

Analiza porównawcza wpływu wybranych rozwiązań konstrukcyjnych napowietrznych linii wysokiego napięcia na emisję pola elektromagnetycznego

Streszczenie. Przesył energii elektrycznej za pomocą linii elektroenergetycznych związany jest z emisją pola elektromagnetycznego niskiej częstotliwości. Wśród wielu parametrów posiadających wpływ na wielkość oraz zasięg oddziaływania elektromagnetycznego istotne znaczenie ma konfiguracja geometryczna przewodów roboczych. W liniach najwyższych napięć o napięciu 400 kV i wyższym, przewody robocze wykonywane są w postaci wiązek rozdzielonych odstępnikami. W niniejszym artykule autorzy zbadali wpływ układu przewodów w ramach wiązki oraz długości zastosowanych odstępników na wypadkowy rozkład pola elektrycznego, które jest generowane podczas pracy takiej linii.

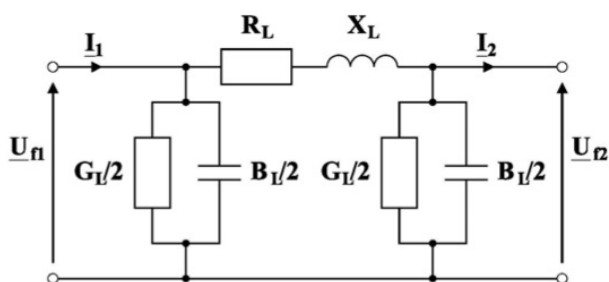
Abstract. Transmission of the electrical energy through high voltage power lines is associated with the emission of a low-frequency electromagnetic field. Many parameters have influence for the intensity and range of the generated electromagnetic field. The geometric configuration of phase wires is of great importance. By the high voltage power lines with a voltage of 400 kV and higher, the phase wires are made in the form of bundles separated by spacers. In this paper is analysis of the effect of the arrangement of wires within the bundle and the length of the spacers used on the resultant distribution of the electric field generated during the work of such a line. (**Analysis of the influences of structural constructions of overhead power lines for the electromagnetic field.**)

Słowa kluczowe: pole elektromagnetyczne, linie elektroenergetyczne, przewody wiązkowe, symulacje cyfrowe.

Keywords: electromagnetic field, electroenergetical power lines, bundle wires, digital simulations.

Wstęp

Podczas pracy napowietrznych linii elektroenergetycznych wokół przewodów roboczych powstaje pole elektromagnetyczne. Zjawisko to jest konsekwencją występowania różnicy potencjałów pomiędzy poszczególnymi przewodami wchodzącymi w skład linii przesyłowej a ziemią, jak również ruchem ładunku elektrycznego związanym z przepływem prądu elektrycznego. Dla częstotliwości 50 Hz, przy której pracują europejskie sieci elektroenergetyczne, pole elektromagnetyczne można traktować jako superpozycję dwóch składowych pól, których wektory są względem siebie ortogonalne. Ponieważ w w/w zakresie częstotliwości zjawiska falowe są pomijalnie małe dlatego podczas analizy można posługiwać się schematem zastępczym typu Π o parametrach skupionych [1] (Rys. 1).



Rys. 1. Schemat zastępczy linii elektroenergetycznej [1]

Przedstawiony powyżej schemat zastępczy linii elektroenergetycznej odwzorowuje zjawiska występujące podczas przesyłu energii elektrycznej, gdzie poszczególne parametry można scharakteryzować następująco [1]:

- rezystancja R_L – odpowiada za straty wywołane wydzielaniem się energii cieplnej Joule'a,

- reaktancja X_L – związana jest z energią pola magnetycznego występującego wokół przewodów z prądem elektrycznym,

- konduktancja G_L – wynika z upływności elementów izolacyjnych,

- susceptancja B_L – związana jest z energią pola elektrycznego występującego w środowisku dielektrycznym

otaczającym przewody i zależy ona od pojemności wzajemnych oraz doziemnych wszystkich przewodów wchodzących w skład linii elektroenergetycznej.

