

Wojciech KRAJEWSKI

NUMERYCZNA ANALIZA PÓL: ELEKTRYCZNEGO I MAGNETYCZNEGO W SĄSIEDZTWIE SŁUPA KRAŃCOWEGO LINII 110 kV Z PRZEJŚCIEM NA PODZIEMNĄ LINIĘ KABLOWĄ

STRESZCZENIE *W artykule przedstawiono wyniki numerycznej analizy pól: elektrycznego i magnetycznego w sąsiedztwie słupa linii 110 kV, na którym następuje przejście z linii napowietrznej na podziemną linię kablową. Do obliczeń zastosowano własne programy komputerowe wykorzystujące metodę elementów brzegowych (MEB) oraz wariant metody ładunków symulowanych (MŁS) zwany metodą elementów liniowych (MEL). Wyniki obliczeń skonfrontowano z obowiązującymi przepisami z zakresu ochrony środowiska przed oddziaływaniem pól elektromagnetycznych.*

Słowa kluczowe: *linie WN, pole elektromagnetyczne, metoda elementów brzegowych*

1. WSTĘP

Oddziaływanie elektromagnetyczne linii WN na środowisko jest obecnie stosunkowo dobrze poznane, zarówno od strony teoretycznej, to znaczy w zakresie metod obliczeniowych [1-8] oraz oprogramowania do analizy pól [9, 10],

Doc. dr hab. inż. Wojciech KRAJEWSKI
e-mail: w.krajewski@iel.waw.pl

Zakład Systemów Pomiarowo-Diagnostycznych
Instytut Elektrotechniki

PRACE INSTYTUTU ELEKTROTECHNIKI, zeszyt 246, 2010

jak i od strony praktycznej w rozumieniu dostępnego materiału pomiarowego rozkładów pól w bezpośrednim sąsiedztwie tych linii [11-14], dla różnych ich rozwiązań konstrukcyjnych oraz konfiguracji geometrycznych samych linii jak i ich otoczenia. W pracach dotyczących powyższej tematyki badano wpływ wielu różnych czynników fizycznych oddziałujących na rozkłady pól. Między innymi analizowano wpływ ukształtowania terenu, przez który linie WN przebiegają [5, 6], uwzględniano oddziaływanie różnych obiektów (budynki, drzewa, ogrodzenia itp.) zlokalizowanych w ich sąsiedztwie [6, 8, 9], a także badano wpływ konstrukcji wsporczych [8] tych linii na rozkłady pól.

Pewnego rodzaju nowym zagadnieniem w dziedzinie badań nad oddziaływaniem na środowisko linii WN są krańcowe bądź rozgałęźne słupy napowietrznych linii 110 kV z przejściem na podziemną linię kablową o tym samym napięciu (rys. 1). W tym przypadku pozostające pod napięciem izolowane przewody z prądem prowadzone są wzdłuż wysokości słupa aż do poziomu terenu, gdzie łączone są z kablem elektroenergetycznym 110 kV. Ludzie przebywający w bezpośrednim sąsiedztwie takiego słupa mogą być narażeni na oddziaływanie pól o znacznie większych natężeniach niż w przypadku typowych napowietrznych linii WN. Opisane wyżej przejścia z rozdzielczych linii napowietrznych na linie kablowe wprowadzane są coraz częściej na terenach wielkich miast, gdzie konieczne jest bezkolizyjne doprowadzenie napięcia 110 kV do dzielnic centralnych, w których to dzielnicach lokalizowane są wielkie obiekty biurowe czy handlowe o znacznym zapotrzebowaniu na energię elektryczną.

Dla prawidłowej, nie pogarszającej stanu środowiska, lokalizacji wyżej wspomnianych słupów WN istotna jest precyzyjna znajomość rozkładów wytwarzanych przez nie pól elektromagnetycznych. W niniejszym artykule przedstawiono wyniki numerycznej analizy pól: elektrycznego i magnetycznego o częstotliwości 50 Hz w sąsiedztwie wybranego słupa krańcowego linii 110 kV, zlokalizowanego w pobliżu dużego biurowca (rys. 2). Do obliczeń zastosowano własne pakiety oprogramowania, które wyposażono w modele numeryczne wyżej wspomnianych słupów krańcowych.

Wyniki obliczeń skonfrontowano z obowiązującymi przepisami z zakresu ochrony przed oddziaływaniem pól elektromagnetycznych.

2. NUMERYCZNE MODELE PÓL

Rozkłady pola elektrycznego w sąsiedztwie rozważanego słupa zamodelowano stosując metodę hybrydową łączącą metodę elementów brzegowych (MEB) [15] z wariantem metody ładunków symulowanych (MŁS) [16], zwanym

tu metodą elementów liniowych (MEL) [9]. I tak, elementy, których jeden z wymiarów jest znacznie większy od dwóch pozostałych, takie jak kątowniki kratownic słupów, przewody robocze i odgromowe odwzorowano przy zastosowaniu MEL, natomiast ściany budynków czy izolatory zamodelowano stosując MEB. Powyższa metoda hybrydowa, wykorzystywana już wcześniej przez autora do analizy pól elektromagnetycznych w sąsiedztwie różnego rodzaju obiektów elektroenergetycznych, została szczegółowo opisana w pracach, np. [7-9] oraz uściślona w artykule [17].

