).

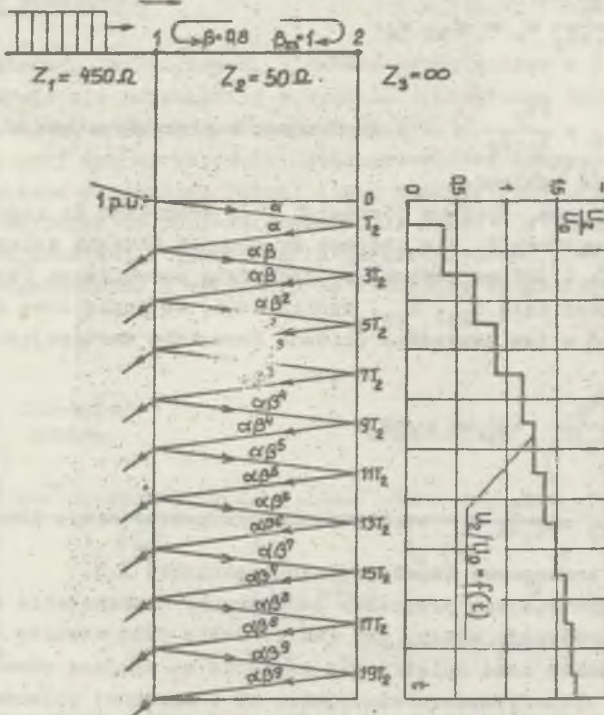
Rozpatrując zjawiska przepięciowe w powyższym układzie (w przedziale czasowym dłuższym od podwojonego czasu propagacji w odcinku kabla), należy uwzględnić kolejne odbicia wielokrotne fal w punktach węzłowych 1 i 2, posługując się np. metodą graficzną Bewley'a [1,2,3]. Napięcie w dowolnym punkcie kabla jest bowiem równe w każdej chwili sumie fal biegnących w obu kierunkach. Z przykładu podanego na rys. 2 wynika, że napięcie na otwartym końcu kabla (lub na przyłączonych urządzeniach stacyjnych) może znacznie przewyższać wartość szczytową fali nadchodzącej.

Przepięcia na końcach kabla w układzie linia napowietrzna-kabel z odgromnikiem zaworowym na liniowym końcu kabla (przy otwartym wyłączniku w stacji) zależą przede wszystkim od:

- kształtu i wartości szczytowych fali prądowej  $i_0$  oraz fali napięciowej  $u_0$  w miejscu uderzenia piorunu w linię napowietrzną,
- odległości punktu węzłowego linia-kabel od miejsca uderzenia piorunu ( $l_1$ ), wyrażonej przez czas propagacji  $T_1 = l_1/v_1$ ,
- długości odcinka kabla ( $l_2$ ), wyrażonej przez czas propagacji  $T_2 = l_2/v_2$ ,
- impedancji falowych linii napowietrznej ( $Z_1$ ) i kablowej ( $Z_2$ ).



L. napowietrzna Linia kablowa Koniec otwarty  
 $\alpha = 0,2$



Rys. 2. Przykład wyznaczania przebiegu fali napięciowej w punkcie węzłowym [2] metodą graficzną Bewley'a [4]

Fig. 2. Example of estimation of voltage wave in the node 2 using graphical Bewley's method [4]

- uderowego napięcia zapłonowego odgromnika ( $U_2$ ),
- charakterystyki napięciowo-czasowej (ochronnej) odgromnika.

Wyrażenie fal napięciowych w postaci przebiegów czasowych w punktach węzłowych (w każdym z końców kabla) jest w ogólnym przypadku zadaniem trudnym, a uzyskiwane wyniki analityczne są niezbyt przydatne w praktyce [5]. Zazwyczaj jest ono dokonywane przy daleko idących założeniach upraszczających, sprowadzających się do:

- rozpatrywania uderzenia piorunu w linię napowietrzną daleko od liniowej głowicy kablowej ( $T_1 \gg T_2$ ),
- założenia przepięcia nadbiegającego z linii napowietrznej w postaci fali o kształcie prostokątnym i wielokrotnie dłuższej od długości kabla,
- pominięcia zjawiska tłumienia oraz odbić fal od miejsca uderzenia piorunu.