Wartość konduktancji w przypadku napowietrznych linii WN w głównej mierze determinuje zjawisko ulotu, polegające na wyraźnym upływie ładunków z przewodu, na skutek niepełnych wyładowań elektrycznych rozwijających się w powietrzu otaczającym przewody robocze. Zjawisku temu zwykle towarzyszy świecenie oraz wyraźnie słyszalny charakterystyczny szum. Ulot występuje wówczas, gdy fazowe napięcie robocze linii przekracza wartość napięcia krytycznego ulotu U_{fkr} , przy którym zainicjowane zostają wyładowania niepełne i jest wyrażane następującym wzorem empirycznym [1]:

$$(1) \quad U_{fkr} = 21, \text{Im}_p \cdot m_a \cdot \delta \cdot r \cdot \ln\left(\frac{b_{sr}}{r}\right) = 48,9 \text{m}_p \cdot m_a \cdot \delta \cdot r \cdot \lg\left(\frac{b_{sr}}{r}\right)$$

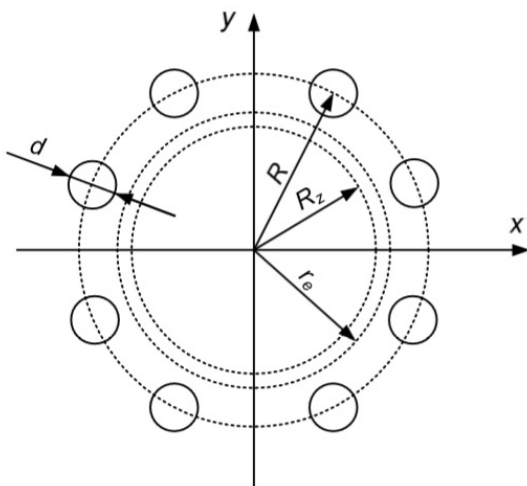
gdzie: m_p – współczynnik zależny od stanu powierzchni przewodu, m_a – współczynnik zależny od stanu pogody, δ – współczynnik zależny od ciśnienia i temperatury powietrza, r – promień przewodu wyrażony w cm, b_{sr} – średnia odległość między przewodami wyrażona w cm.

W przypadku napowietrznych linii elektroenergetycznych powietrze stanowi główny ośrodek dielektryczny i tym samym jest jednocześnie jednym z istotnych elementów układu izolacyjnego linii napowietrznej. Suche powietrze może być traktowane jako niemal idealny izolator. Jednak na skutek występowania w powietrzu naturalnych procesów jonizacyjnych oraz rekombinacyjnych istnieje pewna określona ilość ładunków swobodnych, które w polu elektrycznym poruszają się zgodnie z jego liniami sił. Powstały w ten sposób przepływ prądu powoduje wzrost energii kinetycznej cząstek znajdujących się w powietrzu otaczającym elementy przewodzące o różnym potencjale.

Dalszy wzrost natężenia pola elektrycznego, pomimo związanego z nim przyspieszeniem ruchu zjonizowanych cząstek, nie powoduje już dalszego wzrostu gęstości prądu ze względu na ustabilizowany proces jonizacji. Po przekroczeniu różnicy potencjałów U_0 , elektrony uzyskują

już energię kinetyczną, która jest wystarczająca do jonizacji zderzeniowej z cząsteczkami obojętnymi gazu. Występujące zderzenia jonizujące powodują gwałtowny wzrost gęstości prądu i powstanie lawin elektronowych, zwanych wyładowaniami niesamodzielnymi. Ustają one gdy zniknie powodujące je pole elektryczne. W warunkach normalnych w powietrzu: $U_0 \cong 24,4$ kV/cm. Dalszy wzrost różnicy potencjałów, powyżej wartości krytycznej U_{fkr} powoduje wyładowanie samodzielne związane z emisją elektronów z katody wywołaną przez jony i fotony. Może ono mieć postać wyładowań niepełnych, obejmujących tylko lokalną część przestrzeni międzyelektrodowej. Dalszy gwałtowny wzrost prądu powoduje przekroczenie wytrzymałości elektrycznej powietrza, co prowadzi do pełnego wyładowania iskrowego [2].