Dla uniknięcia konieczności wyznaczania rozkładów pola elektrycznego w obszarze podziemnym, co nie jest przedmiotem niniejszego artykułu i wiąże się ze znacznym wydłużeniem czasu obliczeń, przyjęto, że fazowe izolowane przewody pod napięciem, sprowadzane wzdłuż wysokości słupa do ziemi połączone są za pomocą mufy z kablem wysokonapięciowym już na wysokości 3 m ponad powierzchnią terenu. Jest to tym bardziej uzasadnione, że powyższe przewody zamknięte są w metalowej obudowie sięgającej od powierzchni ziemi do wysokości ok. 3-4 m, tak jak to widać na rysunkach 1 i 2. Zatem można przyjąć, że znajdujące się w obudowie odcinki przewodów fazowych nie emitują do środowiska pola elektrycznego, gdyż jest ono skutecznie ekranowane przez działającą jak klatka Faradaya wspomnianą obudowę. Można także pominąć pole elektryczne wytwarzane przez trójfazowy kabel 110 kV, ze względu na stosunkowo niewielkie wzajemne odległości przewodów fazowych wewnątrz kabla oraz wzajemną kompensację pola elektrycznego od prądów w tych przewodach, oczywiście w przypadku pełnej symetrii geometrycznej i napięciowej faz. Przy takich założeniach można przyjąć, że ziemia ma potencjał zerowy i tak jak w przypadku słupów konwencjonalnych można uniknąć konieczności dyskretyzacji jej powierzchni poprzez zastosowanie odpowiedniego rozwiązania podstawowego w MEB i MEL.

Dalsze postępowanie jest podobne jak w przypadku tradycyjnych napowietrznych linii WN, stąd poniżej podano jedynie wyjściowe równanie całkowe, stanowiące podstawę omawianej techniki numerycznej.

Dla punktów obserwacji P_i położonych na powierzchniach obiektów o znanym potencjale (powierzchnia ziemi, przewody robocze i odgromowe, elementy kratownic słupów, ściany budynków) spełnione jest następujące równanie Fredholma pierwszego rodzaju:

$$\begin{aligned} & \sum_{j=1}^{n1} \int_{\Gamma_{Dj}} G(P, P_i) \sigma(P) dP + \sum_{j=1}^{n2} \int_{\Gamma_{Bj}} G(P, P_i) \sigma(P) dP + \int_{\Gamma_g} G(P, P_i) \sigma(P) dP + \\ & + \sum_{j=1}^{n3} \int_{\Gamma_{Kj}} G(P, P_i) \tau(P) dP = \varphi(P_i) \quad \text{dla } P_i \in \bigcup_{j=1}^{n2} \Gamma_{Bj} \bigcup_{j=1}^{n3} \Gamma_{Kj} \bigcup \Gamma_g \end{aligned} \quad (1)$$

gdzie:

Γ_{Dj} – powierzchnia j -tego dielektryka, np. izolatora,

Γ_{Bj} – powierzchnia j -tej ściany budynku,

Γ_g – powierzchnia ziemi,

K_j – krzywa reprezentująca j -ty obiekt modelowanego za pomocą elementów liniowych,

σ – gęstość ładunku powierzchniowego (MEB),

τ – gęstość ładunku liniowego (MEL),

$\varphi(P_i)$ – potencjał elektryczny w punkcie P_i ,

$n1, n2$ – liczby obiektów modelowanych elementami brzegowymi, odpowiednio o nieznanym i znanym potencjale na ich powierzchni,

$n3$ – liczba obiektów modelowanych elementami liniowymi.

$G(P, P_i)$ jest rozwiązaniem podstawowym równania Laplace'a podzielonym przez stałą elektryczną:

$$G(P, P_i) = \frac{1}{4\pi\epsilon_0 r} \quad (2)$$

przy czym:

$$r = \sqrt{(x - x_i)^2 + (y - y_i)^2 + (z - z_i)^2} \quad (3)$$

Dla punktów obserwacji P_i położonych na powierzchniach obiektów o nieznanym potencjale (np. izolatory, czy inne obiekty wykonane z materiałów izolacyjnych) można sformułować następujące równanie Fredholma drugiego rodzaju:

$$\begin{aligned} \frac{1}{2\epsilon_0} \frac{\epsilon_d + \epsilon_0}{\epsilon_d - \epsilon_0} \sigma(P_i) + \sum_{j=1}^{n1} \int_{\Gamma_{Dj}} \frac{\partial G(P, P_i)}{\partial n_i} \sigma(P) dP + \sum_{j=1}^{n2} \int_{\Gamma_{Cj}} \frac{\partial G(P, P_i)}{\partial n_i} \sigma(P) dP + \\ + \int_{\Gamma_g} \frac{\partial G(P, P_i)}{\partial n_i} \sigma(P) dP + \sum_{j=1}^{n3} \int_{K_j} \frac{\partial G(P, P_i)}{\partial n_i} \tau(P) dP = 0 \quad \text{dla } P_i \in \bigcup_{j=1}^{n1} \Gamma_{Dj} \end{aligned} \quad (4)$$

gdzie ϵ_d jest przenikalnością elektryczną izolatora.

Układ równań całkowych (1) i (4) stanowi podstawę do zastosowania rozwiązywanej metody numerycznej. Powyższe równania całkowe podlegają algebraizacji poprzez dyskretyzację obiektów elementami brzegowymi i liniowymi a następnie aproksymację poszukiwanych gęstości ładunków na powyższych elementach.

