

Aleksandra SCHÖTT*

ALGORYTM DOBORU UZIEMIENIA W LINIACH NAPOWIETRZNYCH POWYŻEJ 1 kV

Projektując linię napowietrzne SN oraz WN należy pamiętać o zapewnieniu bezpieczeństwa publicznego w odniesieniu do napięcia krokowego rażeniowego oraz napięcia dotykowego rażeniowego, które mogą pojawić się podczas trwania zwarcia doziemnego. W tym celu wykorzystuje się algorytm doboru uziemienia zgodny z normą PN-EN 50341. Podstawowym problemem metody wynikającej z algorytmu jest skomplikowany proces otrzymywania danych niezbędnych do poprawnego przeprowadzenia kroków algorytmu. Ze względu na te trudności, można wykorzystać inne parametry, dzięki którym otrzymuje się krzywe pozwalające na określenie dopuszczalnego napięcia dotykowego spodziewanego dla różnych wartości rezystancji dodatkowych. Metoda ta nazwana jest kryterium wtórnym doboru uziemienia. Przeprowadzona analiza istniejącego algorytmu oraz wyznaczenie krzywych przy użyciu kryterium wtórnego wynikającego z tego algorytmu, pozwala na porównanie poziomu trudności wykorzystania metod w praktyce.

SŁOWA KLUCZOWE: ochrona od porażień, napięcie dotykowe rażeniowe, algorytm doboru uziemienia, kryterium wtórne.

1. WPROWADZENIE

Projektowanie linii napowietrznych SN oraz WN wymaga szeregu przedsięwzięć pozwalających na poprawną pracę takiej linii. Jednym z nich jest zapewnienie osobom przebywającym w pobliżu takich urządzeń ochrony od porażień. Ochrona od porażień w przypadku linii napowietrznych jest przede wszystkim ukierunkowana na ochronę przy dotyku pośrednim, ponieważ w liniach napowietrznych istnieje ryzyko jednoczesnego wystąpienia wszystkich trzech czynników powodujących zwiększenie zagrożenia porażeniowego:

- zaistnienia zwarcia doziemnego,
- pojawienia się zbyt wysokiego napięcia w miejscu zwarcia,
- dotknięcie w trakcie doziemienia części przewodzącej znajdującej się pod napięciem w wyniku uszkodzenia.

Ze względu na możliwość wystąpienia zagrożenia porażeniowego, w celu ochrony przy zakłóceniu wykorzystuje się przede wszystkim techniczny środek ochrony jakim jest uziemienie ochronne. Uziemienie ochronne jest metodą

* Politechnika Poznańska

o największej skuteczności działania, o najlepszej trwałości i co równie istotne, jest to metoda najtańsza.

Aktualną podstawą prawną ochrony od porażen przy dotyku pośrednim na drodze dotyku konstrukcja wsporcza-ręka jest norma [1]. Podstawowymi założeniami jakimi należy się kierować przy projektowaniu instalacji uziemiającej są:

- zapewnienie wytrzymałości mechanicznej oraz wykorzystanie materiałów cechujących się odpowiednią odpornością na korozję,
- zapewnienie odpowiedniej wytrzymałości termicznej (związane z cieplnym oddziaływaniem np. prądu zwarcia doziemnego),
- zapewnienie bezpieczeństwa publicznego w odniesieniu do napięcia krokowego rażeniowego oraz napięcia dotykowego rażeniowego, które pojawiają się w trakcie zwarc doziemnych.