Poprzez zastosowanie przewodów fazowych wykonanych w formie wiązek (Rys. 2), zamiast pojedynczych przewodów, można zwiększyć wartość tzw. promienia zastępczego przewodu r_e , co w konsekwencji, zgodnie ze wzorem (1) pozwala na podwyższenie wartości napięcia krytycznego U_{fkr} , przy którym może wystąpić ulot elektryczny [3, 4].



Rys.2. Budowa toru prądowego w formie wiązki przewodów [3, 4]

Napowietrzna linia elektroenergetyczna, której tory prądowe wykonane są w formie przewodów wiązkowych będzie charakteryzowała się zatem zmniejszonymi stratami oraz mniejszym oddziaływaniem na środowisko [3, 4].

$$(2) \quad r_e = R \cdot \sqrt{\frac{N \cdot r}{R}}$$

gdzie: R – promień wiązki przewodów, r – promień pojedynczego przewodu wchodzącego w skład wiązki, N – liczba przewodów w wiązce.

Straty mocy czynnej spowodowane ulotem, wyrażone w kW/km linii, można przedstawić przy pomocy wzoru:

$$(3) \quad \Delta P_{ul} = 0,18 \sqrt{\frac{r}{b_{sr}}} (U_f - U_{fkr})^2$$

Znając straty mocy czynnej ΔP_{ul} można już ze wzoru (4) wyznaczyć parametr G_L wyrażony w [S/km] widoczny jako poprzeczny element czwórnik typu Π przedstawionego na schemacie zastępczym linii elektroenergetycznej (Rys. 1).

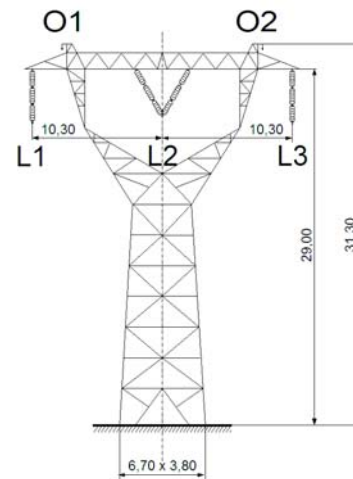
$$(4) \quad G_k = \frac{\Delta P_{ul}}{U_f^2} \cdot 10^{-3}$$

W zależności od czasu ekspozycji oraz wartości natężenia poszczególnych składowych, oddziaływanie pól elektromagnetycznych mogą powodować różne efekty wewnątrz biologicznych struktur żywych organizmów, jak również mogą zakłócać pracę wielu urządzeń elektrycznych. Z tego powodu, naukowcy starają się opracować sposoby oraz materiały, dzięki którym możliwe jest ograniczenie wpływu pól elektromagnetycznych na organizm człowieka oraz pozostałe elementy środowiska [5, 6].

Napowietrzna linia elektroenergetyczna 400 kV zbudowana z zastosowaniem słupów typu Y52

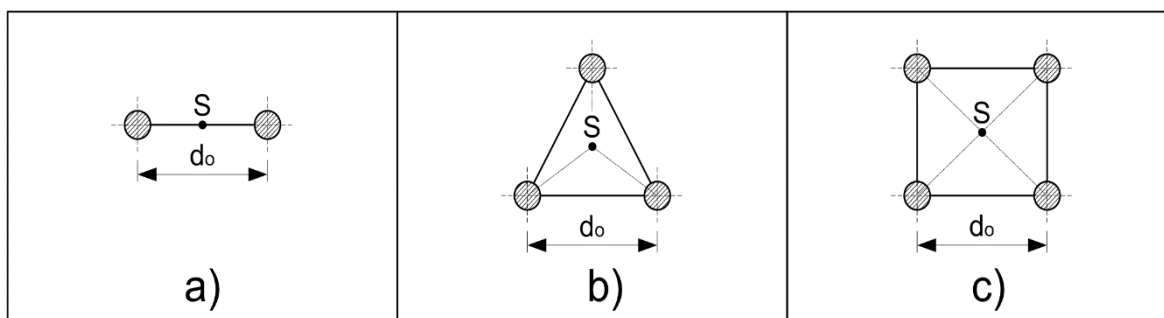
W niniejszym artykule autorzy przy zastosowaniu zmodyfikowanej metody różnic skończonych dokonali symulacji cyfrowych rozkładu natężenia składowej elektrycznej pola elektromagnetycznego o częstotliwości 50 Hz w przekroju poprzecznym linii napowietrznej, w którym przewody fazowe znajdują się najbliżej ziemi, zatem spodziewane maksymalne wartości natężenia składowych pola elektromagnetycznego osiąga swoje maksima.