Dla uniknięcia konieczności dyskretyzacji nieskończenie rozległej, płaskiej powierzchni ziemi, w obszarze której nie występują źródła pola elektrycznego, w równaniach (3) i (4), tak jak to wcześniej wspomniano, stosuje się odpowiednie antysymetryczne względem powierzchni ziemi, to znaczy względem płaszczyzny xy , rozwiązanie podstawowe w następującej formie:

$$G^*(P, P_i) = \frac{1}{4\pi\epsilon_0} \left(\frac{1}{r} - \frac{1}{r'} \right) \quad (5)$$

$$r' = \sqrt{(x - x_i)^2 + (y - y_i)^2 + (z + z_i)^2} \quad (6)$$

Wówczas rozważany układ równań przyjmuje postać:

$$\begin{aligned} & \sum_{j=1}^{n1} \int_{\Gamma_{Dj}} G^*(P, P_i) \sigma(P) dP + \sum_{j=1}^{n2} \int_{\Gamma_{Bj}} G^*(P, P_i) \sigma(P) dP + \\ & + \sum_{j=1}^{n3} \int_{K_j} G^*(P, P_i) \tau(P) dP = \varphi(P_i) \quad \text{dla } P_i \in \bigcup_{j=1}^{n2} \Gamma_{Bj} \bigcup_{j=1}^{n3} \Gamma_{Kj} \end{aligned} \quad (7)$$

$$\begin{aligned} & \sum_{j=1}^{n1} \int_{\Gamma_{Dj}} G^*(P, P_i) \sigma(P) dP + \sum_{j=1}^{n2} \int_{\Gamma_{Bj}} G^*(P, P_i) \sigma(P) dP + \\ & + \sum_{j=1}^{n3} \int_{K_j} G^*(P, P_i) \tau(P) dP = \varphi(P_i) \quad \text{dla } P_i \in \bigcup_{j=1}^{n2} \Gamma_{Bj} \bigcup_{j=1}^{n3} \Gamma_{Kj} \end{aligned} \quad (8)$$

a)



b)



Rys. 1. Przykłady słupów linii 110 kV z przejściem na podziemną linię kablową:
a) słup krańcowy, b) słup rozgałęźny



Rys. 2. Słup linii 110 kV z przejściem na podziemną linię kablową zlokalizowany w sąsiedztwie biurowca CATALINA

W wyniku numerycznego rozwiązania powyższego układu równań otrzymuje się rozkłady gęstości ładunków na poszczególnych elementach liniowych i brzegowych. Znajomość powyższych rozkładów pozwala na obliczenie skalarnego potencjału elektrycznego w dowolnym punkcie przestrzeni powietrznej:

$$\varphi(P_i) = \sum_{j=1}^{n_S} \int_{S_k} G^*(P, P_i) \sigma(P) dP + \sum_{j=1}^{n_L} \int_{L_m} G^*(P, P_i) \tau(P) dP \quad (9)$$

gdzie n_S jest całkowitą liczbą elementów brzegowych, natomiast n_L jest liczbą elementów liniowych. Natężenie pola elektrycznego, \mathbf{E} , wyznacza się ze znanego wzoru:

$$\mathbf{E} = - \text{grad} \varphi \quad (10)$$

Stosuje się w tym celu następujące formy całkowe:

$$\mathbf{E}(P_i) = - \sum_{j=1}^{n_S} \int_{\Gamma_j} \sigma(P) \text{grad}_i G^*(P, P_i) dP - \sum_{k=1}^{n_L} \int_{K_k} \tau(P) \text{grad}_i G^*(P, P_i) dP \quad (11)$$

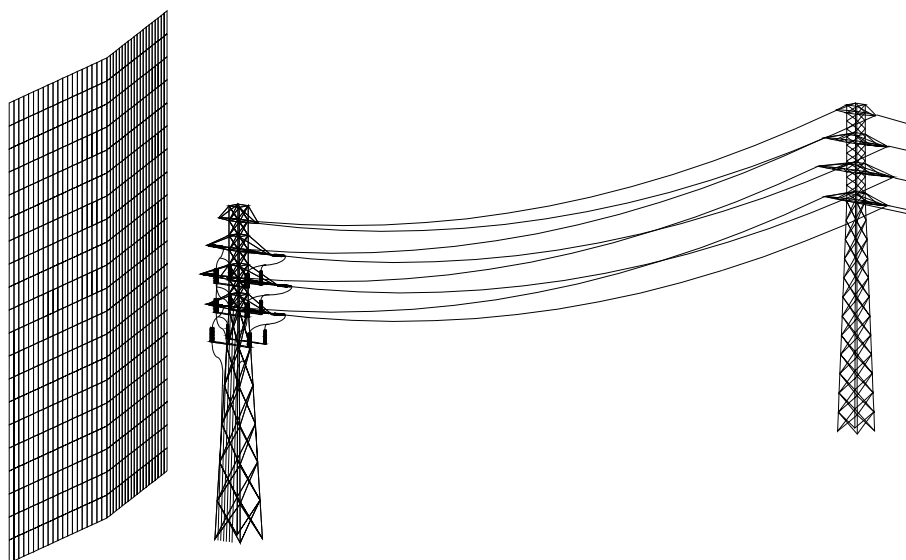
Ze względu na trójfazowy charakter wymuszenia, miejscem geometrycznym końca wektora natężenia pola elektrycznego, E , w dowolnym punkcie przestrzeni, są elipsy (pole eliptyczne). Przez natężenie pola elektrycznego E rozumiana jest tutaj długość długiej półosi elipsy podzielona przez $\sqrt{2}$. Wyznacza się ją ze wzorów podanych np. w pracy [1].

