POZNAN UNIVERSITY OF TECHNOLOGY ACADEMIC JOURNALS
No 105 Electrical Engineering 2020

DOI 10.21008/j.1897-0737.2020.105.0001

Krzysztof KRÓL, Jan SZYMENDERSKI*, Krzysztof BUDNIK*, Wojciech MACHCZYŃSKI*

NATĘŻENIE POLA ELEKTRYCZNEGO I MAGNETYCZNEGO POD NAPOWIETRZNĄ LINIĄ ELEKTROENERGETYCZNĄ WYPOSAŻONĄ W DODATKOWE PRZEWODY REDUKCYJNE

W artykule przeprowadzono symulację rozkładu natężenia pola elektrycznego i magnetycznego dla linii elektroenergetycznych wyposażonej w dodatkowe przewody redukcyjne zawieszone pod przewodami fazowymi. Obliczenia rozkładu natężenia pola elektrycznego i magnetycznego wykonano dla linii elektroenergetycznych o napięciu znamionowym 110 kV.

SŁOWA KLUCZOWE: natężenie pola elektrycznego, natężenie pola magnetycznego, linia elektroenergetyczna, przewody redukcyjne.

1. WSTĘP

Napowietrzne linie elektroenergetyczne oprócz przesyłania energii elektrycznej na dalekie odległości są źródłem sztucznego pola elektromagnetycznego, które może szkodliwie oddziaływać min. na organizmy żywe [10, 11]. Pole to może mieć negatywny wpływ na podstawowe funkcje fizjologiczne, takie jak: działanie układu nerwowo-mięśniowego, wydzielanie gruczołowe, budowanie komórek i ich rozwój oraz wzrost i naprawę tkanek, a także może wywołać takie choroby jak: białaczkę, rak piersi, Alzheimera, depresję, zaburzenia neuropsychologiczne. Oprócz szkodliwego oddziaływania na materię ożywioną pole to może negatywnie oddziaływać na pobliską metalową infrastrukturę podziemną (rurociągi stalowe) oraz może powodować zakłócenia w łączności radiowej, telewizyjnej i telekomunikacyjnej.

Zgodnie z rozporządzeniem Ministra Środowiska z dnia 30 października 2003 roku w sprawie „dopuszczalnych poziomów pól elektromagnetycznych w środowisku oraz sposobów sprawdzania dotrzymania tych poziomów" wartość natężenia pola elektrycznego w miejscu zamieszkania przez ludzi nie może przekraczać 1 kV/m, natomiast w miejscu dostępnym dla ludzi musi być mniejsze od 10 kV/m. Natężenie pola magnetycznego dla obu tych obszarów nie może być większe od

* Politechnika Poznańska

60 A/m. Pomiary należy wykonywać na wysokości 2 metrów nad powierzchnią ziemi lub od powierzchni, na której mogą znaleźć się ludzie. Odległość od ściany budynku musi być większa od 1,6 metra.

W wielu miejscach, sąsiadujących z napowietrznymi liniami elektroenergetycznymi, dopuszczalne wartości natężeń pól mogą być przekroczone. Czego przykładem mogą być pomiary polowe wykonane i udostępnione przez Wojewódzki Inspektorat Ochrony Środowiska w Szczecinie dla linii 220 kV na trasie Krajnik-Glinki [12].

Aby sprostać wymaganiom stawianym przez rozporządzenie Ministra Środowiska należy zastanowić się nad sposobami redukcji natężenia pola elektrycznego i magnetycznego w otoczeniu istniejących obiektów, a w szczególności dla nowo projektowanych linii elektroenergetycznych.

Jednym ze sposobów redukcji natężenia pola elektrycznego i magnetycznego wykorzystywanych przez operatorów sieci energetycznych jest zastosowanie dodatkowych przewodów redukcyjnych, zawieszonych pod przewodami fazowymi [9]. Przewody redukcyjne zawieszone są na izolatorach i mają potencjał ziemi.

2. OBLICZENIA NATĘŻENIA POLA ELEKTRYCZNEGO I MAGNETYCZNEGO

Do przesyłania energii elektrycznej na dalekie odległości wykorzystuje się napowietrzne linie wysokich (WN) i najwyższych (NN) napięć 110 kV, 220 kV, 400 kV oraz 750 kV. Występujące w ich sąsiedztwie pole elektromagnetyczne o niskiej częstotliwości (50, 60 Hz) spełnia warunek quasi-stacjonarny. Oznacza to, że ładunki i prądy zmieniają się wolno w czasie, co pozwala pominąć efekty opóźnienia związane ze skończonym czasem propagacji fali elektromagnetycznej. Składową elektryczną i magnetyczną pola można wówczas rozpatrywać osobno [13].