Sylwetkę słupa kratowego typu Y52 przedstawiono na rysunku (Rys. 3). Ze względu na długość zastosowanych izolatorów oraz zwis przewodów linii w środku przęsła, przyjęto, że osie wiązek torów prądowych badanej linii wysokiego napięcia znajdują się na wysokości $h=12$ m ponad poziomem gruntu.



Rys.3. Sylwetka słupa typu Y52 napowietrznej linii 400 kV

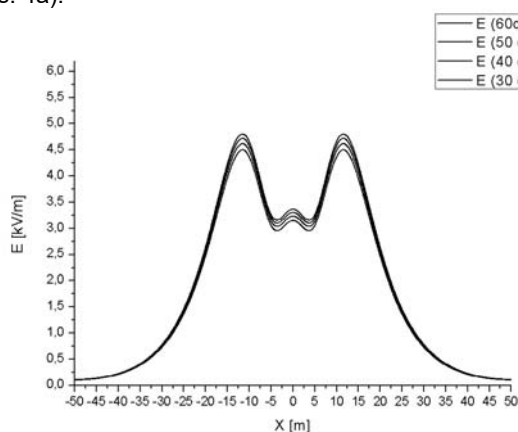
W pobliżu przewodów linii elektroenergetycznej występują szczególnie wysokie wartości natężenia pola elektrycznego oraz magnetycznego. Pola te szybko maleją wraz ze zwiększaniem odległości od osi przewodu stanowiącego ich źródło. Tory prądowe napowietrznych linii najwyższych napięć wykonywane są w formie przewodów wiązkowych, których przykładowe konfiguracje odpowiednio dla wiązek dwu- trój- oraz czteroprzewodowych pokazane zostały na rysunku (rys. 4). W każdym z przeanalizowanych przypadków jest to regularne rozmieszczenie przewodów z zastosowaniem odstępników o długościach 30 cm, 40, cm, 50 cm oraz 60 cm. Dla wszystkich wariantów rozwiązań konstrukcyjnych wiązek przewodów wykonano cyfrowe symulacje rozkładu natężenia składowej elektrycznej na płaszczyźnie zlokalizowanej 2m ponad ziemią. Wyniki tych symulacji przedstawiono w dalszej części artykułu.



Rys.4. Budowa torów prądowych elektroenergetycznych linii napowietrznych w formie przewodów wiązkowych

Analiza rozkładu pola elektrycznego wokół linii 400 kV

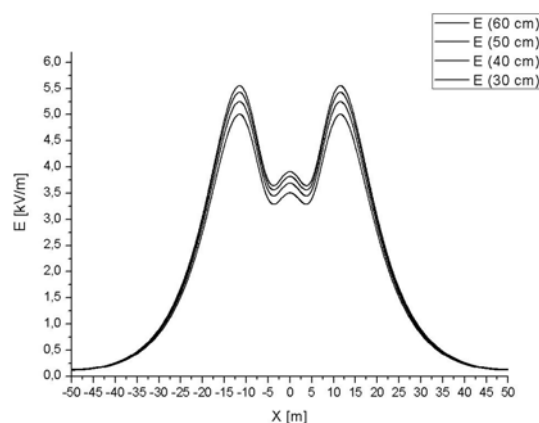
Wraz ze zmianą konfiguracji geometrycznej przewodów fazowych linii związanych ze zmianą liczby przewodów w wiązce lub zmianą wzajemnych odległości, obserwuje się odmienny rozkład natężenia pola elektrycznego w badanym przekroju poprzecznym linii. W szczególności istotna jest tutaj wartość maksymalna natężenia składowej elektrycznej pola elektromagnetycznego jak również obszar, dla którego natężenie pola elektrycznego przekracza dopuszczalną wartość 1 kV/m [7]. Jako pierwszy przypadek poddany analizie obliczeniowej wykorzystano linię 400 kV zbudowaną na słupach kratowych typu Y52 o dwóch przewodach składających się na wiązkę toru prądowego (Rys. 4a).