Przedstawione w artykule rozkłady pola magnetycznego wytwarzanego przez rozważany obiekt elektroenergetyczny obliczone zostały bezpośrednio z prawa Biota-Savarta.

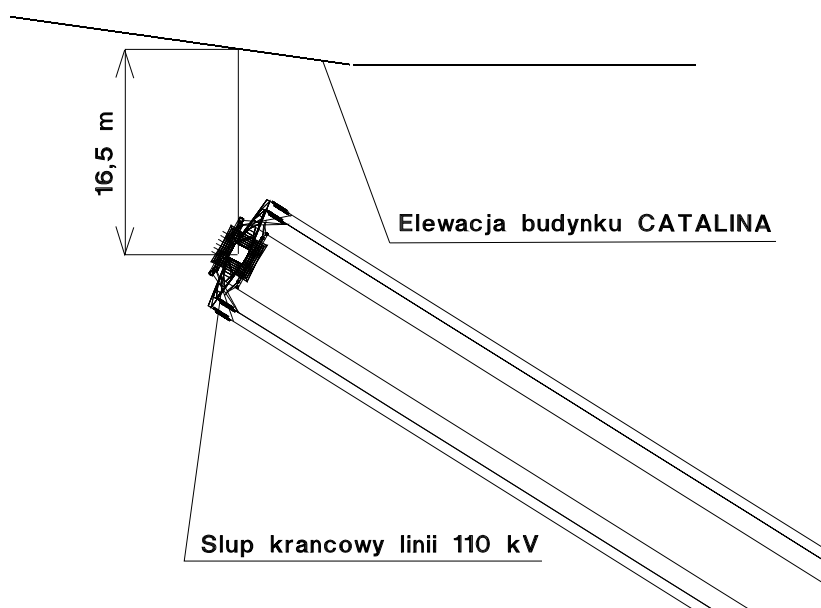
3. PRZYKŁADY OBLICZENIOWE

W niniejszym punkcie przedstawiono wyniki obliczeń pól: elektrycznego i magnetycznego o częstotliwości 50 Hz w otoczeniu wspomnianego wcześniej słupa krańcowego napowietrznej linii 110 kV z przejściem na podziemną linię kablową 110 kV. Powyższy słup umiejscowiony jest w odległości 16,5 m od ściany frontowej dużego biurowca zlokalizowanego w jednej z dzielnic Warszawy (rys. 2). Fragment tej ściany uwzględniono w obliczeniach pola elektrycznego.

Numeryczne modele obiektów, ich rozmieszczenie oraz sposób dyskretyzacji pokazano na rysunkach 3 i 4.



Rys. 3. Numeryczny model przęsła linii 110 kV ze słupem krańcowym zlokalizowanym w sąsiedztwie ściany frontowej biurowca (widok ogólny)



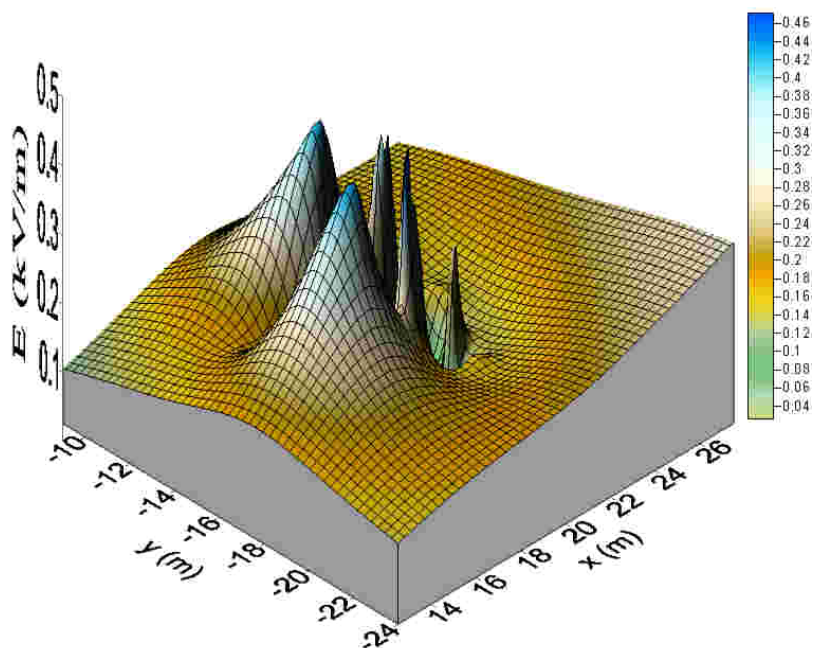
Rys. 4. Numeryczny model fragmentu przęsła linii 110 kV ze słupem krańcowym zlokalizowanym w sąsiedztwie ściany frontowej biurowca (rzut poziomy)

Obliczenia wykonano z zastosowaniem autorskiego programu BEMsolver 3D (wykorzystującego wcześniej opisaną technikę numeryczną), którego biblioteki wzbogacono o modele numeryczne rozważanych tutaj słupów krańcowych i rozgałęźnych.