Przy takich założeniach można uzasadnić [5], że wartości szczytowe przepięć na stacyjnym oraz liniowym końcu kabla w chwili dojścia do niego  $n$ -tej fali odbitej od końca przeciwległego wynoszą odpowiednio:

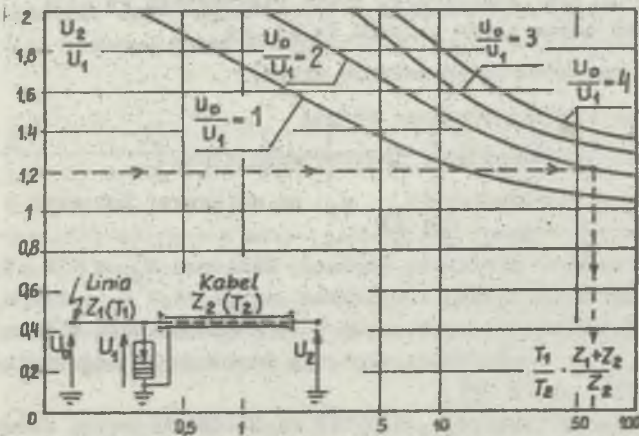
$$u_2(t = T_1 + T_2 + 2nT_2) = 2U_0(1 - \beta_{21}^{n+1}), \quad (4)$$

$$u_1(t = T_1 + 2nT_2) = U_0 \left[ 2 - \beta_{12}^n (1 + \beta_{21}) \right], \quad (5)$$

przy czym  $\beta_{21} = \frac{Z_1 - Z_2}{Z_1 + Z_2}$  - współczynnik odbicia dla fali biegnącej z kabla

do linii napowietrznej;  $U_0$  - wartość szczytowa fali napięciowej nadchodzącej z linii w wyniku dalekich uderzeń piorunów (ograniczona od góry wytrzymałością udarową piorunową izolacji liniowej).

Wzory (4) i (5) nie uwzględniają jednak działania odgromnika zaworowego, obcinającego przepięcia w węzle 1 do poziomu zbliżonego do wartości udarowego napięcia zapłonowego ( $U_1 = U_R \approx U_Z$ ). Zależności empiryczne między wielkościami ujętymi w tych wzorach, z uwzględnieniem działania odgromnika zaworowego, podano na rys. 3.



Rys. 3. Względne amplitudy przepięć na końcach kabla w zależności od parametrów falowych układu linia-kabel z odgromnikiem zaworowym [7]

Fig. 3. Relationship between the relative magnitudes of overvoltages on cable line ends and parameters of the overhead-cable network with lightning arresters [7]

### 3. Ocena narażenia przepięciowego kabli w wybranej sieci mieszanej SN

W dostępnej literaturze nie znaleziono wyników badań eksploatacyjnych lub modelowych, pozwalających na określenie narażenia przepięciowego izolacji kablowej w sieciach mieszanych SN. Próbę oceny tego narażenia podjęto w oparciu o wyniki obliczeń spodziewanych wartości przepięć piorunowych nadchodzących z linii napowietrznych [4], przyjmując wymienione poniżej założenia.