Rys.5. Rozkład pola elektrycznego pod linią 400 kV (Y52) dla wiązek fazowych złożonych z dwóch przewodów oraz o długości poprzeczników od 30 cm do 60 cm

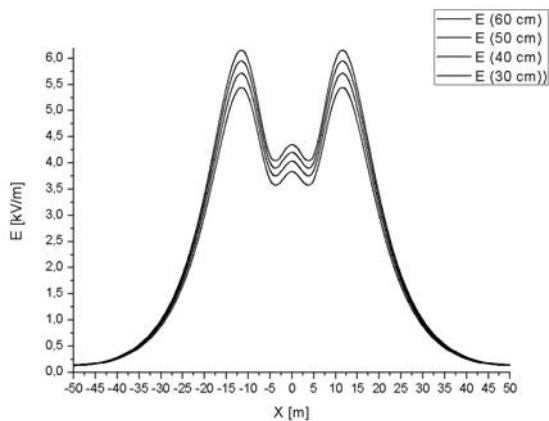
Zbadany został tu wpływ odległości pomiędzy przewodami w podwójnych wiązках. Kolejno dla długości poprzeczników równych 30 cm, 40 cm, 50 cm oraz 60 cm dokonano identyfikacji rozkładu natężenia pola elektrycznego, a wyniki w formie graficznej pokazane zostały na wykresie (Rys. 5). Maksymalne natężenie pola elektrycznego zawiera się w przedziale od $E_{\max}=4,50$ kV/m (dla odstępników o długości 30 cm) do $E_{\max}=4,80$ kV/m (dla odstępników o długości 60 cm). Daje się zauważyć wyraźny związek pomiędzy odległością pomiędzy przewodami w wiązce, a wartością maksymalnego natężenia składowej elektrycznej, jak również szerokością terenu, na którym pole elektryczne jest większe niż 1 kV/m. Wraz ze wzrostem odległości pomiędzy poszczególnymi przewodami wchodzącymi w skład wiązki zwiększa się maksymalne natężenie pola elektrycznego wyliczone dla wysokości $h=2$ m, oraz szerokość pasa terenu o ograniczonej możliwości użytkowania. Jako drugi przypadek poddany analizie obliczeniowej wykorzystano linię 400 kV zbudowaną na słupach kratowych typu Y52 o

trzech przewodach składających się na wiązkę toru prądowego (Rys. 4b). Zbadany został tu wpływ odległości pomiędzy przewodami w potrójnych wiązках. Kolejno dla długości poprzeczników równych 30 cm, 40 cm, 50 cm oraz 60 cm dokonano identyfikacji rozkładu natężenia pola elektrycznego, a wyniki w formie graficznej pokazane zostały na wykresie (Rys. 6). Maksymalne natężenie pola elektrycznego zawiera się w przedziale od $E_{\max}=5,00$ kV/m (dla odstępników o długości 30 cm) do $E_{\max}=5,55$ kV/m (dla odstępników o długości 60 cm). Daje się zauważyć wyraźny związek pomiędzy odległością pomiędzy przewodami w wiązce, a wartością maksymalnego natężenia składowej elektrycznej,



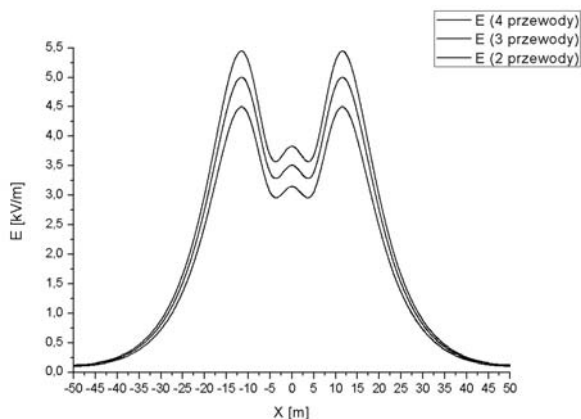
Rys.6. Rozkład pola elektrycznego pod linią 400 kV (Y52) dla wiązek fazowych złożonych z trzech przewodów oraz o długości poprzeczników od 30 cm do 60 cm