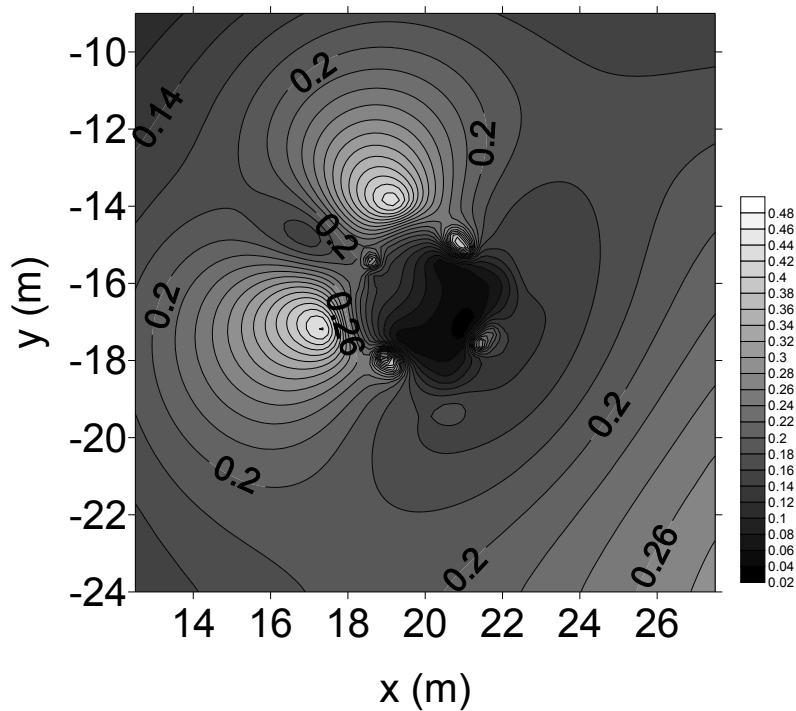
Obliczono rozkłady pól na wysokości 1 oraz 2 m nad powierzchnią terenu, na obszarze kwadratu o boku 15 m, w którego środku znajduje się rozważany słup krańcowy. Początek układu współrzędnych przyjęto w punkcie załamania elewacji budynku (rys. 5).

Przestrzenne rozkłady natężenia pola elektrycznego przedstawiono na rysunkach 5 i 7, natomiast linie stałego natężenia pola elektrycznego pokazano na rysunkach 6 i 8. Jak widać z powyższych rysunków natężenie pola elektryczne nie przekracza w sąsiedztwie słupa wartości 1 kV/m, to znaczy wartości, która zgodnie z polskimi regulacjami prawnymi [18] nie powinna być przekroczona w miejscach ogólnodostępnych, na terenach gdzie znajdują się obiekty przeznaczone dla całonocnego przebywania ludzi.

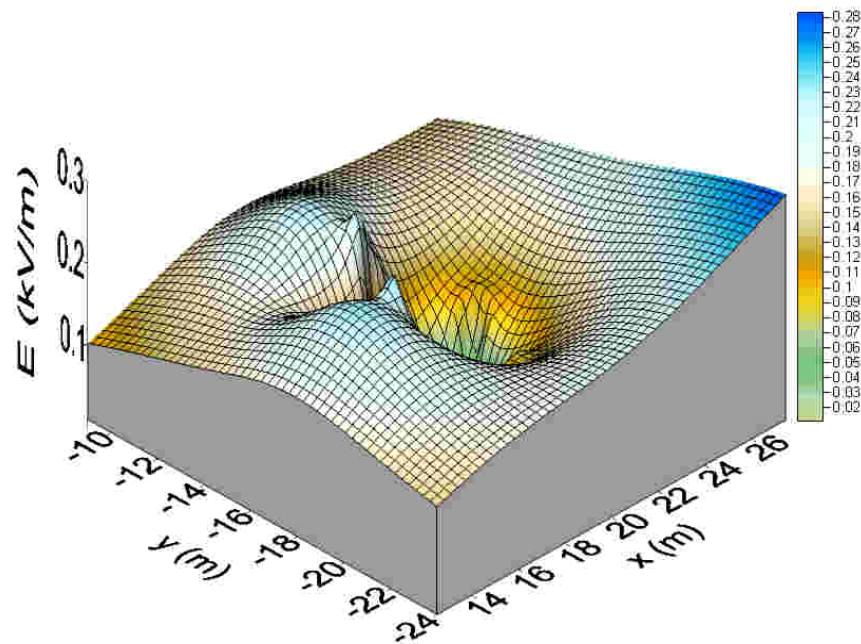
Rozkłady natężenia pola magnetycznego w sąsiedztwie przedmiotowego słupa przedstawiono na rysunkach 9 i 10, odpowiednio dla wysokości 2 m i 1 m nad poziomem terenu. W analizowanym przypadku do obliczeń przyjęto obciążenie linii prądem 500 A. Ponadto, punkty obliczeniowe przyjęto tak, aby ich odległość od przewodów z prądem nie była mniejsza niż 0,4 m, co wynika z głębokości wcześniej wspomnianej obudowy przewodów znajdującej się w dolnej części słupa.