2. DOBÓR UZIEMIENIA ZE WZGLĘDU NA OCHRONĘ OD PORAŻEŃ

2.1. Napięcia dotykowe spodziewane przy dotyku pośrednim

Zgodnie z definicją zaczerpniętą z wycofanej już normy [2] napięcie dotykowe spodziewane U_{ST} to napięcie, które pojawia się podczas doziemienia pomiędzy częściami przewodzącymi a ziemią, w momencie, gdy części te nie są dotykane. Wartość napięcia dotykowego spodziewanego zależy od napięcia uziomowego U_E oraz od współczynnika dotykowego α_{ST} , zależnego przede wszystkim od kształtu uziomu.

$$U_{ST} = \alpha_{ST} \cdot U_E \quad (1)$$

Wykorzystując schemat zastępczy obwodu rażeniowego i znajomość zależności na napięcie dotykowe spodziewane można wyprowadzić wzór na prąd rażenia I_B , przepływający przez ciało człowieka w czasie trwania doziemienia.

$$I_B = \frac{U_{ST}}{R_p + Z_B + R_a} \quad (2)$$

$$I_B = \frac{\alpha_{ST} \cdot U_E}{R_p + Z_B + R_a} \quad (3)$$

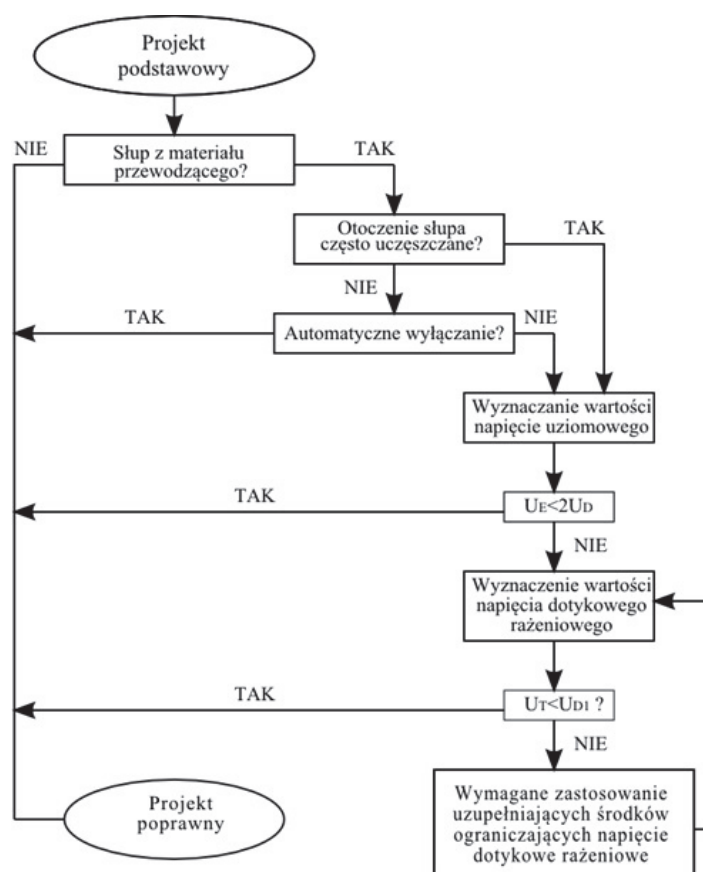
$$I_B = \frac{\alpha_{ST} \cdot I_E \cdot R_E}{R_p + Z_B + R_a} \quad (4)$$

Analiza otrzymanego wzoru pozwala na określenie parametrów, od których zależą zarówno prąd rażeniowy, jak i skutki rażenia. Podstawowymi parametrami są prąd uziomowy I_E (w ogólnym przypadku linii napowietrznych jest równy prądowi zwarcia I_{k1} lub jest do tego prądu proporcjonalny), rezystancja uziemienia R_E oraz impedancje zawarte w mianowniku wzoru (2). Wśród nich

wyróżnia się przede wszystkim impedancją ciała człowieka Z_B oraz rezystancją dodatkową R_a . Rezystancja przejścia na drodze ręka-konstrukcja wsporcza R_p jest w ogólnym przypadku pomijalnie mała.

2.2. Algorytm doboru uziemienia

Algorytm doboru uziemienia wynikający z normy [1] to prosty schemat blokowy, który w sposób ogólny obrazuje kroki, jakie należy przejść, aby zaprojektowana instalacja uziemiająca spełniała aktualne warunki ochrony od porażień.