2.1. Natężenie pola elektrycznego

Do obliczania wartości natężenia pola elektrycznego wykorzystuje się metodę ładunków symulacyjnych CSM oraz odbić zwierciadlanych z uwzględnieniem zwisu przewodu (rys. 1), gdzie H jest maksymalną wysokością zawieszenia przewodu, h jest minimalną wysokością zawieszenia przewodu w połowie rozpiętości przęsła, S – zwisem przewodu, przy czym $S=H-h$.

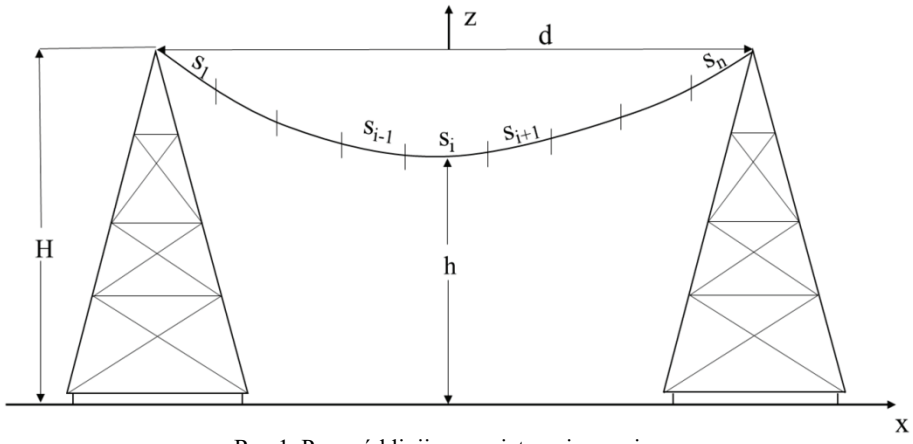
Kształt rozpatrywanego przewodu linii elektroenergetycznej można opisać za pomocą równania krzywej łańcuchowej:

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

gdzie współczynnik α związany jest z mechanicznymi parametrami linii, obliczany jest w sposób iteracyjny z zależności [1–6]:

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

Przewód ze zwisem dla przęsła o długości d należy podzielić na n segmentów o takich samych długościach (S_1, S_2, ...S_{i-1}, S_i, S_{i+1}, S_n). W obliczeniach należy przyjąć zasadę, że liczba symulacyjnych ładunków musi odpowiadać liczbie zdefiniowanych segmentów.



Rys.1. Przewód linii napowietrznej ze zwisem

Na rys. 2 przedstawiono i-ty segment przewodu i jego odbicie zwierciadlane. Współrzędne punktu obserwacji oznaczono jako $P(x, y, z)$, natomiast współrzędne punktu źródłowego $N(x', y', z')$, a dla jego odbicia zwierciadlanego $N'(x', y', z')$. Symbol r' jest odległością od początku układu współrzędnych punktu źródłowego na krzywej $C_{Si}(r')$, natomiast r_1' jest odległością od początku układu współrzędnych punktu źródłowego na krzywej $C_{Si1}(r')$ dla odbicia lustrzanego, a r jest odległością punktu obserwacji od początku układu współrzędnych. Gęstość liniową ładunku symulacyjnego oznaczono jako λ_{si} dla danego segmentu S_i i jego odbicia zwierciadlanego $-\lambda_{si}$. Wektor odległości punktu źródłowego $\mathbf{R_{si}}$ danego segmentu do punktu obserwacji można zapisać jako:

$$\mathbf{R_{si}} = (x - x')\mathbf{a_x} + (y - y')\mathbf{a_y} + (z - z')\mathbf{a_z} \tag{3}$$

natomiast dla odbicia zwierciadlanego segmentu $\boldsymbol{R_{si1}}$:

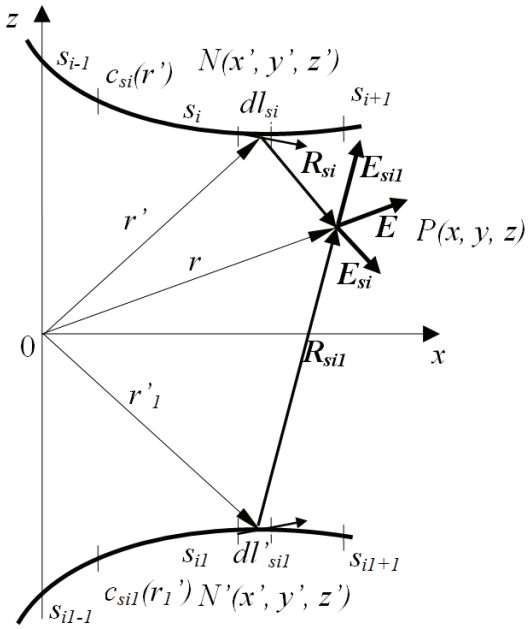
$$\mathbf{R_{si1}} = (x - x')\mathbf{a_x} + (y - y')\mathbf{a_y} + (z + z')\mathbf{a_z} \tag{4}$$

gdzie $\mathbf{a_x}$, $\mathbf{a_y}$, $\mathbf{a_z}$ – wektory jednostkowe w układzie współrzędnych prostokątnych.

Potencjał pola elektrycznego dla *i*-tego segmentu w punkcie obserwacji *P*(*x, y, z*) opisuje zależność:

$$V_{si}(P) = \frac{\lambda_{si}}{4\pi\varepsilon_0}\left(\int\limits_{C_{si}(r')} \frac{dl'_{si}}{R_{si}^2} - \int\limits_{C_{si1}(r')} \frac{dl'_{si1}}{R_{si1}^2} \right) \tag{5}$$

gdzie $\varepsilon_0 = 8{,}854 \cdot 10^{-12}$ F/m jest przenikalnością elektryczną próżni.



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

Ładunki poszczególnych segmentów dla pojedynczego przewodu wyznacza się z zależności:

$$\begin{bmatrix} \lambda_{s1} \\ \lambda_{s2} \\ \vdots \\ \lambda_{sn} \end{bmatrix} = 4\pi\varepsilon_0 \begin{bmatrix} I1_{11} - I2_{11} & I1_{12} - I2_{12} & \dots & I1_{1n} - I2_{1n} \\ I1_{21} - I2_{21} & I1_{22} - I2_{22} & \dots & I1_{2n} - I2_{2n} \\ \vdots & \vdots & \vdots & \vdots \\ I1_{n1} - I2_{n1} & I1_{n2} - I2_{n2} & \dots & I1_{nn} - I2_{nn} \end{bmatrix}^{-1} \begin{bmatrix} V_{s1} \\ V_{s2} \\ \vdots \\ V_{sn} \end{bmatrix} \tag{6}$$

przy czym potencjał każdego segmentu V_s = const, a współczynniki potencjałowe *I*1 i *I*2 mają następującą postać:

$$I1_{ij} = \int_{C_{Si}} \frac{cosh\left(\frac{x_j'}{\alpha}\right) dx_j'}{\sqrt{(x_i - x_j')^2 + (y_i - y_j')^2 + (z_i - h - 2\alpha sinh^2\left(\frac{x_j'}{2\alpha}\right))^2}} \tag{7}$$

$$I2_{ij} = \int_{C_{Si}1} \frac{cosh\left(\frac{x_j'}{\alpha}\right) dx'}{\sqrt{(x_i - x_j')^2 + (y_i - y_j')^2 + (z_i + h + 2\alpha sinh^2\left(\frac{x_j'}{2\alpha}\right))^2}} \tag{8}$$

W przypadku, gdy linia elektroenergetyczna składa się z m przewodów ($m > 1$), ładunki wywołane na n segmentach każdego przewodu m są obliczane z zależności :

$$\begin{bmatrix} [\lambda_s]_1 \\ [\lambda_s]_2 \\ \vdots \\ [\lambda_s]_m \end{bmatrix} = 4\pi\varepsilon_0 \begin{bmatrix} [P_s]_{11} & [P_s]_{12} & \cdots & [P_s]_{1m} \\ [P_s]_{21} & [P_s]_{22} & \cdots & [P_s]_{2m} \\ \vdots & \vdots & \vdots & \vdots \\ [P_s]_{m1} & [P_s]_{m2} & \cdots & [P_s]_{mm} \end{bmatrix}^{-1} \begin{bmatrix} [V_s]_1 \\ [V_s]_2 \\ \vdots \\ [V_s]_m \end{bmatrix} \tag{9}$$

gdzie $[P_s]_{ij}$ – macierz współczynników potencjałowych pomiędzy segmentami rozpatrywanych przewodów, $[\lambda_s]_i$ – wektor wyindukowanych ładunków rozpatrywanych segmentów, $[V_s]_i$ – wektor potencjałów rozpatrywanych przewodów.