- Rozpatruje się układ linia napowietrzna-kabel-stacja 30 kV, zawierający linię napowietrzną o impedancji falowej  $Z_1 = 360 \Omega$  (bez przewodu odgromowego na całej długości) oraz linię kablową o impedancji falowej  $Z_2 = 25 \Omega$ .
- Nie uwzględnia się wielokrotnych odbić fal przepięciowych w linii napowietrznej oraz możliwości wystąpienia przeskoków międzyfazowych.
- Przy uderzeniu piorunu w słup, fala przepięciowa przedostaje się na przewód roboczy linii w wyniku przeskoku odwrotnego, jej wartość szczytowa (w kV) wynosi:

$$U_0 \approx I_{pR} R_s + L'_s h_s \dot{s}_I, \quad (6)$$

gdzie:  $I_{pR} \approx I_{po}$  - wartość szczytowa prądu piorunowego płynącego przez słup, zbliżona do tzw. zwarciovego prądu piorunowego (w kA);

$s_I$  - stromość czoła prądu piorunu (w kA  $\mu s^{-1}$ );

$R_s = 10 \Omega$  - rezystancja uziemienia słupa;

$h_s = 12,2$  m - średnia wysokość słupa;

$L'_s = 0,7 \mu H \cdot m^{-1}$  - jednostkowa indukcyjność słupa.

- Parametry prądu piorunowego ( $I_{pp}$ ,  $s_I$ ) są zmiennymi losowymi o dystrybucjach podanych w pracy [6] x).
- Wytrzymałość udarowa piorunowa izolacji liniowej  $U_{pp} = 170$  kV, natomiast izolacji urządzeń za węzłem linia-kabel wynosi  $1,2 U_z = 1,2 U_0/2$  [8].
- Stosunek wartości szczytowych przepięcia nadchodzącego z linii napowietrznej ( $U_0 = U_{pp}$ ) do udarowego napięcia zapłonowego odgromnika zaworowego ( $U_z$ ) wynosi ok. 2 [9].
- Narażenie izolacji kablowej zależy od częstości przepięć nadchodzących z linii o amplitudach zbliżonych lub równych  $U_{pp}$ .
- Rozpatruje się trzy strefy możliwych uderzeń w linię napowietrzną względem liniowej głowicy kabla:

x) Parametry prądów piorunowych i prawdopodobieństwa ich występowania znaleźć można również w materiałach VII SPETO [5].



- a) w odległości  $l_b \leq 400$  m (2 przęsła linii), w której amplituda przepięć zależy przede wszystkim od parametrów piorunów, rezystancji uziemienia i indukcyjności słupa;
- b) w odległości  $400 < l_b \leq 3000$  m, w której amplituda przepięć jest w przybliżeniu równa wartości  $U_{pp}$ ;
- c) w odległości większej od 3000 m (fala nadchodząca do węzła linia kabel jest wyłumiona do wartości bezpiecznej dla izolacji rozpatrywanego układu).
- Prawdopodobieństwa uderzenia piorunu w słup i przewód roboczy linii napowietrznej są w przybliżeniu jednakowe (po ok. 0,5).
- Powierzchnie strefy uderzeń piorunów wokół odcinka linii napowietrznej (w  $\text{km}^2$ ):

$$S \approx 10 h_{sr} l \cdot 10^{-6} \quad (7)$$

przy czym  $h_{sr} = 9$  m - średnia wysokość zawieszenia przewodu roboczego linii;  $l$  - długość rozpatrywanego odcinka linii napowietrznej (w m).

- Spodziewana liczba uderzeń piorunów w ciągu roku w danym terenie wynika z wartości wskaźnika aktywności burzowej  $n_r = 1 \dots 4$  uderzeń /  $\text{km}^2 \cdot \text{rok}$ .
- Prawdopodobieństwa  $P(s_n)$  występowania prądu piorunowego o największych stromościach czoła zawartych w rozpatrywalnych kolejno  $n = 8$  przedziałach (na podstawie dystrybuanty  $P(s_I)$  z pracy [6]):

$s_I, \text{kA} \cdot \mu\text{s}^{-1}$	0...4	4...6	6...10	10...15	15...20	20...30	30...60	60...100
$P(s_n)$	0,01	0,04	0,15	0,25	0,20	0,23	0,11	0,01

W przypadku uderzeń w słup linii napowietrznej blisko głowicy kablowej (do 400 m), przepięcie przedostanie się na przewód roboczy wskutek przeskoaku odwrotnego, gdy:  $I_{pR} R_S + I'_s h_s s_I > U_{pp} = 170$  kV (patrz wzór (6)). Prawdopodobieństwo wystąpienia przeskoaku odwrotnego dla przyjętych przedziałów wartości stromości czoła prądu piorunowego:  $P_{pn} = \sum_n P(s_n)$ .