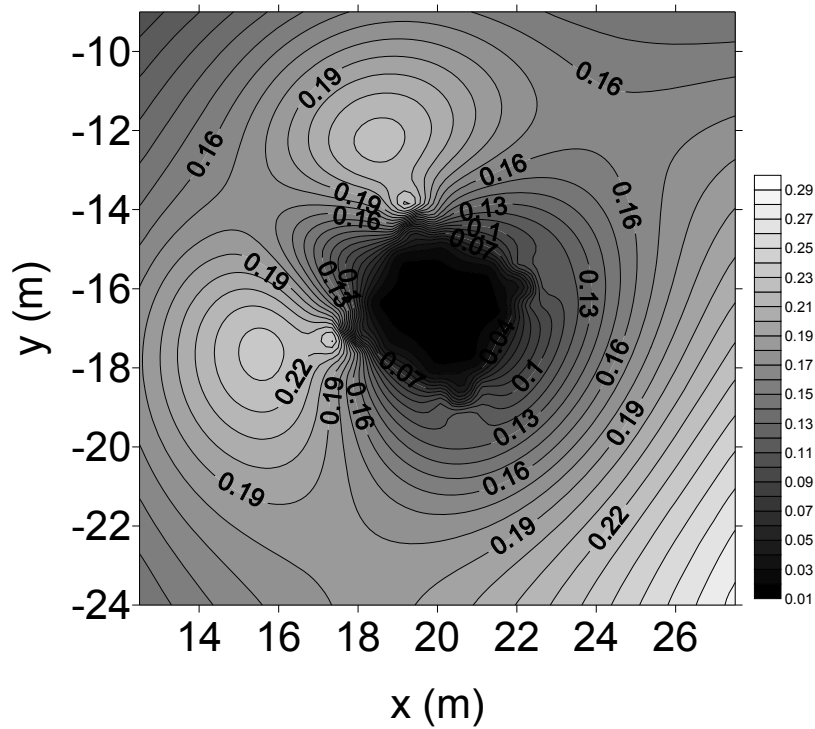
Rys. 5. Rozkład natężenia pola elektrycznego w sąsiedztwie słupa krańcowego 110 kV (na wysokości 2 m nad poziomem terenu), skala kolorów w kV/m



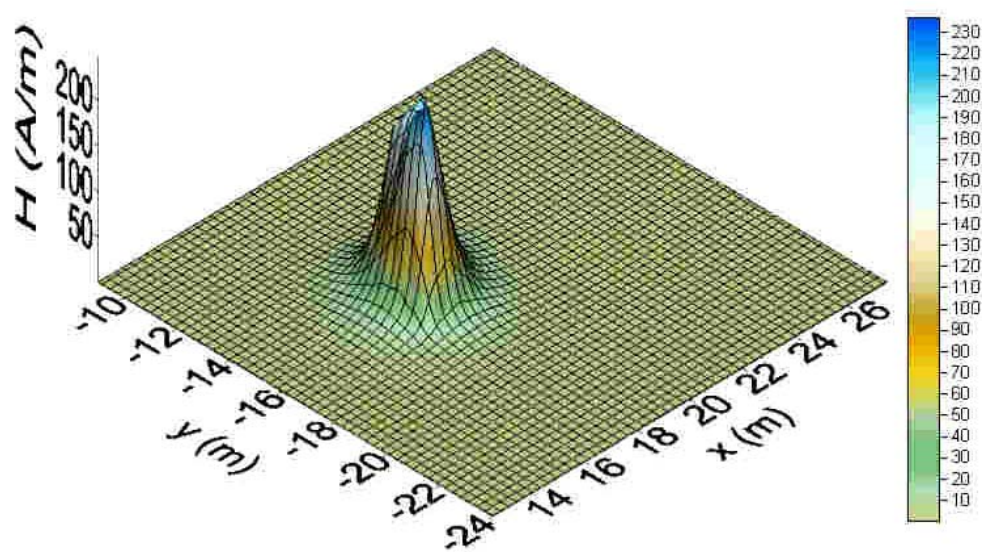
Rys. 6. Linie stałego natężenia pola elektrycznego w sąsiedztwie słupa krańcowego 110 kV (na wysokości 2 m nad poziomem terenu), skala odcieni w kV/m



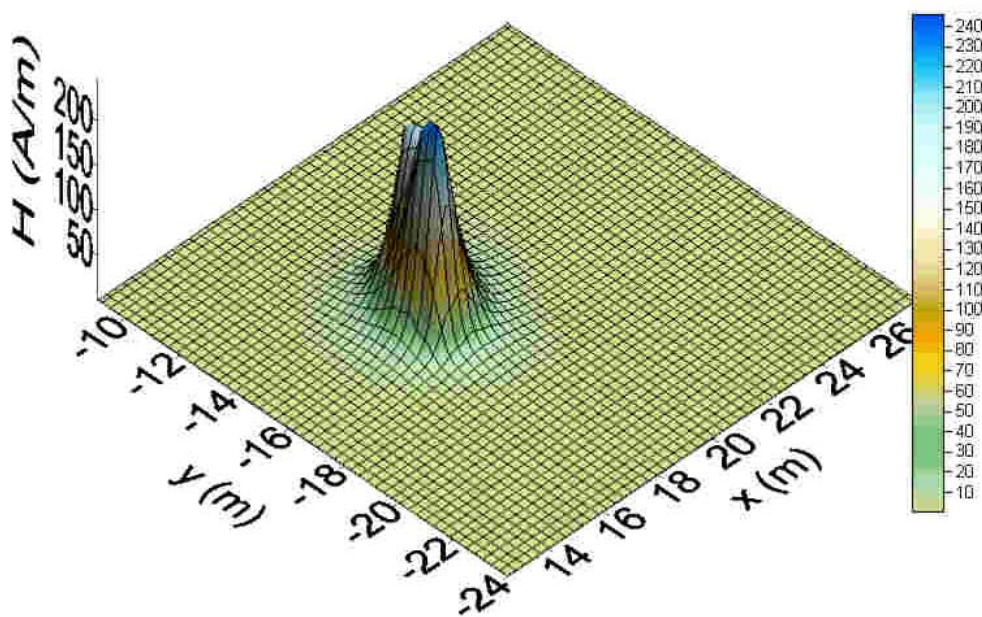
Rys. 7. Rozkład natężenia pola elektrycznego w sąsiedztwie słupa krańcowego 110 kV (na wysokości 1 m nad poziomem terenu), skala kolorów w kV/m