Całkowite natężenie pola elektrycznego w punkcie obserwacji $P(x, y, z)$ dla wszystkich m przewodów wyznacza się z zasady superpozycji [4–7]:

$$\mathbf{E_T}(P) = \sum_{j=1}^{m} \frac{1}{4\pi\varepsilon_0} \left[\mathbf{I_{3j}} - \mathbf{I_{4j}} \right] \tag{10}$$

gdzie

$$\mathbf{I_{3j}} = \sum_{i=1}^{n} \int_{-\frac{d}{2}}^{\frac{d}{2}} \lambda_{si}(r') \frac{\left[\left(x - x_i'\right)\mathbf{a_x} + \left(y - y_i'\right)\mathbf{a_y} + \left(z - z_i'\right)\mathbf{a_z} \right] cosh\left(\frac{x_i'}{\alpha}\right)}{\left(\sqrt{\left(x - x_i'\right)^2 + \left(y - y_i'\right)^2 + \left(z - z_i'\right)^2} \right)^3} dx_i' \tag{11}$$

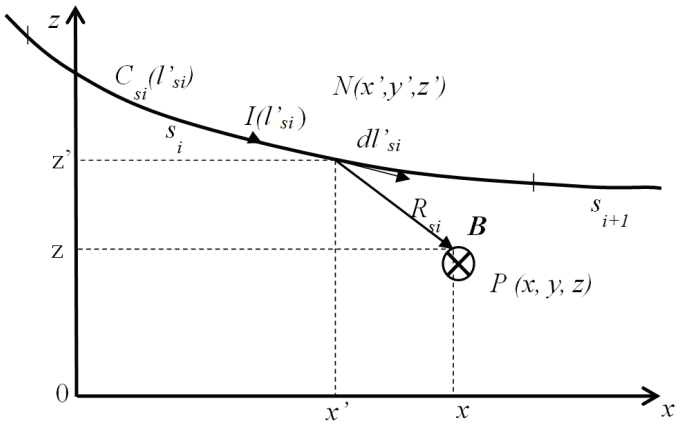
$$\mathbf{I_{4j}} = \sum_{i=1}^{n} \int_{-\frac{d}{2}}^{\frac{d}{2}} \lambda_{si}\left(r'\right) \frac{\left[\left(x - x_i'\right)\mathbf{a_x} + \left(y - y_i'\right)\mathbf{a_y} + \left(z + z_i'\right)\mathbf{a_z}\right]\cosh\left(\frac{x_i'}{\alpha}\right)}{\left(\sqrt{\left(x - x_i'\right)^2 + \left(y - y_i'\right)^2 + \left(z + z_i'\right)^2}\right)^3} dx_i' \quad (12)$$

2.2. Natężenie pola magnetycznego

W celu obliczenia natężenia pola magnetycznego dla pojedynczego przewodu z prądem w punkcie obserwacji $P(x, y, z)$ należy wykorzystać prawa Biota-Savarta, co zostało przedstawione na rys. 3 i opisane równaniem (13):

$$\mathbf{B}(P) = \mu_0 \left(\int_{C_{Si}} \frac{I(l)\left(d\mathbf{l'_{si}} \times \mathbf{R}(l)\right)}{4\pi \left|R_{si}(l)\right|^3} \right) \quad (13)$$

gdzie: $\mu_0 = 4\pi \cdot 10^{-7}$ H/m – przenikalność magnetyczna próżni, $I(l)$ – fazor prądu, $R_{si}(l)$ – odległość punktu źródłowego do punktu obserwacji, $\boldsymbol{R}(l)$ – wektor jednostkowy w kierunku $R_{si}(l)$.



Rys. 3. Rozpatrywany przewód z prądem

Źródłem pola magnetycznego są prądy w przewodach roboczych i prądy indukowane w przewodach odgromowych. Przed obliczeniem natężenia pola magnetycznego należy wyznaczyć prądy w przewodach odgromowych. Wykorzystuje się do tego celu zmodyfikowaną metodę odbić zwierciadlanych, w której odbicie następuje od fikcyjnej płaszczyzny przewodzącej, umieszczonej na pewnej głębokości p o wartości zespolonej. Obecnie metoda ta zastąpiła rozbudowaną metodę Carsona, nazywana jest metodą Gareja-Dubantona. Metoda została szeroko omówiona przez autorów w [4, 5, 8].