$P(I_{pn}) = 0,964$ , natomiast prawdopodobieństwa przekroczenia określonych wartości szczytowych prądu piorunu ( $I_{po} > I_{pn}$ ), wynikające z dystrybuanty  $P(I_{po})$  podanej w pracy [6], wynoszą:

$s_n, \text{kA} \cdot \mu\text{s}^{-1}$	4	6	10	15	20	30	60	100
$I_{pn} \geq \frac{U_{pp} - I'_s h_s s_n}{R_S}, \text{kA}$	13,6	11,9	8,5	4,2	Przeskok odwrotny niezależnie od wartości $I_{pn}$			
$P(I_{pn})$	0,75	0,8	0,88	0,97	1			

Przy uderzeniu piorunu w przewód roboczy w strefie bliskiej głowicy kablowej, wartość szczytowa przepięcia nie przekroczy poziomu  $U_{pp}$ , jeśli  $0,5 I_{pR} Z_1 < U_{pp}$ . Prawdopodobieństwo niespełnienia tego warunku jest równoznaczne z prawdopodobieństwem wystąpienia wartości szczytowej prądu piorunu:  $I_{pR} > 2U_{pp}/Z_1 = 0,94 \text{ kA}$ , wynoszącym  $P_{bp} = 1$  [6].

Uwzględniając, że liczba uderzeń piorunów w strefę bliską:

$N_b \approx 10 h_{gr} l_b n_r \cdot 10^{-6} = 0,036 \dots 0,144$  a ponadto, że liczba uderzeń w słupy i przewody jest praktycznie taka sama, więc:  $N_{bs} \approx N_{bp} \approx 0,5 N_b = 0,018 \dots 0,072$ . Wynikająca stąd spodziewana liczba przepięć o wartościach szczytowych  $U_o \geq U_{pp}$  wynosi:  $N_{ob} \approx N_{bs} P_{bs} + N_{bp} P_{bp} = 0,035 \dots 0,141$ .

Liczba uderzeń piorunów w ciągu roku w strefę daleką:

$N_d \approx 10 h_{gr} (l_d + l_b) n_r \cdot 10^{-6} = 0,234 \dots 0,936$  a ponieważ prawdopodobieństwo nadejścia z linii przepięcia o wartości  $U_o \approx U_{pp}$  wynosi z założenia  $P_d \approx 1$ , więc spodziewana liczba przepięć nadchodzących w takim przypadku do głowicy kablowej:  $N_{od} \approx N_d P_d = 0,234 \dots 0,936$ .

Uwzględniając łącznie uderzenia bliskie i dalekie, spodziewana liczba przepięć piorunowych w ciągu roku, zagrażających izolacji kabla:

$$N_o = N_{ob} + N_{od} \approx 0,269 \dots 1,077.$$

W celu oceny stopnia narażenia izolacji na stacyjnym końcu kabla wykorzystano wykres z rys. 3 dla amplitudy względnej  $U_o/U_1 = 2$ . Przy założonej dopuszczalnej wartości szczytowej przepięcia, wyższej o 20% od napięcia obniżonego przez odgromnik ( $U_2/U_1 \leq 1,2$ ), uzyskano warunek:

$$\frac{Z_1 + Z_2}{Z_2} \cdot \frac{l_1}{l_2} = \frac{Z_1 + Z_2}{Z_2} \cdot \frac{l_1}{2l_2} \geq 60 \quad (8)$$

pozwalający na ocenę skuteczności ochrony przeciwprzepięciowej układu za pomocą odgromnika saworowego w zależności od stosunku odległości uderzenia do długości kabla  $l_1/l_2 \geq 7,8$  (dla rozpatrywanego przypadku). Przy uderzeniach bliższych niż wynika to z podanego stosunku, ochrona odgromowa kabla jest w zasadzie nieskuteczna. Możliwość przebicia izolacji kabla jest w tym przypadku uzależniona od małego prawdopodobieństwa wystąpienia dostatecznie dużych wartości prądów piorunowych.

