

Krzysztof KRÓL*

SYMULACJA TRÓJWYMIAROWEGO NATEŻENIA POLA ELEKTRYCZNEGO LINII ELEKTROENERGETYCZNEJ

W artykule zaprezentowano metodę obliczania natężenia pola elektrycznego pod linią napowietrzną z uwzględnieniem zmienności rozkładu ładunku wzdłuż przewodu oraz zwisów przewodów. Zwis przewodów opisano za pomocą krzywej łańcuchowej. Proponowane obliczenia opierają się na metodzie ładunków symulacyjnych (CSM) oraz metodzie odbić zwierciadlanych.

SŁOWA KLUCZOWE: natężenie pola elektrycznego, napowietrzna linia elektroenergetyczna, zwis, krzywa łańcuchowa, metoda ładunków symulacyjnych

1. WSTĘP

Pole elektryczne wytwarzane przez linie wysokiego napięcia jest obiektem szczególnego zainteresowania ze względu na możliwość szkodliwego oddziaływania na organizmy żywe. Wartość natężenia pola elektrycznego uzależniona jest od warunków terenowych, kształtu słupów, rozmieszczenia przewodów i kolejności poszczególnych faz oraz napięcia fazowego.

Obliczanie 3-wymiarowego natężenia pola elektrycznego pod linią wysokiego napięcia jest bardzo pracochłonne i żmudne, dlatego większość uproszczonych obliczeń zakłada, że przewody są prostoliniowe i równoległe do powierzchni ziemi, a ładunek wzdłuż przewodów linii jest stały.

W artykule zaprezentowano zastosowanie metody ładunków symulacyjnych dla wyznaczenia trójwymiarowego pola elektrycznego napowietrznych linii elektroenergetycznych. W obliczeniach uwzględnia się zwis przewodów oraz zmienną wartość ładunków symulacyjnych wzdłuż linii. Zaprezentowany artykuł jest kontynuacją publikacji [1, 2, 4].

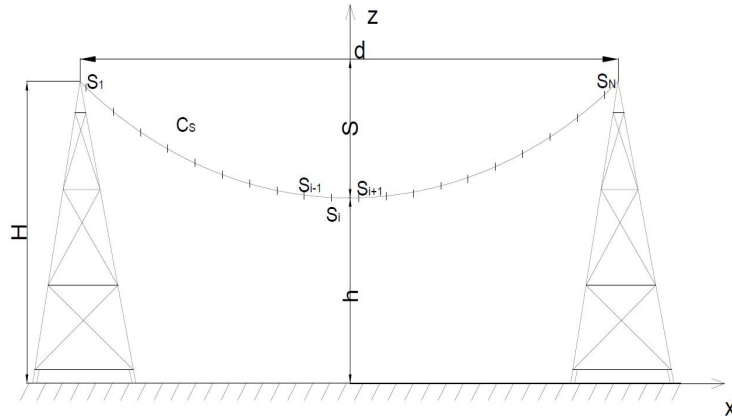
2. NATEŻENIE POLA ELEKTRYCZNEGO LINII

Zwis linii elektroenergetycznych zależy od indywidualnych cech terenu. Każdy przewód przęśla o długości d dzieli się na n segmentów o takiej samej długości ($S_1, S_2, \dots, S_{i-1}, S_i, S_{i+1}, S_n$) jak pokazano na rys. 1, gdzie H jest maksy-

* Politechnika Poznańska.

malną wysokością linii, h jest minimalną wysokością w połowie rozpiętości ($S = H - h$), S jest zwisem przewodu.

W obliczeniach należy przyjąć zasadę, że liczba symulowanych ładunków musi odpowiadać liczbie zdefiniowanych segmentów.



