

# Analiza technicznych możliwości ograniczania zjawiska ulotu elektrycznego zrealizowana na podstawie cyfrowej identyfikacji natężenia pola elektrycznego w otoczeniu przewodów roboczych elektroenergetycznych linii WN

**Streszczenie.** Jednym ze zjawisk towarzyszących pracy linii elektroenergetycznych wysokich napięć jest ulot elektryczny. Ulot odpowiada m.in. za straty elektryczne, powstawanie ozonu oraz związków chemicznych powodujących przyspieszoną korozję przewodów napowietrznej linii elektroenergetycznej. Na podstawie przeprowadzonych analiz w artykule wskazano na możliwości ograniczenia występowania zjawiska ulotu co korzystnie wpływa na trwałość przewodów fazowych oraz redukcję zmniejszenie strat związanych z przesyłem energii elektrycznej.

**Abstract.** One of the phenomena accompanying the operation of high voltage power lines is the electric corona effect. Corona discharge is responsible among others for electrical losses, formation of ozone and the chemical compounds leading to accelerated corrosion of wires of the overhead power lines. On the basis of the analysis in the article indicated the possibility of limiting the occurrence of the corona effect what is beneficial to the durability of the phase wires, and reduction of losses in transmission of electrical power.

**(Analysis of technical possibilities of reduction of the corona effect based on digital simulations of the electric field intensity by phase wires of overhead power lines).**

**Słowa kluczowe:** pole elektryczne, symulacje cyfrowe, metoda elementów skończonych, ochrona środowiska.

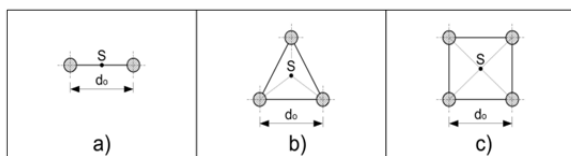
**Keywords:** electric fields, digital simulations, finite elements method, safe of environment.

## Wstęp

Zgodnie z teorią elektromagnetyzmu wysokonapięciowe urządzenia oraz linie elektroenergetyczne są źródłem pola elektromagnetycznego o znacznych natężeniach [1].

W zakresie niskich częstotliwości osobnej analizie można poddać składową elektryczną oraz składową magnetyczną. Za zjawisko ulotu odpowiada składowa elektryczna pola elektromagnetycznego [2]. Rozkład natężenia pola elektrycznego zależy głównie od wartości występujących napięć oraz od geometrii torów prądowych rozpatrywanego obiektu elektroenergetycznego. Z tego względu w powszechnie stosowanych typowych wykonaniach obiektów elektroenergetyki zawodowej rozkład pola elektrycznego jest silnie nierównomierny. Koncentracja linii sił pola jest największa w pobliżu elementów o niewielkim promieniu krzywizny oraz wysokim potencjale względem ziemi [3]. Jeśli w pewnym obszarze natężenie składowej elektrycznej pola przekroczy wytrzymałość ośrodka na przebicie elektryczne, która dla suchego powietrza przy normalnym ciśnieniu atmosferycznym wynosi około 30 kV/m, następuje rozwój wyładowania w zjonizowanej przestrzeni. Jeśli z powodów determinowanych rozkładem pola elektrycznego owo wyładowanie nie może się dalej rozwijać, to takie zjawisko jest zwane wtedy wyładowaniem niepełnym lub też wyładowaniem koronowym. Wraz z występowaniem ulotu elektrycznego pojawiają się również takie efekty jak [4]:

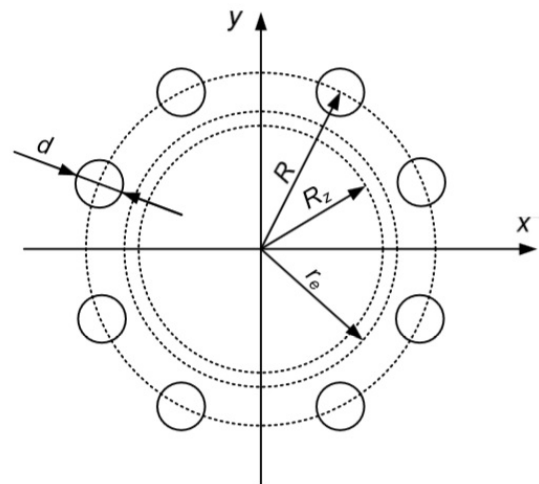
- hałas (szumy akustyczne),
- charakterystyczne światlenie przewodów,
- zakłócenia radioelektryczne,
- przyspieszona korozja fazowych przewodów elektroenergetycznych,
- wytwarzanie ozonu.