Rys. 8. Linie stałego natężenia pola elektrycznego w sąsiedztwie słupa krańcowego 110 kV (na wysokości 1 m nad poziomem terenu), skala odcieni w kV/m



Rys. 9. Rozkład natężenia pola magnetycznego w sąsiedztwie słupa krańcowego 110 kV (na wysokości 2 m nad poziomem terenu), skala kolorów w kV/m



Rys. 9. Rozkład natężenia pola magnetycznego w sąsiedztwie słupa krańcowego 110 kV (na wysokości 1 m nad poziomem terenu), skala kolorów w kV/m

Jak widać z powyższych wykresów, natężenie pola magnetycznego w bezpośrednim sąsiedztwie słupa wyraźnie przekracza wartość 200 A/m. Z wcześniej przytoczonych przepisów [18] wynika, że natężenie pola magnetycznego o częstotliwości 50 Hz, w środowisku człowieka, w miejscach ogólnie dostęp-

nych dla ludzi, nie powinno przekraczać wartości 60 A/m. Dlatego też można stwierdzić, że okablowanie powyższego słupa, przy pewnych obciążeniach linii, może emitować do środowiska (w miejscach dostępnych dla ludzi) pole magnetyczne o natężeniu przekraczającym 60 A/m. Taką sytuację stwierdzono również na drodze pomiarowej.

Z teorii i praktyki wiadomo, że ekranowanie pola magnetycznego niskiej częstotliwości, w odróżnieniu od ekranowania pola elektrycznego, jest zadaniem trudnym w realizacji. Dla uniknięcia opisanych wyżej przekroczeń obowiązujących regulacji prawnych można stosować środki zaradcze innego rodzaju. Najprostszym z nich, choć nie zawsze możliwym do wykonania, jest ogrodzenie słupa w celu uniemożliwienia ludziom zbliżania się doń na niedozwoloną odległość. Takie rozwiązanie zastosowano w ostatnim czasie w przypadku analizowanego tutaj słupa, co uwidocznione zostało na rysunku 2. Innym sposobem ograniczenia natężenia pola magnetycznego emitowanego przez rozważane słupy jest jak najbliższe prowadzenie przewodów fazowych wzdłuż wysokości słupa w celu lepszej kompensacji pola magnetycznego wytwarzanego przez prądy w poszczególnych przewodach fazowych. Jeszcze innym sposobem ograniczenia emisyjności powyższych słupów jest zwiększenie głębokości obudowy przewodów z prądem w celu ograniczenia możliwości nadmiernego zbliżania się ludzi do tych przewodów.

4. PODSUMOWANIE

W artykule przeprowadzono analizę emisyjności w zakresie pól: elektrycznego i magnetycznego o częstotliwości 50 Hz słupa krańcowego napowietrznej linii 110 kV z przejściem na podziemną linię kablową.

Z przeprowadzonych obliczeń wynika, że okablowanie słupów tego typu może wytwarzać w miejscach dostępnych dla ludzi pole magnetyczne o natężeniu przekraczającym wartość 60 A/m, tj. wartość dopuszczalną przez obowiązujące w Polsce przepisy. Jest to sytuacja odmienna w stosunku do konwencjonalnych linii napowietrznych 110 kV, gdzie natężenia emitowanego pola magnetycznego osiąga wartości znacznie mniejsze od wyżej wspomnianej wartości dopuszczalnej. W artykule zaproponowano proste środki zaradcze, zapewniające spełnienie wymagań określonych we wspomnianych wyżej przepisach. Jednocześnie należy stwierdzić, że numeryczna symulacja pola magnetycznego wytwarzanego przez słupy tego typu powinna być prowadzona już na etapie ich projektowania, w kontekście późniejszej ich lokalizacji.

Natomiast, przeprowadzona w artykule analiza natężenia pola elektrycznego wytwarzanego przez rozważany słup krańcowy nie wykazała przekroczenia

dopuszczalnych wartości określonych w obowiązujących przepisach. Jest to spowodowane dobrymi własnościami ekranującymi konstrukcji słupa w odniesieniu do pola elektrycznego.