Rys. 1. Podział przewód linii napowietrznej ze zwisem na n segmentów

Każdy z segmentów (S_1, \dots, S_n) można opisać za pomocą równania krzywej łańcuchowej:

$$z'(x') = h + 2\alpha \sinh^2\left(\frac{x'}{2\alpha}\right) \quad (1)$$

gdzie współczynnik α jest związany z mechanicznymi parametrami linii: $\alpha = T_h/w$. T_h jest współczynnikiem naprężeń mechanicznych w połowie linii, w jest ciężarem na jednostkę długości linii. Współczynnik ten można obliczyć w sposób rekurencyjny z zależności:

$$H = h + 2\alpha \sinh^2\left(\frac{d}{2\alpha}\right) \quad (2)$$

Rozkład potencjału za pomocą metody ładunków symulacyjnych w dowolnym punkcie badanej przestrzeni wyznacza się z:

$$V_{S_i}(r') = \int_{C_{S_i}} \frac{\lambda_{S_i}}{4\pi\epsilon_0} \frac{dl_i}{R} \quad (3)$$

gdzie $\epsilon_0 = 8,854 \cdot 10^{-12}$ F/m jest przenikalnością elektryczną próżni, a λ gęstością liniową ładunku symulacyjnego segmentu S_i . Całkę (3) oblicza się wzdłuż krzywej $C_{S_i}(r')$ dla segmentu S_i $|R| = |r - r'|$ w której r' jest współrzędną promieniową punktu źródłowego na krzywej $C_{S_i}(r')$, a r oznacza współrzędną promie-

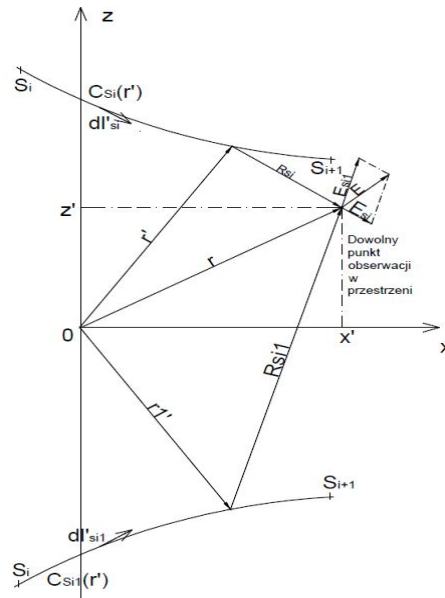
niową punktu obserwacji. Wektor odległości punktu źródłowego dla danego segmentu od punktu obserwacji można zapisać jako:

$$\vec{R}_{Si} = (x - x')\vec{\alpha}_x + (y - y')\vec{\alpha}_y + (z - z')\vec{\alpha}_z \quad (4)$$

A dla odbicia zwierciadlanego segmentu:

$$\vec{R}_{Si1} = (x - x')\vec{\alpha}_x + (y - y')\vec{\alpha}_y + (z + z')\vec{\alpha}_z \quad (5)$$

gdzie (x, y, z) są współrzędnymi punktu obserwacji, a (x', y', z') współrzędnymi punktu źródłowego, jak na rys. 2.



Rys. 2. Geometria układu: przewód napowietrzny - odbicie zwierciadlane przewodu

Ostatecznie potencjał pola elektrycznego dla danego segmentu wynosi:

$$V_{Si}(r') = \frac{1}{4\pi\epsilon_0} \left[\int_{S_i} \frac{\lambda_{si}(r')}{R_{si}} dl'_i - \int_{S_{i1}} \frac{\lambda_{si}(r')}{R_{si1}} dl'_{si1} \right] \quad (6)$$

Dla pojedynczego przewodu b o n segmentach, potencjał punktu znajdującego się na powierzchni każdego segmentu jest obliczany w następujący sposób [1, 2, 3, 5, 6]:

$$\begin{bmatrix} V_S \\ V_{s1} \\ \cdot \\ V_{sn} \end{bmatrix} = \frac{1}{4\pi\epsilon_0} \begin{bmatrix} I1_{11} - I2_{11} & I1_{12} - I2_{12} & \dots & I1_{1n} - I2_{1n} \\ I1_{21} - I2_{21} & I1_{22} - I2_{22} & \dots & I1_{2n} - I2_{2n} \\ \cdot & \cdot & \cdot & \cdot \\ I1_{n1} - I2_{n1} & I1_{n2} - I2_{n2} & \dots & I1_{nn} - I2_{nn} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \lambda_{s1} \\ \lambda_{s2} \\ \cdot \\ \lambda_{sn} \end{bmatrix} \quad (7)$$

lub

$$[V_S]_b = [P_S]_{bb} [\lambda_S]_b \quad (8)$$

przy czym całki $I1$ i $I2$ mają następującą postać:

$$I1_{ij} = \int_{C_{Si}} \frac{\cosh\left(\frac{x_j'}{\alpha}\right) dx_j'}{\sqrt{(x_i - x_j')^2 + (y_i - y_j')^2 + (z_i - h - 2\alpha \sinh^2\left(\frac{x_j'}{2\alpha}\right))^2}} \quad (9)$$

$$I2_{ij} = \int_{C_{Si}} \frac{\cosh\left(\frac{x_j'}{\alpha}\right) dx_j'}{\sqrt{(x_i - x_j')^2 + (y_i - y_j')^2 + (z_i + h + 2\alpha \sinh^2\left(\frac{x_j'}{2\alpha}\right))^2}} \quad (10)$$

Z równania (7) można wyznaczyć ładunki dla poszczególnych segmentów:

$$\begin{bmatrix} \lambda_{s1} \\ \lambda_{s2} \\ \vdots \\ \lambda_{sn} \end{bmatrix} = 4\pi\epsilon \begin{bmatrix} V_S \\ V_{s1} \\ \vdots \\ V_{sn} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} I1_{11} - I2_{11} & I1_{12} - I2_{12} & \dots & I1_{1n} - I2_{1n} \\ I1_{21} - I2_{21} & I1_{22} - I2_{22} & \dots & I1_{2n} - I2_{2n} \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ I1_{n1} - I2_{n1} & I1_{n2} - I2_{n2} & \dots & I1_{nn} - I2_{nn} \end{bmatrix}^{-1} \quad (11)$$

W przypadku, gdy linia energetyczna składa się z więcej niż jednego przewodu, ładunki wywołane na n segmentach każdego przewodu są obliczane z zależności (12).

$$\begin{bmatrix} [V_S]_1 \\ [V_S]_2 \\ \vdots \\ [V_S]_B \end{bmatrix} = \frac{1}{4\pi\epsilon_0} \begin{bmatrix} [P_S]_{11} & [P_S]_{12} & \dots & [P_S]_{1n} \\ [P_S]_{21} & [P_S]_{22} & \dots & [P_S]_{2n} \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ [P_S]_{B1} & [P_S]_{B2} & \dots & [P_S]_{Bn} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} [\lambda_S]_1 \\ [\lambda_S]_2 \\ \vdots \\ [\lambda_S]_B \end{bmatrix} \quad (12)$$

gdzie $[P_S]_{ij}$ jest macierzą współczynników między segmentami przewodu i , a przewodem j , $[\lambda_S]_{ij}$ jest macierzą wyindukowanych ładunków między segmentami przewodu i , a przewodem j , $[V_S]_{ij}$ jest macierzą napięcia między segmentami przewodu i , a przewodem j .

Natężenie pola w dowolnym miejscu nad powierzchnią ziemi przedstawia wzór (13):

$$E(r') = \frac{1}{4\pi_0} \left(\int_{C_{si}(r')} \frac{\lambda_{si}(r')}{R_{si}^2} dl_{si}' - \int_{C_{si1}(r')} \frac{\lambda_{si}(r')}{R_{si1}^2} dl_{si1}' \right) \quad (13)$$

Całkowite natężenie w punkcie obserwacji dla wszystkich B przewodów można przedstawić wzorem:

$$E_C(x, y, z) = \sum_{b=1}^B \frac{1}{4\pi\epsilon_0} [I_{3b} - I_{3b}] \quad (14)$$

gdzie

$$I_{3b} = \int_{-\frac{d}{2}}^{\frac{d}{2}} \lambda_{Sn}(r') \frac{((x-x')\vec{\alpha}_x + (y-y')\vec{\alpha}_y + (z-z')\vec{\alpha}_z) \cosh\left(\frac{x'}{a}\right)}{(\sqrt{(x-x')^2 + (y-y')^2 + (z-z')^2})^3} dx' \quad (15)$$

$$I_{4b} = \int_{-\frac{d}{2}}^{\frac{d}{2}} \lambda_{Sn}(r') \frac{((x-x')\vec{\alpha}_x + (y-y')\vec{\alpha}_y + (z-z')\vec{\alpha}_z) \cosh\left(\frac{x'}{a}\right)}{(\sqrt{(x-x')^2 + (y-y')^2 + (z-z')^2})^3} dx' \quad (16)$$