Rys. 1. Algorytm doboru uziemienia

Pierwszy blok „Projekt podstawowy” wymaga dobrania odpowiednich materiałów oraz wymiarów instalacji uziemiającej zgodnie z jej przeznaczeniem z uwzględnieniem odporności na czynniki zewnętrzne oraz wytrzymałość cieplną. Kolejny krok algorytmu wymaga znajomości materiału, z którego wykonano

słup. Dla słupów nieprzewodzących, takich jak odpowiednio przygotowane słupy drewniane, nie stawia się wymagań dotyczących uziemienia i przyjmuje się poprawność wykonania projektu. W przypadku słupów przewodzących, metalowych, żelbetonowych oraz betonowych należy rozpatrzyć kolejne kroki algorytmu.

Znaczący wpływ na poprawność wykonania projektu ma umiejscowienie słupa i związane z tym zainstalowanie samoczynnej automatyki wyłączającej. Dla miejsc, w których ludzie przebywają długo lub często, ale krótko należy rozpatrywać zainstalowanie instalacji uziemiającej.

Umiejscowienie słupa w obszarze o podwyższonym ryzyku wymaga wyznaczenia wartości napięcia uziomowego projektowanej instalacji uziemiającej, która powinna spełniać warunek $U_E < 2U_D$, gdzie $U_D = U_{STp}$. Oznacza to, że wartość napięcia uziomowego powinna być dwukrotnie mniejsza od wartości dopuszczalnego napięcia spodziewanego wynikającego z odpowiednich okoliczności. Niespełnienie tego warunku prowadzi do kolejnego kroku algorytmu polegającego na wyznaczeniu wartości napięcia dotykowego rażeniowego i porównanie do wartości napięcia spodziewanego. Ponowne niespełnienie warunków prowadzi do pętli, w której należy dobrać odpowiednie środki ograniczające to napięcie. Jako środki ograniczające napięcie w przypadku słupów energetycznych rozumie się zastosowanie dodatkowych uziomów otokowych, izolację słupa czy zwiększenie izolacji wierzchniej warstwy gruntu. Spełnienie warunku powoduje doprowadzenie projektu do poprawnego zakończenia. Algorytm ten jest zasadny dla sytuacji, gdy wokół słupa nie występują potencjały przenoszenia [3].

3. KRYTERIUM WTÓRNE DOBORU UZIEMIENIA

3.1. Metoda obliczeniowa

W punkcie 2.2. niniejszego artykułu opisano algorytm poprawnego doboru uziemienia dla słupa linii napowietrznej przy założeniu znajomości zarówno napięcia uziomowego, jak i napięcia dotykowego rażeniowego. Przedstawiona metoda, jakkolwiek najprostsza z punktu widzenia podejścia teoretycznego, nastrocza wielu trudności. Podstawowym problemem jest zmierzenie wartości napięć, na których opiera się algorytm. W celu pominięcia potrzeby znajomości przede wszystkim napięcia uziomowego, można wykorzystać inne parametry wynikające z warunków w pobliżu słupa.

Metoda obliczeniowa wykorzystująca rezystancję dodatkowych obwodów rażeniowych oraz czas trwania zwarcia i wynikający z niego prąd rażeniowy nazywana jest kryterium wtórnym doboru uziemienia. Obliczenie największego dopuszczalnego napięcia spodziewanego U_{STp} , gwarantującego bezpieczeństwo

ludzi przebywających w pobliżu rozpatrywanego słupa jest możliwe po przez zaimplementowanie odpowiedniego algorytmu obliczeń:

$$\begin{array}{c}
 t_F \\
 \downarrow \\
 U_{Tp} = f(t_F) \\
 \downarrow \\
 Z_B = f(U_{Tp}) \\
 \downarrow \\
 I_B = \frac{U_{Tp}}{Z_B}
 \end{array} \tag{5}$$