LITERATURA

1. Krajewski W.: Boundary element approach to the electric and magnetic field analysis in the vicinity of HV transmission lines. *Archiv für Elektrotechnik*, Nr 6, 1995, s. 365 – 372.
2. Tzinevrakis A.E., Tsanakas D.K., and Mimos E.I.: Analytical calculation of electric field produced by single-circuit power lines. *IEEE Trans. on Power Delivery*, Vol. 23, No 3, 2008, s. 1495 – 1505.
3. Maruti R., Srinivasa K. M., Kanyakumari M., Kumar E. M., Channakeshava D. R.: Electric and magnetic field around AC transmission lines and substations. *Ninth International Symposium on High Voltage Engineering*, Graz, 1995, 8350/1 – 4.
4. Hameyer K., Belmans R.: Computation of the electric and magnetic field below high-voltage lines. *8th Int. Symp. on Theoretical Electrical Engineering*, Thessaloniki Sept. 22–23, 1995, s. 278 – 281.
5. Krajewski W.: BEM analysis of electric field excited by overhead HV lines erected in built-up areas. *IEE Proceedings – Science, Measurement & Technology*, Vol. 144, Nr 2, 1997, s. 81 – 86.
6. Trlep M., Hamler A., Jesenik M., and Stumberger B.: Electric field distribution under transmission lines dependent on ground surface. *IEEE Trans. on Magnetics*, Vol. 45, No 3, 2009, s. 1748 – 1751.
7. Krajewski W.: Trójwymiarowa analiza pola elektrycznego w sąsiedztwie linii wysokiego napięcia. *Przegląd Elektrotechniczny*, Nr 1, 1997, s. 1 – 6.
8. Krajewski W.: 3-D model of the electric field excited by overhead HV lines. *Archiv für Elektrotechnik*, Nr 1, 1998, s. 55 – 63.
9. Krajewski W.: Elementy brzegowe i liniowe w analizie wybranych zagadnień EMC niskiej częstotliwości, *Prace Instytutu Elektrotechniki*, zeszyt 224, 2005 (monografia).
10. Simulation software for calculating fields caused by power lines (EFC-400) and on transformer stations (EFC-400ST). www.narda-sts.de.
11. Krajewski W., Weselucha Z.: Program EMFA_2003 do analizy pól elektrycznych i magnetycznych w sąsiedztwie obiektów elektroenergetycznych. *Elektro-Info*, Nr 6, 2004, s. 75 – 76.
12. Arciszewski J., Komorowska I., Kulikowski J.: Oddziaływanie stacji i linii elektroenergetycznych o napięciu do 110 kV włącznie na środowisko. *Dokumentacja Instytutu Energetyki, Zakład Wysokich Napięć*, 1993.
13. Gochnio W., Mosiński F., Wira A.: Electric and magnetic field maximum values calculation and measurement for center region of Poland. *9th International Symposium on High Voltage Engineering*, Graz, August 1995, s. 8367/1 – 3.
14. Mosiński F., Wira A.: *Ekologiczne problemy przesyłu i użytkowania energii elektrycznej*. Wydawnictwo Politechniki Łódzkiej, Łódź, 1999.
15. Brebbia C. A.: *The Boundary Element Method for Engineers*. Pentech Press, London, 1978
16. Singer H., Steinbigler H., Weiss P.: A charge simulation method for the calculation of high voltage fields. *IEEE Trans. on Power Apparatus and Systems*, Vol. 93, 1973, s. 1660 – 1668.
17. Krajewski W.: Analiza dokładności wybranych technik całkowo-brzegowych w kontekście modelowania zagadnień EMC niskiej częstotliwości. *Prace Instytutu Elektrotechniki z.233*, 2007, s. 43 – 80.

18. Rozporządzenie Ministra Środowiska z dnia 30 października 2003 r. w sprawie dopuszczalnych poziomów pól elektromagnetycznych w środowisku oraz sposobów sprawdzania dotrzymania tych poziomów. Dz. U. 2003, Nr 192, poz. 1883.

Rękopis dostarczono dnia 22.06.2010 r.

Opiniował: prof. dr hab. inż. Krystyn Pawluk

NUMERICAL ANALYSIS OF THE ELECTRIC
AND MAGNETIC FIELDS NEAR A TOWER
OF AN OVERHEAD-UNDERGROUND
TRANSMISSION LINE OF 110 kV

Wojciech KRAJEWSKI

ABSTRACT *The paper deals with a numerical analysis of the electric and magnetic field distribution in the vicinity of terminal towers of overhead-underground transmission lines of 110 kV. Own author's computer program is employed for this purpose. This software is based on a hybrid technique that combines the boundary element and the charge simulation method. Computational results are referred to the appropriate environmental protection regulations.*



Doc. dr hab. inż. Wojciech KRAJEWSKI w 1977 r. ukończył studia na Wydziale Elektrycznym Politechniki Warszawskiej w specjalności budowa maszyn i urządzeń. W roku 1984 na tym samym wydziale obronił z wyróżnieniem pracę doktorską pt.: „Analiza pola elektromagnetycznego i naprężeń w elementach metalowych kształtowanych impulsem magnetycznym”. Stopień doktora habilitowanego uzyskał na podstawie rozprawy pt.: „Elementy brzegowe i liniowe w analizie wybranych zagadnień EMC niskiej częstotliwości” w 2007 r. w Instytucie Elektrotechniki, gdzie pracuje od 1981 r. Zajmuje się zagadnieniami numerycznego modelowania pól elektromagnetycznych w maszynach i urządzeniach elektrycznych, a także problematyką pól w środowisku człowieka i na stanowiskach pracy. W 1991 r. odbył dwumiesięczny staż naukowy w charakterze visiting scholar w Rensselaer Polytechnic Institute w Troy (USA). W tym samym roku powierzono mu organizację i przewodnictwo sesji na temat obliczania pól w elektrotechnice na Światowym Kongresie IMACS'91 (International Association for Mathematics and Computers in Simulation), który odbył się w Dublinie. Bierze udział w pracach International Electrotechnical Commission w charakterze eksperta z zakresu pól elektromagnetycznych (komitet TC 106). Jest stałym recenzentem w następujących czasopismach naukowych z tzw. listy filadelfijskiej: brytyjskim IET Science, Measurement & Technology, amerykańskim Progress in Electromagnetic Research oraz wydawanym przez Elsevier międzynarodowym czasopiśmie ENERGY. Jest autorem i współautorem programów komputerowych wdrożonych w przemyśle i ochronie środowiska. Jest również autorem i współautorem ponad pięćdziesięciu publikacji w krajowych i zagranicznych czasopismach naukowych. Wymieniany jest w amerykańskich i brytyjskich wydawnictwach „Who is Who”. Należy do Stowarzyszenia Elektryków Polskich oraz do brytyjskiego The Institution of Engineering and Technology (dawniej IEE).