Natężenie pola magnetycznego w dowolnym punkcie obserwacji $P(x, y, z)$ nad powierzchnią ziemi wyznacza się za pomocą [4, 5, 8]:

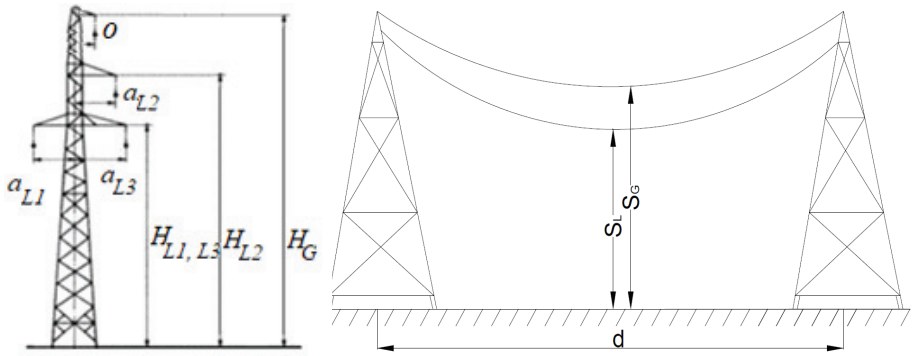
$$\mathbf{H}(x,y,z)=\frac{I}{4\pi}\left[\int_{-d/2}^{d/2}\frac{((x-x')\mathbf{a}_x+(y-y')\mathbf{a}_y+(z-z')\mathbf{a}_z)\cosh\left(\frac{x'}{\alpha}\right)}{\left(\sqrt{(x-x')^2+(y-y')^2+(z-z')^2}\right)^3}dx'\right] \quad (14)$$

Wypadkowa wartość natężenia pola magnetycznego od układu m przewodów linii elektroenergetycznej jest równa sumie geometrycznej składowych x, y, z:

$$H_T=\sqrt{\sum_{j=1}^{m}H_{xj}^2+\sum_{j=1}^{m}H_{yj}^2+\sum_{j=1}^{m}H_{zj}^2} \quad (15)$$