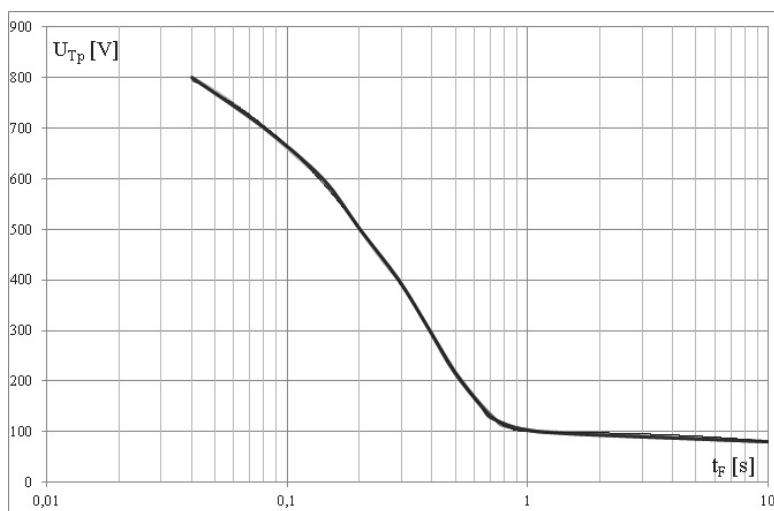
$$\begin{array}{c}
 \downarrow \\
 U_{STp}(t_F) = U_{Tp}(t_F) + I_B \cdot R_a
 \end{array} \tag{6}$$

Wyprowadzenie krzywej zależności napięcia dotykowego spodziewanego jest możliwe tylko po przez wcześniejsze pomiary zależności napięcia dotykowego rażeniowego od czasu trwania zwarcia. W ogólnym przypadku można wykorzystać tablice znajdujące się w normie [1].

Zgodnie z rzezoną normą oraz z komentarzem do wycofanej normy [2] przy obliczaniu napięcia rażeniowego w urządzeniach WN należy rozpatrzyć 4 podstawowe założenia:

- prąd rażeniowy płynie na drodze ręka-stopy,
- prawdopodobieństwo wystąpienia założonej impedancji ciała człowieka wynosi 50%,
- prawdopodobieństwo fibrylacji komór sercowych wynosi 5%,
- nie występują dodatkowe rezystancje [4].

W opisaney powyżej metodzie istnieją 4 etapy prowadzące do uzyskania dopuszczalnego napięcia dotykowego rażeniowego. Pierwszy etap wymaga znajomości zależności $U_{Tp}=f(t_F)$.