jak również szerokością terenu, na którym pole elektryczne jest większe niż 1 kV/m. Wraz ze wzrostem odległości pomiędzy poszczególnymi przewodami wchodzącymi w skład wiązki zwiększa się maksymalne natężenie pola elektrycznego wyliczone dla wysokości $h=2$ m, oraz szerokość pasa terenu o ograniczonej możliwości użytkowania. Jako kolejny przypadek poddany analizie obliczeniowej wykorzystano linię 400 kV zbudowaną na słupach kratowych typu Y52 o czterech przewodach składających się na wiązkę toru prądowego (Rys. 4c). Zbadany został tu wpływ odległości pomiędzy przewodami w poczwórnych wiązках. Kolejno dla długości poprzeczników równych 30 cm, 40 cm, 50 cm oraz 60 cm dokonano identyfikacji rozkładu natężenia pola elektrycznego, a wyniki w formie graficznej pokazane zostały na wykresie (Rys. 7). Maksymalne natężenie pola elektrycznego zawiera się w przedziale od $E_{\max}=5,44$ kV/m (dla odstępników o długości 30 cm) do $E_{\max}=6,15$ kV/m (dla odstępników o długości 60 cm).



Rys.7. Rozkład pola elektrycznego pod linią 400 kV (Y52) dla wiązek fazowych złożonych z czterech przewodów oraz o długości poprzeczników od 30 cm do 60 cm

Jako podsumowanie części dotyczącej obliczeniowej identyfikacji natężenia pola elektrycznego wytwarzanego przez badaną linię 400 kV na wykresie (Rys. 9) przedstawiono rozkłady natężenia składowej elektrycznej pola elektromagnetycznego dla stałej długości poprzecznika równej 30 cm, przy liczbie przewodów w wiązce toru prądowego równej: 2, 3 oraz 4. Można zauważyć, że natężenie pola elektrycznego na wysokości 2m rośnie wraz ze zwiększeniem liczby przewodów składających się na pojedynczą fazę linii przesyłowej.



Rys.8. Rozkład pola elektrycznego pod linią 400 kV (Y52) dla wiązek fazowych oddzielonych poprzecznikami o długości 30 cm oraz wiązek złożonych z liczby przewodów 2, 3 oraz 4

Zupełnie odwrotny efekt jest widoczny w przestrzeni bezpośrednio otaczającej przewody, gdzie zwiększenie liczby przewodów w wiązce powoduje zmniejszenie maksymalnego natężenia pola elektrycznego [8].

Zestawienie wyników cyfrowych symulacji znajduje się w tabeli 1, w której zawarto maksymalne wartości natężenia pola elektrycznego dla wszystkich kombinacji liczby przewodów w wiązce oraz różnych długości poprzeczników.

Tabela 1. Maksymalne wartości natężenia pola elektrycznego generowanego przez linię napowietrzną 400kV (Y52) w zależności od sposobu wykonania torów prądowych (na wysokości h=2m)

Dł. odstępniaka	30 cm	40 cm	50 cm]	60 cm	
Liczba przew.	2	4,50 kV/m	4,61 kV/m	4,72 kV/m	4,80 kV/m
	3	5,00 kV/m	5,25 kV/m	5,42 kV/m	5,55 kV/m
w torze	4	5,44 kV/m	5,71 kV/m	5,95 kV/m	6,15 kV/m

Dodatkowo w tabeli 2 znajduje się zestawienie wyników cyfrowych symulacji, gdzie dla wszystkich kombinacji liczby przewodów w wiązce oraz różnych długości poprzeczników

zawarte zostały szerokości pasa terenu pod linią napowietrzną, w którym natężenie pola elektrycznego jest większe niż 1 kV/m.