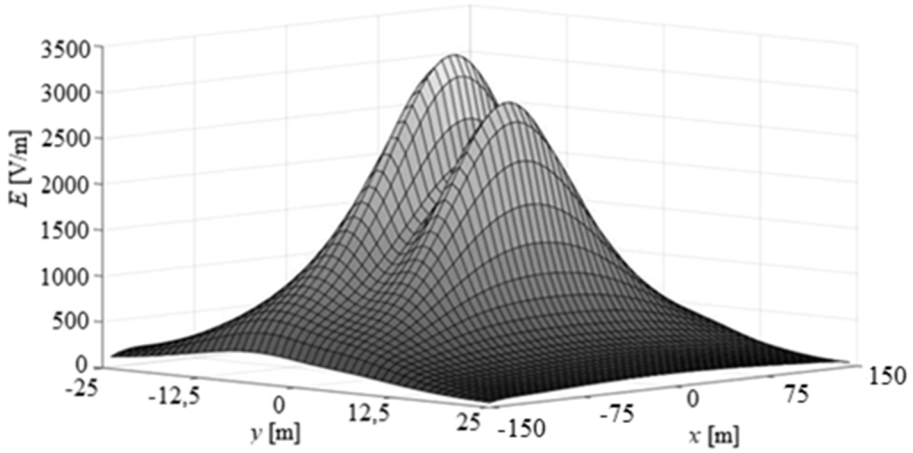
3. PRZYKŁAD OBLICZENIOWY

Obliczenia wykonano dla napowietrznej linii elektroenergetycznej o danych: napięcie znamionowe 110 kV, przewody fazowe typu AFL-8 240 mm^2, przewody odgromowe 2 x AFL-1,7 95 mm^2, fazory napięć $\underline{U}_1 = 110\ e^{-j120^\circ}$ kV, $\underline{U}_2 = 110$ kV, $\underline{U}_3 = 110\ e^{j120^\circ}$ kV, wartość skuteczna prądu 235 A. Długość przęsła linii d = = 300 m. Wybrano słup typu B2 o następujących parametrach: odległość między przewodami fazowymi a osią słupa: $a_{L1,L3} = \pm 2{,}85$ m i $a_{L2} = 3{,}65$ m, odległość między przewodami odgromowymi a osią słupa $o = 0{,}5$ m, wysokość zawieszenia przewodów fazowych $H_{L1,3} = 16{,}5$ m i $H_{L2} = 20{,}1$ m, wysokość przewodów fazowych w połowie rozpiętości przęsła $S_{L1,3} = 6{,}0$ m i $S_{L2} = 9{,}15$ m, wysokość zawieszenia przewodów odgromowych $H_G = 23{,}1$ m, wysokość przewodów odgromowych w połowie rozpiętości przęsła $S_G = 12{,}15$ m. Prąd wzbudzony w przewodzie odgromowym (obliczony) $|I_G| = 14{,}25$ A. Geometrię lini przedstawiono na rys. 4 [3, 4, 5, 8].

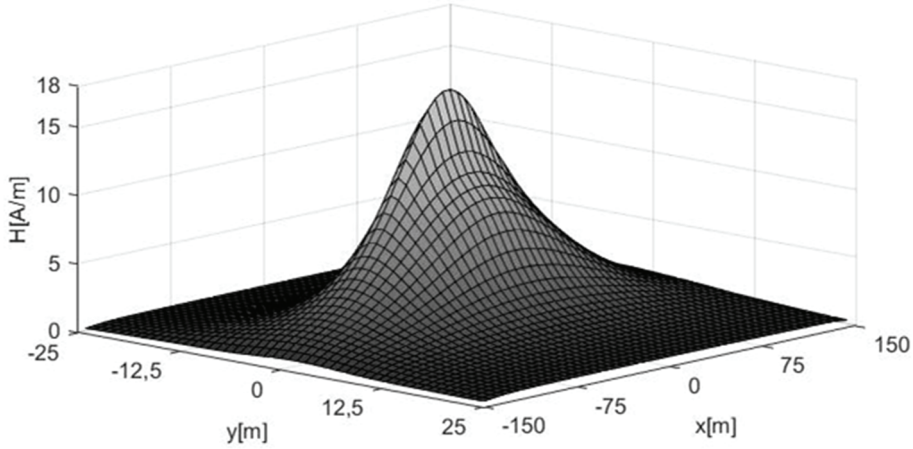


Rys. 4. Parametry geometryczne linii 110 kV

Rozkład natężenia pola elektrycznego przedstawiono na rys. 5, a rozkład natężenia pola magnetycznego na rys. 6. Obliczenia wykonano dla pojedynczego przęsła, w pasie o szerokości ±25 m. Punkt obserwacji znajduje się na wysokości 2 m nad powierzchnią ziemi. Gęstość siatki wynosi 1 m x 1 m.



Rys. 5. Rozkład natężenia pola elektrycznego pod linią 110 kV

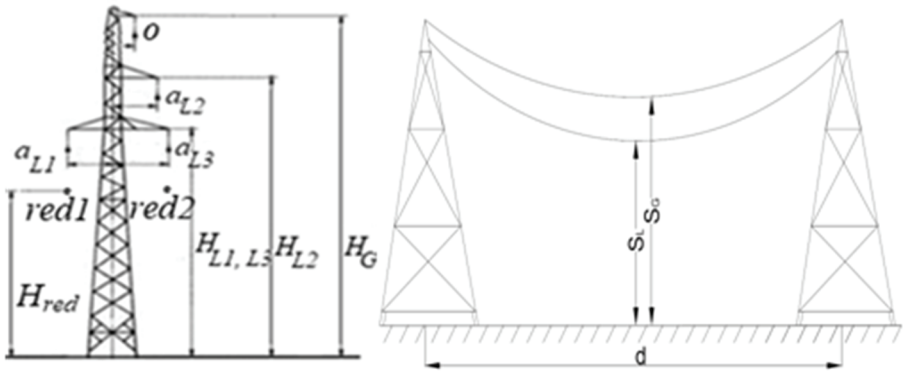


Rys. 6. Rozkład natężenia pola magnetycznego pod linią 110 kV

Maksymalna wartość natężenia pola elektrycznego i magnetycznego znajduje się w obszarze największego zwisu przewodów linii i wynosi odpowiednio 3353,83 V/m oraz 17,06 A/m.