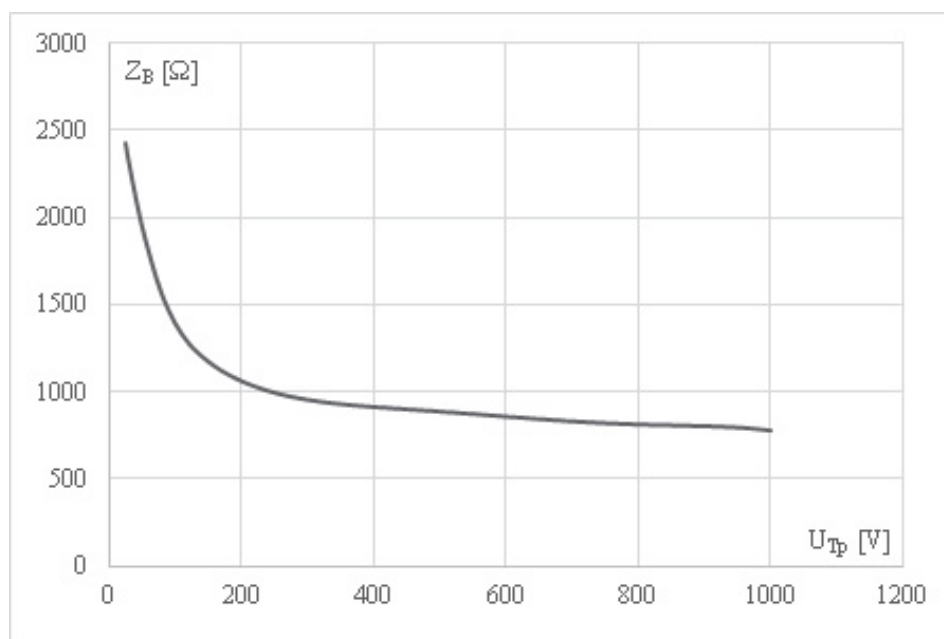
Rys. 2. Zależność $U_{Tp}=f(t_F)$

Kolejnym krokiem jest określenie impedancji ciała człowieka Z_B . W normie [1] podane są wartości tej impedancji ze względu na napięcie dotykowe rażeniowe przy założeniu udziału całkowitej impedancji w obwodzie rażeniowym. Ze względu na założenia ochrony od porażień mówiące o uwzględnieniu najmniej korzystnej możliwości wartości te zostały przemnożone przez współczynnik korekcyjny 0,75. Wyniki zamieszczono w poniższej tabeli.

Tabela 1. Impedancja ciała człowieka Z_B w zależności od napięcia dotykowego wraźeniowego.

Napięcie dotykowe rażeniowe U_T	Impedancja ciała człowieka Z_B
[V]	[Ω]
25	2437,5
50	1968,75
75	1650
100	1406,25
125	1218,75
220	1012,5
700	825
1000	787,5

Na podstawie obliczonych impedancji można wykreślić krzywą impedancji ciała człowieka przedstawioną na poniższym wykresie. Zgodnie z otrzymanymi krzywymi i przy wykorzystaniu wzoru (5) można wyznaczyć niezbędne do dalszych obliczeń wartości prądu rażenia w zależności od czasu trwania zwarcia t_F .



Rys. 3. Zależność $Z_B=f(U_{Tp})$

3.2. Rezystancje dodatkowe

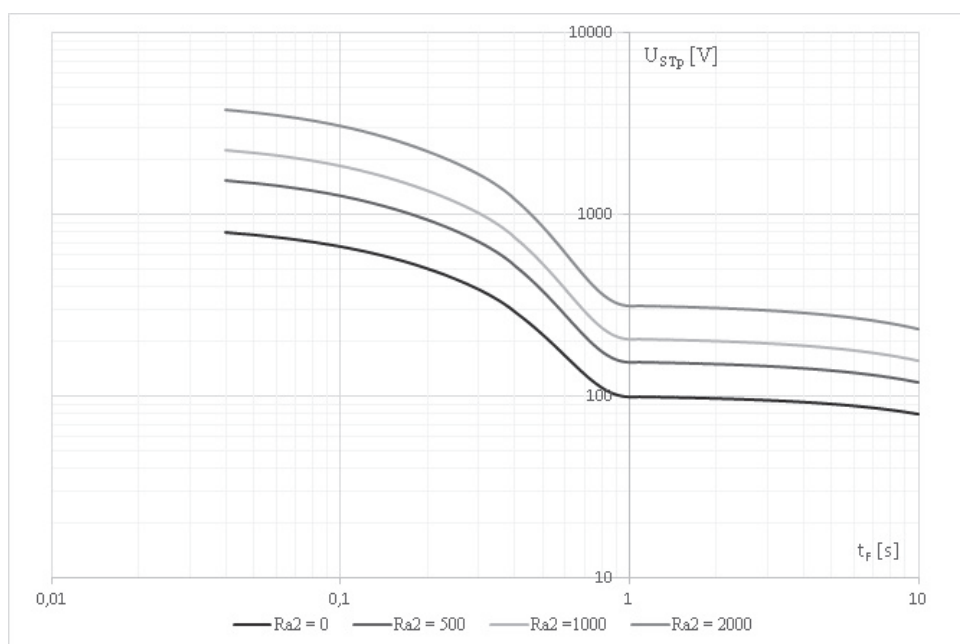
Zgodnie z punktem 2.1 niniejszego artykułu na skutki rażenia największy wpływ poza napięciem dotykowym spodziewanym ma wpływ impedancja ciała człowieka oraz rezystancja dodatkowa R_a , w literaturze najczęściej określana jako suma dwóch rezystancji, rezystancji obuwia R_{a1} oraz rezystancji stanowiska R_{a2} .