Rys. 1. Układ wiązek przewodów fazowych linii 400 kV (S – środek geometryczny układu)

W celu zredukowania szkodliwego oddziaływania ulotu na środowisko stosuje się odpowiednie rozwiązania techniczne, wśród których najczęściej stosowane jest wykorzystanie przewodów wiązkowych (Rys.1).

Tory prądowe napowietrznych linii elektroenergetycznych najwyższych napięć (od 400 kV) są wykonywane w formie wiązek przewodów odległych od siebie o kilkadziesiąt centymetrów w ramach tej samej fazy. Badania empiryczne potwierdzają, że taki sposób prowadzenia przewodów pozwala na lokalne obniżenie natężenia pola w przestrzeni wokół przewodów, przez co zmniejszeniu ulega obszar narażony na występowanie wyładowań niepełnych [2]. Ponadto przewody wiązkowe charakteryzują się niższą indukcyjnością, co bezpośrednio przekłada się na zmniejszone straty podłużne w linii przesyłowej. We wzorach pozwalających na określenie możliwości wystąpienia ulotu elektrycznego dużej zmianie podlega tzw. promień zastępczy przewodu (złożonego z wiązek)  $r_e$  (Rys.2) [3, 4].



Rys.2. Przekrój wiązki przewodowej; R – promień wiązki,  $r_e$  – promień zastępczy wiązki,  $r=0,5d$  – promień przewodu wiązki

$$(1) \quad r_e = R \cdot \sqrt{\frac{N \cdot r}{R}}$$

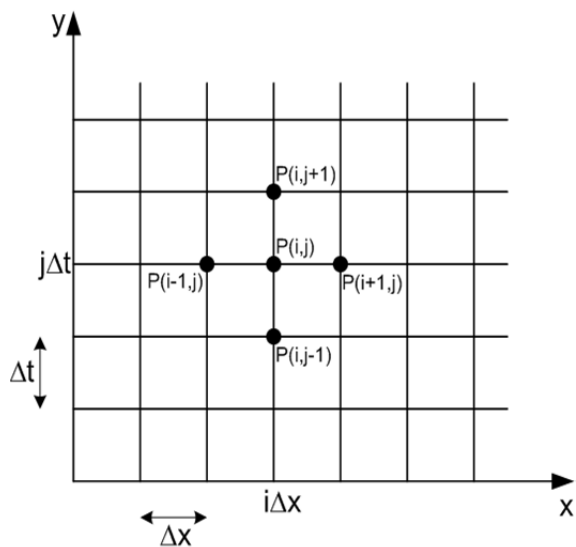
gdzie: R – promień wiązki, r – promień pojedynczego przewodu z wiązki, (r=0,5d), N – liczba przewodów w wiązce

Gdy napięcie fazowe linii elektroenergetycznej przekracza wartość krytyczną napięcia ulotu  $U_{fkr}$  zależną m. in. od geometrii układu oraz warunków środowiskowych wtedy mogą pojawić się wyładowania niezupełne [5]:

$$(2) \quad U_{fkr} = 21,1 \cdot m_p \cdot m_a \cdot \delta \cdot r \cdot \ln\left(\frac{b_{sr}}{r}\right)$$

gdzie:  $m_p$  – współczynnik zależny od stanu powierzchni przewodu: przewód jednodrutowy nowy  $m_p=1$ , stary  $m_p=0,93-0,98$ , linka  $m_p=0,83-0,87$ , przewód rurowy  $m_p=0,9$   
 $m_a$  – współczynnik zależny od stanu pogody: pogoda sucha, słoneczna  $m_a=1$ , pogoda deszczowa, mgła  $m_a=0,8$   
 $\delta$  – współczynnik zależny od ciśnienia i temperatury powietrza, we wzorze Peeka jest to gęstość względna powietrza  
r – promień przewodu w [cm]  
 $b_{sr}$  – średnia odległość między przewodami w [cm]