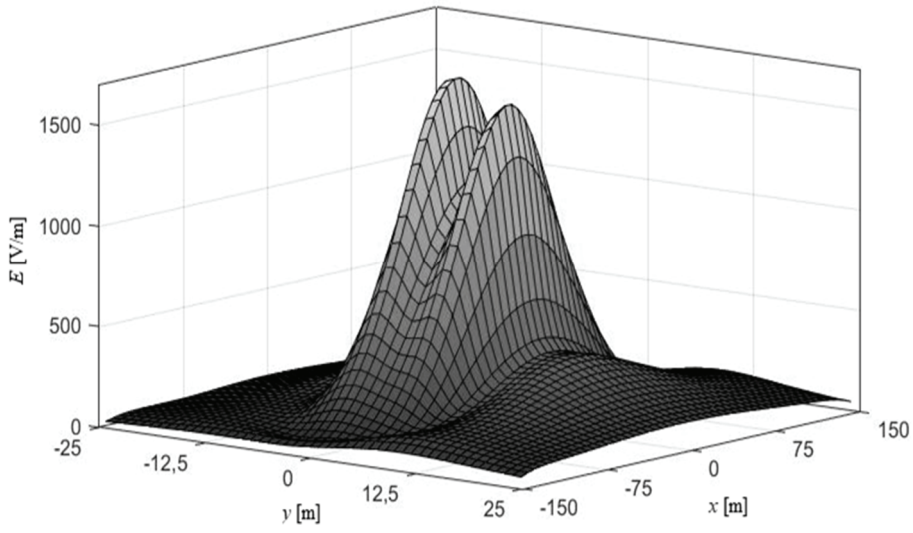
Następnie w tym samym układzie przeprowadzono symulację rozkładu natężenia pola elektrycznego i magnetycznego dla linii wyposażonej w dodatkowe przewody redukcyjne zawieszone na izolatorach pod przewodami roboczymi (rys.

7). Przewody redukcyjne mają potencjał ziemi. Odległości między przewodami fazowymi, a przewodami redukcyjnymi dla linii 110 kV wynosi 1,15 metra. Odległość ta wynika z normy PN-EN 50341. Prąd wzbudzony w przewodzie odgromowym (obliczony) $|I_G| = 3{,}89$ A oraz w dodatkowych przewodach redukcyjnych (obliczone) $|I_{Gred1}| = |I_{Gred2}| = 18{,}22$ A.

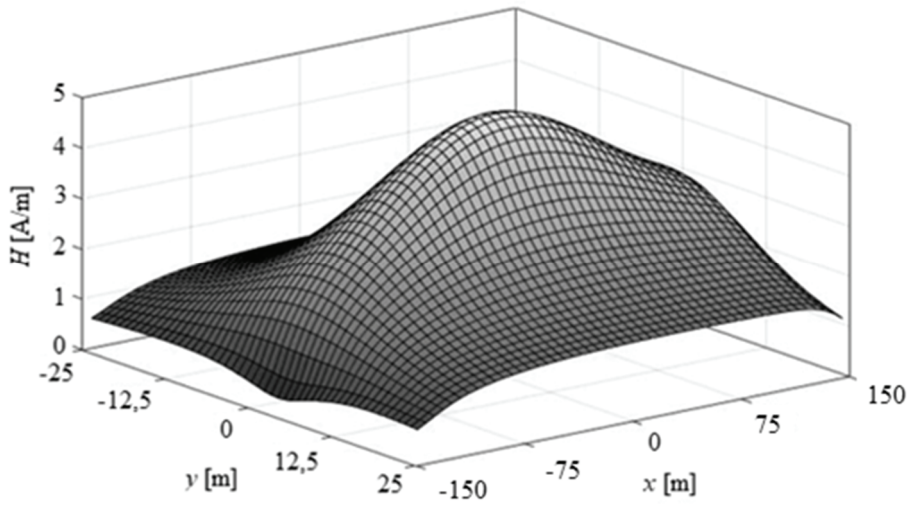


Rys. 7. Parametry geometryczne linii 110 kV wyposażonej w dodatkowe przewody redukcyjne

Rozkłady natężenia pola elektrycznego i magnetycznego dla linii wyposażonej w dodatkowe przewody redukcyjne przedstawiono na rys. 8. i rys. 9.



Rys. 8. Rozkład natężenia pola elektrycznego pod linią 110 kV jednotorową z dodatkowymi przewodami redukcyjnymi



Rys. 9. Rozkład natężenia pola magnetycznego pod linią 110 kV jednotorową z dodatkowymi przewodami redukcyjnymi

Zastosowanie dodatkowych przewodów redukcyjnych pod przewodem roboczym linii elektroenergetycznej o napięciu znamionowym 110 kV pozwoliło zredukować natężenie pola elektrycznego z E_{max} = 3353,83V/m do E_{max} = 1670,40 V/m, natomiast natężenie pola magnetycznego zmniejszono z H_{max} = 17,06 A/m do H_{max} = 4,96 A/m.