$$R_a = R_{a1} + R_{a2} = R_{a1} + 1,5\rho \quad (7)$$

Zmienne wartości rezystancji dodatkowych wynikają z doboru wielkości ze względu na istniejące warunki wokół słupa. Wartość rezystancji obuwia R_{a1} , zgodnie z normami, przyjmuje dwie wartości, 0 Ω przy założeniu braku obuwia lub 1000Ω dla obuwia. Rezystancja R_{a2} , zgodnie ze wzorem (7) zależna jest od rezystywności gruntu jaki występuje w otoczeniu słupa.

3.3. Zależność $U_{STp}=f(t_F)$

Na podstawie opisanej w punkcie 3.1 metody obliczeniowej, przy użyciu arkusza kalkulacyjnego, otrzymano charakterystyki zależności dopuszczalnego napięcia dotykowego spodziewanego od czasu trwania zwarcia. Pierwszy wykres przedstawiony na rys. 4 przedstawia porównanie charakterystyk dla rezystancji obuwia równej 0Ω i różnych wartości rezystywności gruntu w pobliżu słupa. Wartość R_{a1} na tym poziomie przyjmuje się dla założenia, że słup stoi w miejscach, w którym ludzie mogą przebywać bez obuwia. Rezystywności gruntu wybrane do porównania obejmują wartości średnie kolejno dla piasków i żwirów, piasków i żwirów suchych oraz dla gruntów kamiennych. Dla zobrazowania zmian wprowadzanych przez zwiększanie rezystywności gruntu na wykresie umieszczono również krzywą dla $R_{a2}=0 \Omega$.



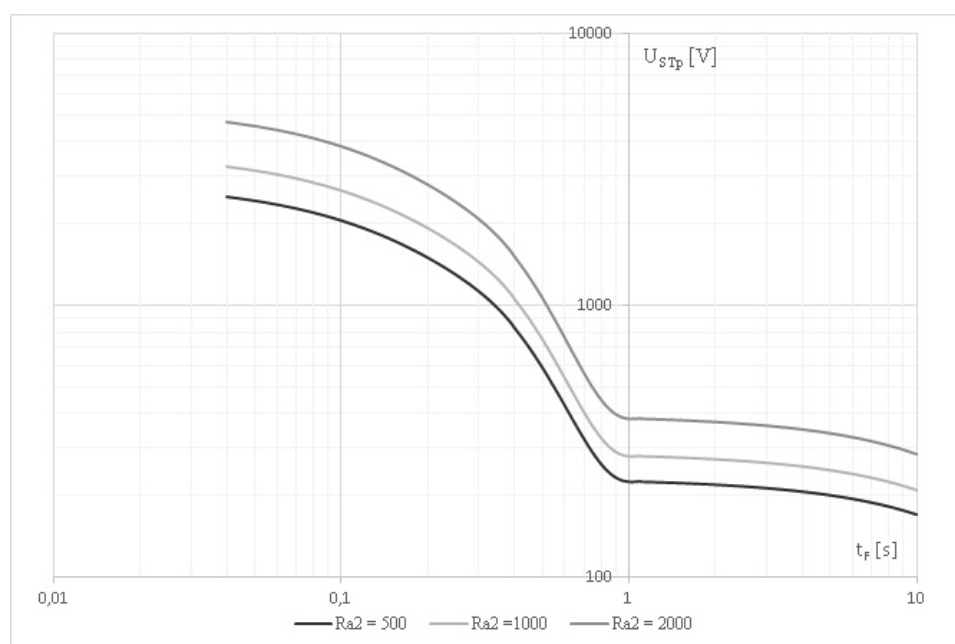
Rys. 4. Zależność $U_{STp}=f(t_F)$ dla $R_{a1}=0\Omega$.