Tabela 2. Maksymalna szerokość pasa terenu gdzie $E \geq 1$ kV/m pod linią napowietrzną 400kV (Y52) w zależności od sposobu wykonania torów prądowych (na wysokości h=2m)

Dł. odstępniaka	30 cm	40 cm	50 cm]	60 cm	
Liczba przew.	2	55,0 m	55,5 m	55,8 m	56,1 m
	3	56,8 m	57,5 m	58,0 m	58,4 m
w torze	4	58,1 m	58,9 m	59,5 m	60,1 m

Podsumowanie

Budowa torów prądowych napowietrznych linii przesyłowych w formie przewodów wiązkowych powoduje zmniejszenie strat przesyłowych związanych z ulotem. Większa liczba wiązek oraz zwiększenie odległości pomiędzy przewodami w wiązce zgodnie z empirycznym wzorem Peek'a powoduje podwyższenie wartości napięcia U_{fr}, od której mogą wystąpić wyładowania niezupełne wokół przewodów fazowych. Ponieważ wypadkowe natężenie pola elektrycznego stanowi superpozycję składowych elektrycznych pól źródłowych, to wszystkie przewody każdego z torów prądowych mają na nie wpływ. Znaczenie danego przewodu jest tym większe, im bliżej znajduje się on od punktu, w którym wykonuje się identyfikację natężenia pola elektrycznego. Natężenie pola elektrycznego szybko maleje wraz z odległością od źródła, dlatego konfiguracja geometryczna toru prądowego ma istotne znaczenie w najbliższym jego sąsiedztwie, natomiast na wysokości h=2 m, na której typowo wykonuje się badania, różnice natężenia generowanego przez linię napowietrzną pola elektrycznego są niewielkie w zależności od sposobu wykonania torów prądowych.

Autorzy: mgr inż. Jacek Gumiela, Politechnika Wroclawska, Katedra Energoelektryki, ul. Wybrzeże Wyspiańskiego 27, 50-370 Wrocław, E-mail: jacek.gumiela@pwr.edu.pl; dr hab Dariusz Sztafrowski, Politechnika Wroclawska, Katedra Energoelektryki, ul. Wybrzeże Wyspiańskiego 27, 50-370 Wrocław, E-mail: dariusz.sztafrowski@pwr.edu.pl.

LITERATURA

- [1] Wasiak I., Elektroenergetyka w Zarysie, *Przesył i Rozdział Energii Elektrycznej*, Wydawnictwo Politechniki Łódzkiej, 2009
- [2] Krzewiński S., Widma emisyjne wyładowań ulotowych generowanych w modelach linii elektroenergetycznych, Politechnika Opolska, Instytut Elektroenergetyki i Energii Odnawialnej, Rozprawa doktorska, 2016
- [3] CIGRE Working Group 01 of Study Committee 36 (Interferences): Interferences produced by corona effect of electrical systems. Description of phenomena. Practical guide for calculation, Publication No. 20, 1974
- [4] CIGRE Working Group 36.01 (EMC Aspects of Corona Electric and Magnetic Fields): Interferences produced by corona effect of electrical systems. Description of phenomena and practical guide for calculation. Addendum to CIGRE Document No. 20 (1974), No. 61, 1996
- [5] Pawłowski S., Plewako J., Korzeniewska E., Analiza rozkładu pola przepływowego w cienkiej warstwie przewodzącej z defektem eliptycznym, *Przegląd Elektrotechniczny*, 96 (2020), Nr 1
- [6] Pawłowski S., Plewako J., Korzeniewska E., Field Modeling the Impact of Cracks on the Electroconductivity of Thin-Film Textronic Structures, *Electronics*, 9 (2020), No. 3, 402
- [7] Rozporządzenie Ministra Zdrowia z dnia 17 grudnia 2019 r. w sprawie dopuszczalnych poziomów pól elektromagnetycznych w środowisku (Dz.U. 2019 poz. 2448)
- [8] Sztafrowski D., Gumiela J.; Analiza technicznych możliwości ograniczania zjawiska ulotu elektrycznego zrealizowana na podstawie cyfrowej identyfikacji natężenia pola elektrycznego w otoczeniu przewodów roboczych elektroenergetycznych linii WN. *Przegląd Elektrotechniczny*. nr 1/2018, R. 94, 2018