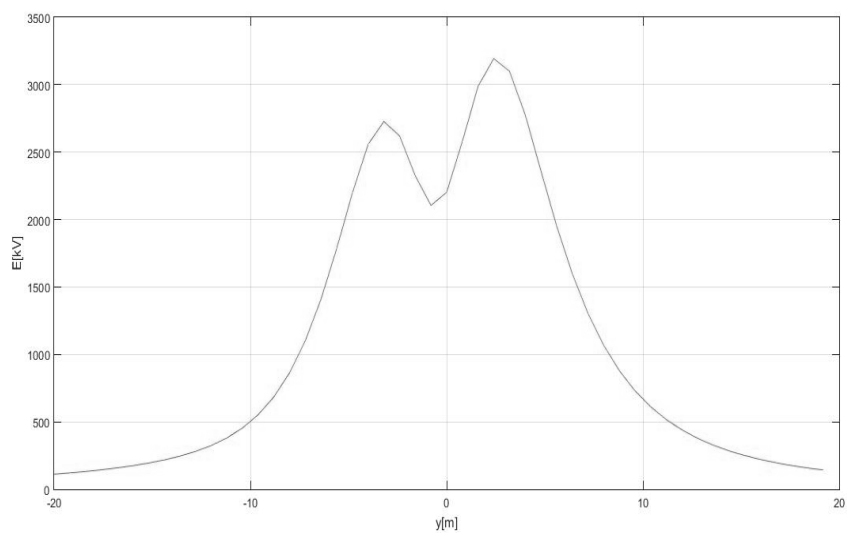
3. PRZYKŁADY OBLICZENIOWE

Zgodnie z wyprowadzonymi zależnościami wykonano przykładowe symulacje rozkładu natężenia pola elektrycznego pod liniami elektroenergetycznymi. Na rysunku 3 przedstawiono profil poprzeczny natężenia pola elektrycznego w miejscu największego zwisu dla linii energetycznej 110 kV zawieszanej na słupach typu B2 o parametrach podanych w tabeli 1. Wykres trójwymiarowy natężenia pola elektrycznego na wysokości 2 metrów ($z = 2$) nad ziemią przedstawia rys. 4.

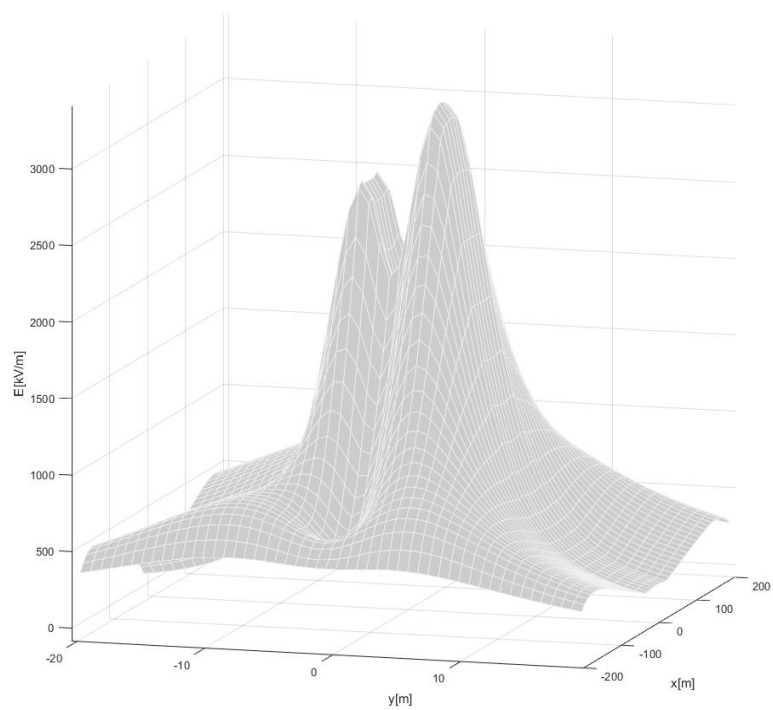
W dalszej kolejności dokonano obliczeń dla linii o napięciu 220 kV zawieszanej na słupach typu H52 o wymiarach podanych w tabeli 2. Rysunek 5 przedstawia profil poprzeczny natężenia pola elektrycznego w miejscu największego zwisu. Wykres trójwymiarowy natężenie pola elektrycznego przedstawia rys. 6.