4. WNIOSKI

W artykule przedstawiono jedną z metod redukcji wartości natężenia pola elektrycznego i magnetycznego pod linią elektroenergetyczną. Obliczenia wykonano dla jednotorowej linii 110 kV dla pojedynczego przęsła o długości 300 m, w pasie o szerokości ±25 m. Punkt obserwacji umieszczono na wysokości z = 2 m nad powierzchnią ziemi zgodnie z wymaganiami aktualnych przepisów. Zastosowanie dodatkowych przewodów redukcyjnych zawieszonych pod przewodami roboczymi pozwala na zmniejszenie wartości natężeń pól.

Co należy podkreślić, przedstawione rozwiązanie można stosować do istniejących linii elektroenergetycznych, szczególnie gdy przewody linii znajdują się nad budynkami.

W dalszych pracach konieczne wydaje się uwzględnienie strat mocy na skutek indukowania się prądów w dodatkowych przewodach redukcyjnych oraz ograniczenie tych strat przez zmianę wysokości ich zawieszenia przy jednoczesnym zachowaniu jak największego efektu ekranującego.

LITERATURA

[1] Adel Z. El Dein, Optimal Arrangement of Egyptian Overhead Transmission Lines'Conductors Using Genetic Algorithm, Electrical Engineering, 2013, pp.1049–1059.
[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, pp. 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, pp. 206–209.
[4] Król K., Machczyński W., Budnik K., Szymenderski J., Redukcja natężenia pola elektrycznego i magnetycznego w otoczeniu napowietrznej linii elektroenergetycznej, Zastosowania Komputerów w Elektrotechnice, 2019, No. 97, s. 49–62.
[5] Król K., Machczyński W., Optimization of electric and magnetic field intensities in proximity of power lines using Genetic and Particle Swarm Algorithms, Archives of Electrical Engineering, 2018, Vol.67, pp. 829–843.
[6] Król K., Budnik K., Jarek P., Calculation of electric and magnetic field intensity under power line with taking into account conductor sag, ITM Web of Conferences, 2018, vol. 19, pp. 1–2.
[7] Machczyński W., Zastosowanie „charge simulation method" (CSM) w analizie zagadnień uziomowych, XII Seminarium z Podstaw Elektrotechniki i Teorii Obwodów, Gliwice-Wisła, 1989, s. 278–286.
[8] Król K., Machczyński W., Budnik K., Szymenderski J., Optimization of electric field intensities produced by power lines using particle swarm algorithms, ITM Web of Conferences, 2019, vol. 28, pp. 1–2.
[9] Gumiela J., Sztafrowski, Application of additional grounded wires in high voltage overhead power lines to reduce the intensity of electric field generated by phase wires, Przegląd Elektrotechniczny, R. 94, Nr 3, 2018, pp. 159–161.
[10] Fereidouni, A., Vahidi, B., Shishehgar F., Induced current calculation in embryo due to high voltage transmission line, Science International (Lahore), 2015, vol. 27, pp. 1855–1859.
[11] Fereidouni, A., Vahidi, B., Shishehgar, F., Hosseini Mehr T., Tahmasbi M., Human body modeling in the vicinity of high voltage transmission lines, Science International (Lahore), 2014, vol. 26, pp. 1017–103.
[12] https://www.wios.szczecin.pl/bip/files/421D9B98F07B4322BC3C5309844354C9/Rejestr%202017.pdf, (30.01.2018).
[13] Zeńczak M., Analiza pola elektrycznego i magnetycznego wokół linii elektroenergetycznych i wybranych urządzeń elektroenergetycznych, Napędy i Sterowanie Nr 9, 2001, s. 150–155.

INTENSITY OF THE ELECTRIC AND MAGNETIC FIELD NEAR POWER TRANSMISSION LINE EQUIPPED WITH ADDITIONAL REDUCTION WIRES

The paper presents simulates reducing the intensity of the electric and magnetic field for power lines equipped with additional reduction wires suspended under phase conductors. Calculations of the intensity of electric and magnetic field made for power lines with a voltage of 110 kV.

(Received: 20.03.2020, revised: 30.03.2020)