Przykładowo, dla długości kabla  $l_2 = 100 \text{ m}$ , niebezpieczna odległość miejsca uderzenia od głowicy kablowej  $l_1 \leq 780 \text{ m}$ . Obejmuje ona całą strefę uderzeń bliskich ( $l_b = 400 \text{ m}$ ) i tylko część strefy uderzeń dalekich. Ponieważ w strefie uderzeń bliskich:  $N_{ob} \approx 0,035 \dots 0,141$  a w strefie uderzeń dalekich:  $N_{od} \approx 0,234 \dots 0,936$ , to spodziewana liczba przepięć w ciągu roku zagrażających izolacji na stacyjnym końcu kabla - skorygowana stosownie do uwzględnionej części długości strefy:  $N_o \approx N_{ob} + N_{od} \frac{l_1 - l_b}{l_2 - l_b} = 0,07 \dots 0,28$ . W wyniku przepięć piorunowych nadchodzących z linii napo-



wietrznej, przebicie izolacji przykładowo rozpatrywanego kabla może wystąpić więc raz na ok. 3,6...14,5 lat (zależnie od wartości wskaźnika aktywności burzowej  $n_r = 1...4$  uderzeń/km<sup>2</sup>.rok).

#### 4. Podsumowanie

Przebiegi przebiegów piorunowych w sieciach mieszanych narastają w wyniku nakładania się fal nadchodzących z linii napowietrznych (powstałych wskutek bezpośredniego uderzenia w przewód fazowy lub przeskoaku odwrotnego) oraz odbić wielokrotnych od końców kabla i od miejsca uderzenia. Obliczenia takich przebiegów są bardzo utrudnione. Statystyczny rozkład wartości szczytowych przebiegów w kablu uzależniony jest m.in. od losowego rozkładu punktów uderzenia piorunów w linię napowietrzną oraz od rozkładów szczytowych i stromości czoła udarowych prądów piorunowych.

Najniekorzystniejszym układem z punktu widzenia narażenia przebiegiowego jest układ połączeń linia napowietrzna-linia kablowa otwarta na końcu. W skrajnym przypadku, amplituda przebiegów może osiągnąć teoretycznie podwojoną wartość szczytową fali nadchodzącej z linii napowietrznej. Z uwagi na spiętrzenie przebiegów w kablu znacznie powyżej amplitudy fali nadchodzącej, stosowanie środków ochrony przeciwprzebiegiowej w układzie linia napowietrzna-kabł SN jest konieczne. Jednym z możliwych wariantów ochrony jest zastosowanie odgromników zaworowych przy głowicach kablowych od strony linii. Wariant ten rozpatrywano przy założeniu, że: nie uwzględnia się odbić fal od miejsca uderzenia, charakterystyki odgromników zaworowych są idealne, fale nadchodzące są długie w porównaniu z długością kabla, zapłon odgromnika następuje natychmiast po osiągnięciu wartości udarowego napięcia zapłonowego.

Należy podkreślić, że przedstawiona próba oceny narażenia izolacji kabla ma charakter uproszczony i szacunkowy. Uzyskanie bardziej wiarygodnych i dokładnych wyników bez badań symulacyjnych wydaje się praktycznie niemożliwe.

#### LITERATURA

- [1] Szpor S.: Ochrona odgromowa. WNT, Warszawa 1975, t.2.
- [2] Jakubowski J.L.: Podstawy teorii przebiegów w układach elektroenergetycznych. PWN, Warszawa 1968.
- [3] Gervais G.: Etude des surtensions externes transmises par les jonctions aéro-souterraines à un poste protégé par parafoudres. RGEI n°2, 1972, s. 105-118.