Tabela 1. Parametry i konfiguracja linii 110 kV [7, 8]

Lp.	Przewód	Napięcie	Przekrój przewodu	Odległość od osi linii	Wysokość zawieszenia H	Wysokość w najniższym zwisie linii h wg [1]
		[kV]	[mm ²]	[m]	[m]	[m]
1.	L1	110	240	-2,85	16,5	5,85
2.	L2	110e ^{j120}	240	2,85	20,1	9,15
3.	L3	110e ^{-j120}	240	3,65	16,5	5,85
4.	Przewód odgromowy	0	95	0,5	23,1	12,15



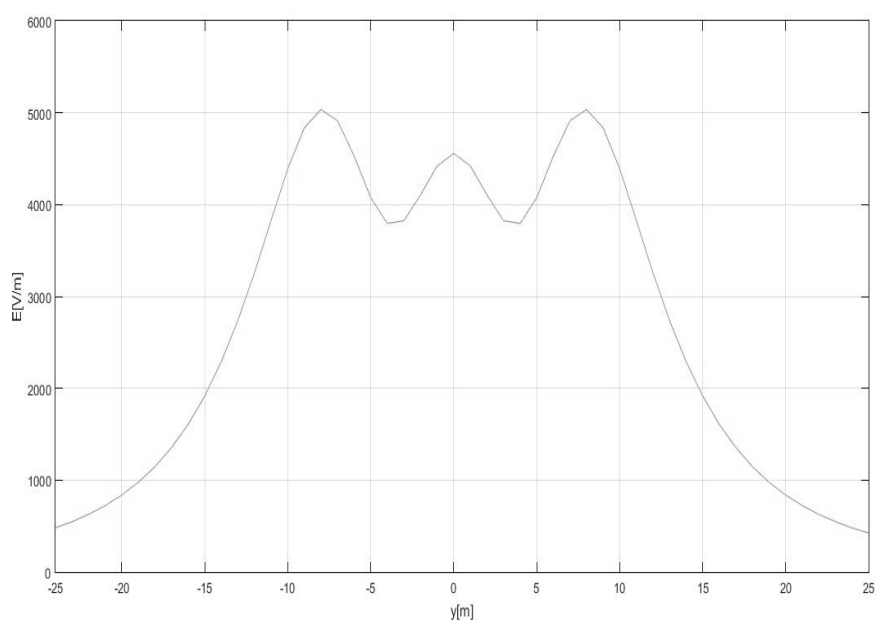
Rys. 3. Rozkład natężenia pola elektrycznego w miejscu największego zwisu dla linii 110 kV



Rys. 4. Rozkład natężenia pola elektrycznego pod linią 110 kV w widoku 3D

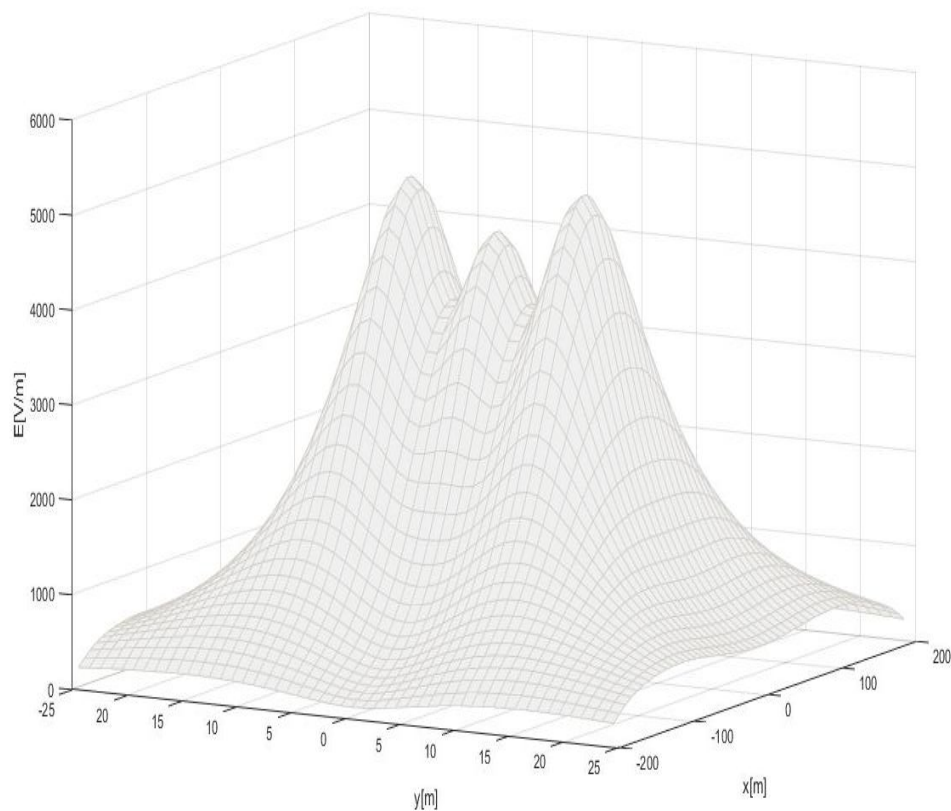
Tabela 2. Parametry i konfiguracja linii 220 kV [7, 8]