Symulacje cyfrowe przeprowadzono z wykorzystaniem zmodyfikowanej metody różnicowej służącej do wyznaczenia potencjałów elektrycznych, a następnie natężenia pola elektrycznego w badanych punktach [6].  
Przed przystąpieniem do analizy badanego obszaru, na którym poszukujemy wartości natężenia pola elektrycznego E i/lub potencjału elektrycznego V należy podzielić ten region w płaszczyźnie x-t na elementarne prostokąty o wymiarach  $\Delta x$  i  $\Delta t$  (Rys. 3).



Rys.3. Siatka elementów skróconych wraz z zaznaczonymi węzłami [7]

W każdym z analizowanych punktów P funkcja  $\Phi(x,t)$  jest określona następującą zależnością:

$$(3) \quad \Phi_p = \Phi(i\Delta x, j\Delta t) = \Phi(i, j)$$

dla każdego

$$x=i \cdot \Delta x$$

$$\text{gdzie } i=0,1,2,\dots$$

$$t=j \cdot \Delta t$$

$$\text{gdzie } j=0,1,2,\dots$$

Natomiast pochodne funkcji  $\Phi(x,t)$  w każdym z węzłów jest wyznaczana jako centralna różnica funkcji według zależności przedstawionych w tabeli 1.

Tabela 1. Pochodne funkcji  $\Phi(x,y)$  w węzłach siatki

$\frac{\partial \Phi(x,t)}{\partial x} \Big _{i,j}$	$\cong \frac{\Phi(i+1,j) - \Phi(i-1,j)}{2 \cdot \Delta x}$
$\frac{\partial \Phi(x,t)}{\partial t} \Big _{i,j}$	$\cong \frac{\Phi(i,j+1) - \Phi(i,j-1)}{2 \cdot \Delta t}$
$\frac{\partial^2 \Phi(x,t)}{\partial x^2} \Big _{i,j}$	$\cong \frac{\Phi(i+1,j) - 2\Phi(i,j) + \Phi(i-1,j)}{(\Delta x)^2}$
$\frac{\partial^2 \Phi(x,t)}{\partial t^2} \Big _{i,j}$	$\cong \frac{\Phi(i,j+1) - 2\Phi(i,j) + \Phi(i,j-1)}{(\Delta t)^2}$

Równanie eliptyczne (Poissona) w postaci:

$$(4) \quad \nabla^2 \Phi = \frac{\partial^2 \Phi}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 \Phi}{\partial t^2} = g(x,t)$$

Można przekształcić w równania dla węzła i,j jeśli  $\Delta x = \Delta t = h$

$$(5) \quad \Phi(i+1,j) + \Phi(i-1,j) + \Phi(i,j+1) + \Phi(i,j-1) - 4\Phi(i,j) = h^2 g(i,j)$$

Gdy prawa strona  $g(x,t)=0$  wtedy mamy do czynienia z równaniem Laplace'a, które jest szczególnym przypadkiem równania Poissona'a:

$$(6) \quad \Phi(i,j) = \frac{1}{4} \left[ \Phi(i+1,j) + \Phi(i-1,j) + \Phi(i,j+1) + \Phi(i,j-1) \right]$$