- [4] Stępniewski T., Gacek Z., Kis W.: Warunki współpracy linii napowietrznych z siecią kablową 6-110 kV, cz. I-IV. Inst. Elektroenergetyki i Sterowania Układów Politechniki Śląskiej. Gliwice 1977-1980 (praca niepublikowana)
- [5] Stępniewski T.: Parametry i działania wyładowań piorunowych. Mat. SPETO VII. Gliwice-Ustroń 1984, s. 9-21.
- [6] Berger K., Anderson R.B., Kröninger H.: Parameters of lightning flashes. Electra n° 41, 1975, s. 23-27.
- [7] Widmann W.: Überspannungsschutz von Transformatoren bei nahen Blitzschlägen. Elektrizitätswirtschaft H.2, 1973, s. 33-40.
- [8] PN-81/E-05001 Urządzenia elektroenergetyczne wysokiego napięcia. Znamionowe napięcia probiercze izolacji.
- [9] Karta katalogowa G06/052/00. Odgromniki zaworowe typu GZSc 3...30 kV. ZWAR, Warszawa.

Recenzent: doc. dr hab. inż. Zbigniew Pohl

Wpłynęło do redakcji dn. 15 kwietnia 1985 r.

ОЦЕНКА УГРОЗЫ ИЗОЛЯЦИИ ОТНОСИТЕЛЬНО ЗЕМЛИ В ВОЗДУШНО - КАБЕЛЬНЫХ СЕТЯХ СРЕДНЕГО НАПРЯЖЕНИЯ ПРИ МОЛНИЕВЫХ ПЕРЕНАПРЯЖЕНИЯХ

Резюме

В статье намечен вопрос определения и оценки угроз при перенапряжениях в смешанных воздушно-кабельных электроэнергетических сетях среднего напряжения. Обсуждена простейшая и в то же время наиболее опасная, с точки зрения перенапряжений, сетевая схема: воздушная линия - кабельная линия - подстанция (с разомкнутым линейным разъединителем).

Качественное описание волновых процессов основано на классической теории бегущих волн, движущихся в цепях с распределёнными параметрами. В количественных расчётах использовались результаты зарубежных анализов и модельных исследований, касающихся смешанных сетей среднего напряжения. Учитывались только перенапряжения вызванные прямым волновым ударом в конструкционные детали воздушной линии (принимая одинаковую вероятность удара в опору и в рабочем проводе).

Ожидаемые максимальные значения перенапряжений поставлены в зависимости от расстояния места удара молнии до концевой кабельной муфты, различая при этом три возможных промежутка зоны моллевой угрозы. Проведена попытка количественной оценки изоляции относительно земли от перенапряжений в конкретной сетевой схеме 30 кВ, как с пренебрежением так и с учётом вентильных разрядников в близости концевой кабельной муфты.

## ESTIMATION OF INSULATION OVERSTRESSING IN THE MEDIUM VOLTAGE OVERHEAD-CABLE POWER NETWORKS DURING LIGHTNING OVERVOLTAGES

## S u m m a r y

The problem of analysis and estimation of insulation overstressing in the medium voltage overhead-cable power networks is discussed. The simplest but the most liable to overstressing arrangement is considered: overhead line - cable line - substation (with an opened disconnecter).

The qualitative description of wave propagation is based on the classic theory of traveling waves in circuits with distributed parameters. For quantitative considerations, the results of foreign investigations of overhead-cable medium voltage lines are applied. The overvoltages caused by direct stroke of lightning on an overhead line are only taken into account (providing that the probabilities of stroke on a tower and on a conductor are equal).

The expected peak values of overvoltages depend on the distance between stroke location and the cable-line end. Three zones of lightning stroke exposure are determined. An attempt is made for the estimation of the line - to - ground insulation overstressing of the equipment in a certain 30 kV power network with and without lightning arresters located near the cable-line end.