Lp.	Przewód	Napięcie	Przekrój przewodu	Odległość od osi linii	Wysokość zawieszenia H	Wysokość w najniższym zwisie linii h wg [1]
		kV	mm ²	m	m	m
1.	L1	$220e^{-j120}$	525	-7,6	26,5	6,7
2.	L2	220	525	0,0	26,5	6,7
3.	L3	$220e^{j120}$	525	7,60	26,5	6,7
4.	Przewód odgromowy	0	70	-5,6	30,6	10,8
5.	Przewód odgromowy	0	70	-5,6	30,6	10,8



Rys. 5. Rozkład natężenia pola elektrycznego w miejscu największego zwisu dla linii 220 kV

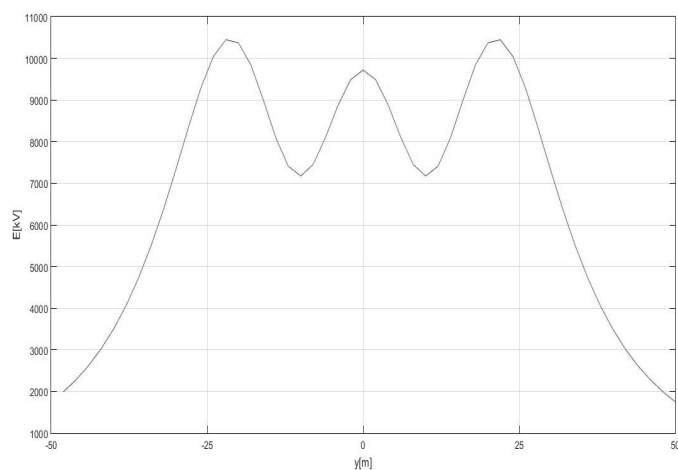
Ostatni przykład dotyczy symulacji pola elektrycznego linii 400 kV. Tabela 3 przedstawia parametry słupa typu Y52 dla linii elektrycznej 400 kV. Rysunek 7 przedstawia profil poprzeczny natężenia pola elektrycznego w miejscu największego zwisu. Wykres trójwymiarowy natężenie pola przedstawia rys. 8.



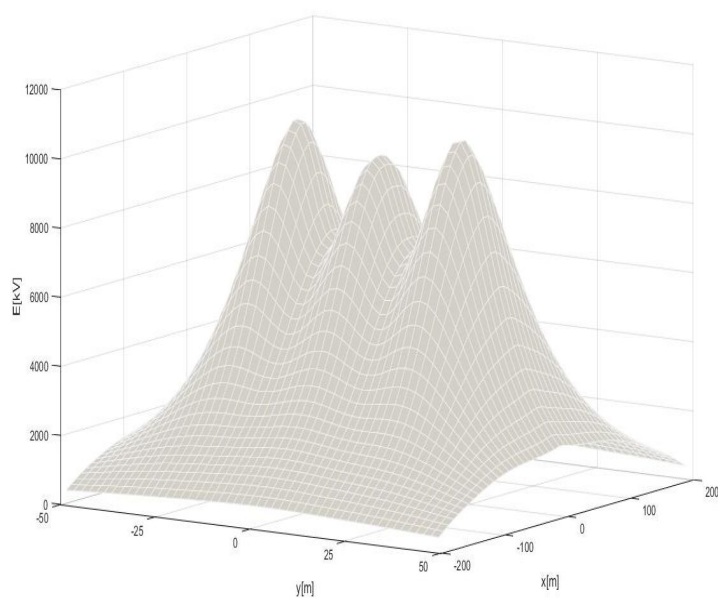
Rys. 6. Rozkład natężenia pola elektrycznego pod linią 220 kV w widoku 3D