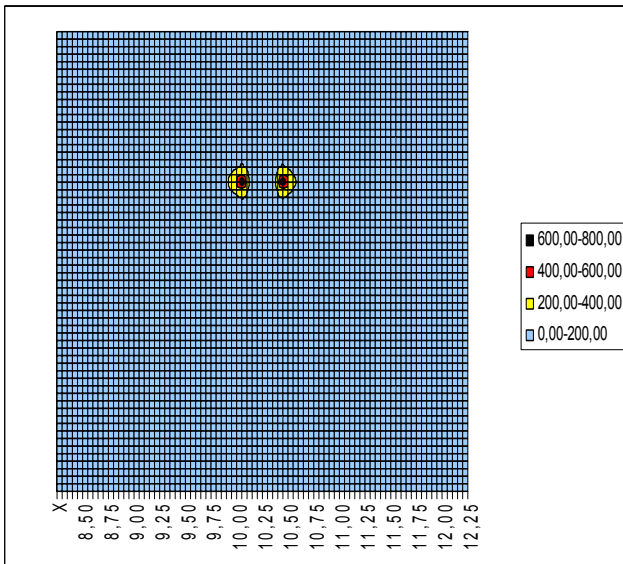
W ten sposób uzyskujemy dokładnie tyle równań ile jest węzłów siatki. Dla uzyskania zadowalających efektów symulacji rozkładu składowej elektrycznej pola konieczna jest duża liczba węzłów a zatem i duża liczba równań. Rozwiązując zagadnienie przy użyciu metody iteracyjnej w każdym punkcie P analizowanego obszaru przypisujemy początkowo znane wartości graniczne, natomiast wszystkim pozostałym punktom przypisujemy wartości dowolne (najczęściej zerowe lub oszacowane w inny sposób). W dalszej kolejności korzystając z przedstawionych wcześniej zależności obliczamy wartość potencjału V w każdym węźle używając do tego wartości potencjału w węzłach sąsiednich. W ten sposób uzyskujemy tzw. pierwsze przybliżenie. Następnie powtarzamy operację aż do uzyskania zadanej dokładności dla funkcji siatkowej potencjału V

$$(7) \quad \max |V_h^{(j+1)} - V_h^j| \leq \varepsilon$$

gdzie  $j=1,2,3,\dots$  kolejny numer iteracji [7].

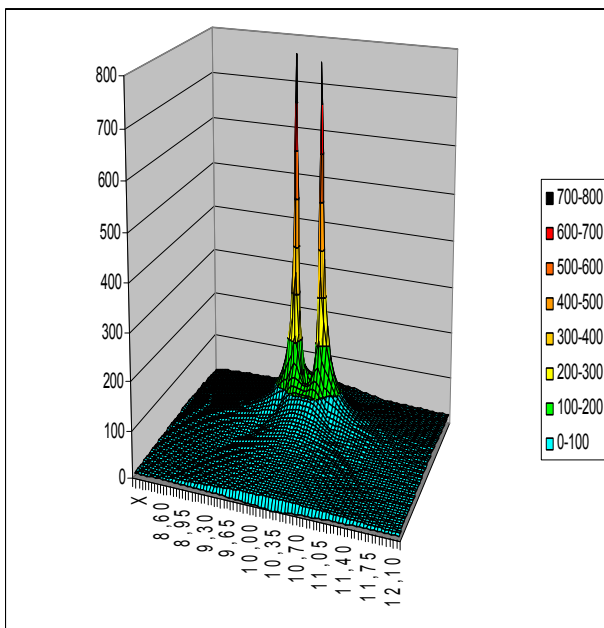
#### Analiza rozkładu pola elektrycznego linii 400 kV

W niniejszym artykule analizie obliczeniowej poddano trzy warianty wykonania napowietrznej linii 400 kV o przewodach fazowych dwu- trzy- oraz czterowiazkowych (Rys. 1 a, b oraz c) zamocowanych na typowej konstrukcji słupa przelotowego typu Y52.



Rys.4. Graficzna prezentacja 2D wyników cyfrowych symulacji rozkładu pola elektrycznego w otoczeniu wiązki przewodów toru prądowego napowietrznej linii elektroenergetycznej 400 kV. Przewody fazowe wykonane w formie podwójnej wiązki

Na rysunkach 4 oraz 5 przedstawiono w formie graficznej rozkład natężenia pola elektrycznego dla linii napowietrznej 400 kV, której przewody fazowe wykonano w formie podwójnych wiązek przewodów.