Kolejny wykres ilustruje zmiany dopuszczalnego napięcia dotykowego przy założeniu, że miejsce zainstalowania słupa, jest miejscem, w którym ludzie przebywają w obuwiu. Do porównania zostały wybrane wartości rezystywności gruntu jak na rys. 4.

Zgodnie z rys. 4 oraz rys. 5 można wnioskować, że wraz ze zwiększającą się wartością rezystywności gruntu wrasta dopuszczalna wartość napięcia dotyko-

wego spodziewanego przy słupie linii. Oznacza to, że przy zwiększeniu rezystancji dodatkowych można zminimalizować zagrożenie porażeniowe.

Przedstawione wykresy obejmują zakres czasu trwania zwarcia od 0,04 s do 10 s. Przedział ten od dołu ograniczony jest możliwościami pomiaru napięcia dotykowego rażeniowego oraz związaną z tym impedancją, natomiast od góry ogranicza go norma [1], która podaje, że dla czasów powyżej 10 s przyjmuje się, że napięcie dotykowe spodziewane nie może być wyższe niż 80 V.



Rys. 5. Zależność $U_{STP}=f(t_F)$ dla $R_{a1}=1000\Omega$.

4. WNIOSKI I PODSUMOWANIE

Przeprowadzona analiza dwóch metod doboru instalacji uziemniającej dla linii napowietrznych prowadzi do konkluzji, iż metoda obliczeniowa wynikająca z kryterium wtórnego jest metodą bardziej wydajną oraz mniej kłopotliwą w swoim zastosowaniu.

Zależności otrzymane na podstawie kryterium wtórnego, a przedstawione w punkcie 3.3 pozwalają na rozpatrywanie dopuszczalnego napięcia dotykowego spodziewanego dla ogólnego przypadku, przy znajomości jedynie podstawowych własności otoczenia słupa. Ponadto kryterium wtórne obejmując zakres czasu trwania zwarcia od 0,04 s do 10 s pozwala na uwzględnienie zmian impedancji obwodu rażeniowego zależnych od napięcia dotykowego spodziewanego.

Jakkolwiek zaletą wykorzystywania algorytmu doboru uziemienia jest łatwość doboru środków ograniczających napięcie dotykowe spodziewane, kryterium wtórne pozwala na dokładne oszacowanie zmiany napięcia, przy jednoczesnej zmianie warunków panujących w pobliżu słupa. Jedynym istotnym problemem w przypadku metody obliczeniowej jest brak rozpatrywania rezystancji przejścia między konstrukcją wsporczą, a ręką. Wiąże się to z ograniczeniem użycia środka jakim jest izolacja słupa poprzez np. użycie farb izolacyjnych.

LITERATURA

- [1] PN-EN 50341-1:2012, Elektroenergetyczne linie napowietrzne prądu przemiennego powyżej 1 kV, Część 1: Wymagania ogólne. Specyfikacje wspólne.
- [2] PN-E-05115:2002, Instalacje elektroenergetyczne prądu przemiennego o napięciu wyższym niż 1 kV.
- [3] Hoppel W., Sieci średnich napięć, WNT, Warszawa, 2017r.
- [4] Komentarz do normy PN-E-05115:2002, Instalacje elektroenergetyczne prądu przemiennego o napięciu wyższym niż 1 kV.

ALGORITHM FOR SELECTING EARTHING SYSTEM IN OVER 1 kV OVERHEAD LINES

When designing the MV and HV overhead lines, it is important to ensure public safety in relations to the effective touch and step voltages, which may appear in the line during the earth fault. For this purpose, the earthing selection algorithm in the accordance with [1] standard is used. The basic problem of the method is a complicated process of obtaining data necessary to correctly carry out the steps of algorithm. Due to these difficulties, other parameters can be used. This method is called the secondary criterion for the selection of earthing. The analysis of the existing algorithm and the determination of curves using the secondary criterion resulting from this algorithm allows to compare the level of difficulty of using the methods in practice.

(Received: 31.01.2018, revised: 04.03.2018)