Tabela 3. Parametry i konfiguracja linii 400 kV [7, 8]

Lp.	Przewód	Napięcie	Przekrój przewodu	Odległość od osi linii	Wysokość zawieszenia H	Wysokość w najniższym zwisie linii h wg [1]
		kV	mm ²	m	m	m
1.	L1	$400e^{-j120}$	2x525	-10,3	26,5	7,8
2.	L2	400	2x525	0,0	26,5	7,8
3.	L3	$400e^{j120}$	2x525	10,3	26,5	7,8
4.	Przewód odgromowy	0	70	-8,2	30,6	13,7
5.	Przewód odgromowy	0	70	8,2	30,6	13,7



Rys. 7. Rozkład natężenia pola elektrycznego w miejscu największego zwisu dla linii 400 kV



Rys. 8. Rozkład natężenia pola elektrycznego pod linią 400 kV w widoku 3D

4. WNIOSKI

W artykule dokonano obliczeń natężenia pola elektrycznego za pomocą metody ładunków symulacyjnych z uwzględnieniem zwisu przewodów, przy założeniu że linia elektroenergetyczna jest trójfazowa z przewodami odgromowymi.

Metoda uwzględnia zmiany wartości gęstości liniowej ładunków wzdłuż przewodów linii. Rozpatrzono trzy przypadki zasilania linii dla różnych typów słupów. Przedstawione obliczenia są bardzo pracochłonne i długotrwałe, dlatego należy dokonać optymalizacji obliczeń i potwierdzić pomiarami.

LITERATURA

- [1] Adel Z. El Dein, Effect of the variation of the charge distribution along multi-overhead transmission lines' conductors on the calculation method of ground surface electric field, *Electrical Power and Energy Systems*, 2013, p. 255-264.
- [2] Adel Z. El Dein, Parameters affecting the charge distribution along overhead transmission lines' conductors and their resulting electric field, *Electrical Power and Energy Systems*, 2014, p. 198-210.
- [3] Amiri R., Hadi H., Marich M. The influence of sag in the electric field calculation around high voltage overhead transmission lines. In: *Conference of Electrical Insulation and Dielectric Phenomena*, Kansas City, Missouri USA, 2006. p. 206–209.
- [4] Król K., Natężenie pola elektrycznego przewodu linii napowietrznej z uwzględnieniem zwisu, *Zastosowania komputerów w elektrotechnice*, 2016, p. 117-126.
- [5] Machczyński W., Zastosowanie "charge simulation method" /CSM/ w analizie zagadnień uziomych, XII Seminarium z podstaw elektrotechniki i teorii obwodów, Gliwice-Wisła, 1989, p. 278-286.
- [6] Singer H, Steinbigler H., A charge simulation method for the calculation of high Voltage fields, *IEEE Trans. on PAS*, 93, 1974, p.1660-1667.
- [7] Zeńczak M., Estimation of electric and magnetic field intensities under power transmission lines in real country conditions. „Przegląd Elektrotechniczny”, nr 7 (2008), p. 174–177.
- [8] Linie i stacje elektroenergetyczne w środowisku człowieka, Informator PSE – Operator, Warszawa 2008, www.pse-operator.pl.

SIMULATION OF 3-D ELECTRIC FIELD INTENSITY GENERATED BY OVERHEAD POWER LINES

The paper presents a method to calculate the electric field strength under an overhead power line, taking into account the variability of the charge distribution along the conductor and wire sag, which is described by the catenary curve. The proposed calculations are based on the Charge Simulation Method and the Image Method.

(Received: 06. 02. 2017, revised: 27. 02. 2017)