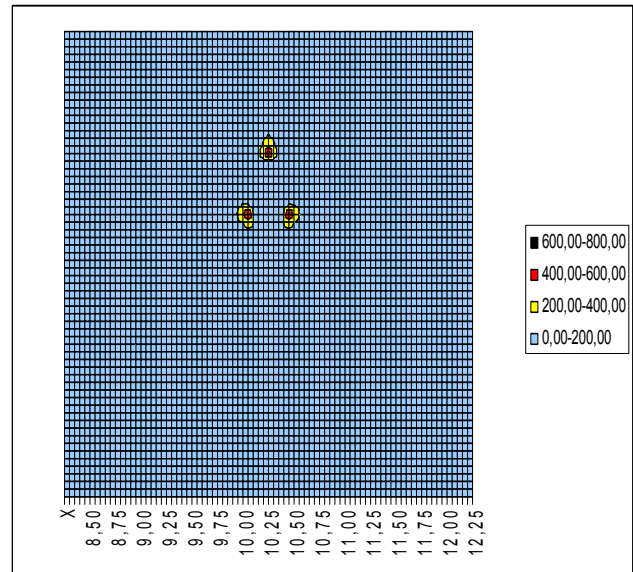


Rys.5. Graficzna prezentacja 3D wyników cyfrowych symulacji rozkładu pola elektrycznego w otoczeniu wiązki przewodów toru prądowego napowietrznej linii elektroenergetycznej 400 kV. Przewody fazowe wykonane w formie podwójnej wiązki

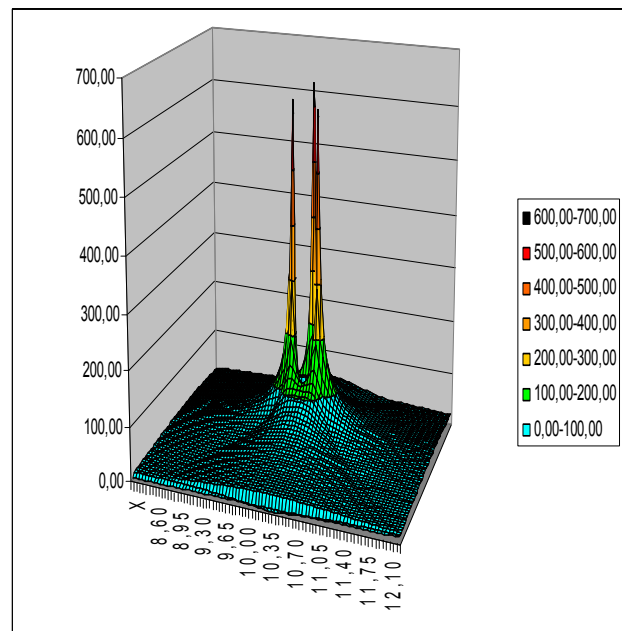
Wyniki obliczeniowej identyfikacji natężenia pola elektrycznego na płaszczyźnie pokazuje rysunek 4, natomiast rysunek 5 zawiera wyniki w przestrzeni trójwymiarowej.

Na rysunkach 6 oraz 7 przedstawiono w formie graficznej rozkład natężenia pola elektrycznego dla linii napowietrznej 400 kV, której przewody fazowe wykonano w formie potrójnych wiązek przewodów. Wyniki obliczeniowej identyfikacji natężenia pola elektrycznego na płaszczyźnie

pokazuje rysunek 6, natomiast rysunek 7 zawiera wyniki w przestrzeni trójwymiarowej.



Rys.6. Graficzna prezentacja 2D wyników cyfrowych symulacji rozkładu pola elektrycznego w otoczeniu wiązki przewodów toru prądowego napowietrznej linii elektroenergetycznej 400 kV. Przewody fazowe wykonane w formie potrójnej wiązki

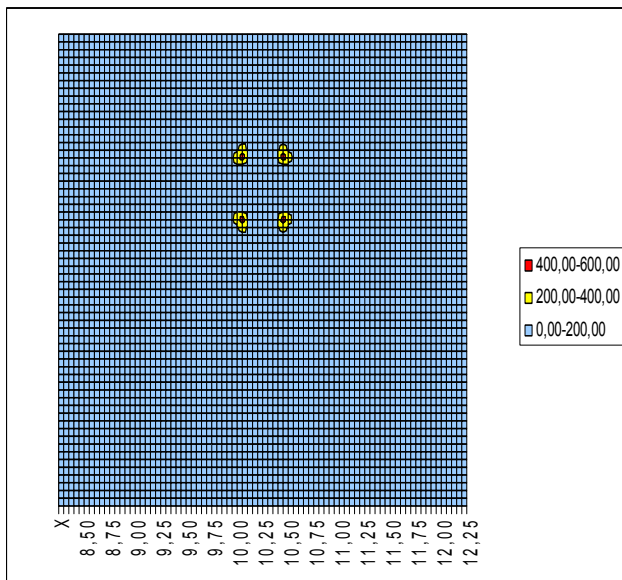


Rys.7. Graficzna prezentacja 3D wyników cyfrowych symulacji rozkładu pola elektrycznego w otoczeniu wiązki przewodów toru prądowego napowietrznej linii elektroenergetycznej 400 kV. Przewody fazowe wykonane w formie potrójnej wiązki

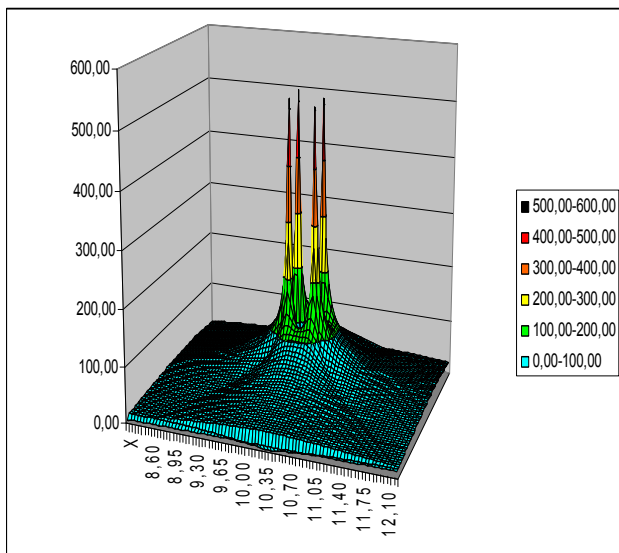
Na rysunkach 8 oraz 9 przedstawiono w formie graficznej rozkład natężenia pola elektrycznego dla linii napowietrznej 400 kV, której przewody fazowe wykonano w formie poczwórnych wiązek przewodów. Wyniki obliczeniowej identyfikacji natężenia pola elektrycznego na płaszczyźnie pokazuje rysunek 8, natomiast rysunek 9 zawiera wyniki w przestrzeni trójwymiarowej.

Z rysunków 4-9 wynika, że natężenie pola elektrycznego najwolniej maleje wraz z oddalaniem się od źródła w kierunku linii posiadającej początek w osi

geometrycznej toru prądowego a następnie przechodzi przez osie pojedynczych przewodów wiązek. W takich właśnie kierunkach istnieją najlepsze warunki do rozwoju wyładowań koronowych. Widać również, że w niewielkich (kilkunasto, kilkudziesięciocentymetrowych) odległościach od wiązek przewodów fazowych zmiana wartości natężenia pola elektrycznego jest bardzo dynamiczna, natomiast wraz z oddalaniem się od osi przewodów wiązkowych omawiane zjawisko zachodzi o wiele wolniej. Geometria wiązki oraz liczba zastosowanych w niej przewodów wpływa na przebieg linii sił pola elektrycznego generowanego przez elektroenergetyczną linię napowietrzną, co widać na rysunkach 4-9.



Rys.8. Graficzna prezentacja 2D wyników cyfrowych symulacji rozkładu pola elektrycznego w otoczeniu wiązki przewodów toru prądowego napowietrznej linii elektroenergetycznej 400 kV. Przewody fazowe wykonane w formie poczwórnej wiązki



Rys.9. Graficzna prezentacja 3D wyników cyfrowych symulacji rozkładu pola elektrycznego w otoczeniu wiązki przewodów toru prądowego napowietrznej linii elektroenergetycznej 400 kV. Przewody fazowe wykonane w formie poczwórnej wiązki

Ponadto większa liczba przewodów w wiązce przypadająca na pojedynczy tor prądowy powoduje, że lokalne maksima natężenia pola elektrycznego mają niższą wartość w stosunku do wiązek o mniejszej liczbie przewodów.

Różnica pomiędzy maksymalnym natężeniem pola elektrycznego generowanego przez linie o napięciu 400 kV gdzie przewody fazowe są podwójne wynosi  $E_{max}=795$  kV/m, dla przewodów potrójnych  $E_{max}=644$  kV/m natomiast przy wykonaniu wiązki przewodów fazowych w formie poczwórnej  $E_{max}=520$  kV/m.

## Wnioski

1. W przypadku wykonania torów prądowych w postaci wiązek przewodów można zauważyć korzystny efekt takiego działania w postaci zmniejszenia objętości przestrzeni narażonych na występowanie w nich wyładowań niepełnych redukując tym samym ich oddziaływanie na środowisko.
2. Zastosowanie większej ilości przewodów w wiązce i/lub większych długości odstępników pomiędzy przewodami tej samej wiązki powoduje zwiększenie tzw. zastępczej średnicy przewodu fazowego określonej wzorami empirycznymi.
3. Przewody fazowe o większych średnicach zastępczych są źródłami pola elektrycznego o mniejszej niejednorodności co wpływa korzystnie na ograniczanie możliwości wystąpienia ulotu elektrycznego.
4. Zaprezentowane możliwości ograniczenia ulotu elektrycznego mają korzystny wpływ na trwałość przewodów fazowych oraz redukcję strat związanych z przesyłem energii elektrycznej.

**Autorzy:** dr Dariusz Szafrowski, Katedra Energoelektryki, ul. Wybrzeże Wyspiańskiego 27, 50-370 Wrocław, E-mail: [dariusz.szafrowski@pwr.edu.pl](mailto:dariusz.szafrowski@pwr.edu.pl); mgr inż. Jacek Gumiela, Katedra Energoelektryki, ul. Wybrzeże Wyspiańskiego 27, 50-370 Wrocław, E-mail: [jacek.gumiela@pwr.edu.pl](mailto:jacek.gumiela@pwr.edu.pl).

## LITERATURA

- [1] Szuba M. i inni: Linie i stacje elektroenergetyczne w środowisku człowieka; wydanie 4; Biuro Konsultingowo-Inżynierskie „EKO-MARK”; Warszawa 2008
- [2] Flisowski Z.; Technika wysokich napięć; wydanie 3; Wydawnictwa Naukowo-Techniczne; Warszawa 1995
- [3] Zeńczak M.; Estimation of electric and magnetic fields intensities under power transmission lines in real country conditions; Przegląd Elektrotechniczny; 7/2008; Warszawa; 2008
- [4] Wasiak I.; Elektroenergetyka w zarysie – Przesył i rozdział energii elektrycznej; Wydawnictwo Politechniki Łódzkiej; Łódź; 2010
- [5] Djalel D., Influence of atmospheric conditions on the corona effect in HV power systems, Conference: 16th International Power Electronics and Motion Control Conference and Exposition (PEMC) Antalya Turkey, Vol. 628 – 634, 2014
- [6] Szafrowski D., Gumiela J.; Zastosowanie zmodyfikowanej metody różnicowej w obliczeniowej identyfikacji rozkładu pola elektrycznego; Przegląd Elektrotechniczny; 12/2016; Warszawa; 2016
- [7] Sadiku M. .: Numerical Techniques in Electromagnetics, Second edition, CRC Press, ISBN 0-8493-1395-3, Boca Raton London New York Washington, D.C. 2001