

Wojciech KRAJEWSKI

## LOKALIZACJA WYŁADOWAŃ NIEZUPEŁNYCH W STREFACH ROBOCZYCH PRAC POD NAPIĘCIEM NA OBIEKTACH WN

**STRESZCZENIE**      *Zagadnienie ekspozycji elektromonterów wykonujących prace pod napięciem (PPN) na pola elektryczne i magnetyczne o częstotliwości 50 Hz jest w chwili obecnej stosunkowo dobrze rozpoznane. Zupełnie inna sytuacja ma miejsce w odniesieniu do pól elektromagnetycznych o wyższych częstotliwościach (w tym o częstotliwościach radiowych), których źródłami są wyładowania niezupełne na elementach pozostających pod wysokim napięciem. Pomiarów terenowych wskazują, że natężenia tych pól przy powierzchni ciała elektromontera wykonującego PPN metodą „na potencjale” mogą znacznie przekraczać wartości dopuszczalne, określone zarówno przez przepisy krajowe, jak i przez regulacje Unii Europejskiej. Inicjacja wyładowań niezupełnych zależy od natężenia pierwotnego pola elektrycznego o częstotliwości 50 Hz przy powierzchniach elementów pod napięciem, a także od warunków atmosferycznych. W niniejszym artykule przeanalizowano rozkłady wyżej wspomnianego pola pierwotnego w strefie roboczej elektromontera, uwzględniając różne jego ustawienia, w kontekście możliwości powstawania wyładowań niezupełnych. Obliczenia wykonano, stosując własne programy numeryczne wykorzystujące metody całkowo-brzegowe.*

**Słowa kluczowe:** metody całkowo-brzegowe, pole elektromagnetyczne, prace pod napięciem, wyładowania niezupełne

### 1. WSTĘP

---

Prace pod napięciem (PPN) [1–5], tzn. prace remontowe, konserwacyjne, przyłączeniowe czy przełączeniowe wykonywane bez wyłączenia urządzeń

---

**dr hab. inż. Wojciech KRAJEWSKI, prof. IEL**  
e-mail: w.krajewski@iel.waw.pl

Zakład Systemów Pomiarowo-Diagnostycznych,  
Instytut Elektrotechniki

PRACE INSTYTUTU ELEKTROTECHNIKI, zeszyt 260, 2012

elektroenergetycznych z ruchu, wprowadzane są na coraz szerszą skalę przez elektroenergetykę krajową, zarówno na obiektach niskiego i średniego napięcia, jak i na tych o najwyższych napięciach znamionowych. Mimo szeregu niewątpliwych zalet, wykonywanie PPN obarczone jest także pewnymi niedogodnościami. Jedną z nich jest duże uzależnienie od warunków atmosferycznych. Innym poważnym problemem związanym z wykonywaniem PPN jest ekspozycja elektromonterów na oddziaływanie pól elektromagnetycznych o znacznych natężeniach [6–11].

Obserwowany w Polsce i na świecie, ciągły wzrost zainteresowania wpływem pól elektromagnetycznych na organizmy żywe, a szczególnie na organizm człowieka oraz wprowadzanie w tej dziedzinie coraz precyzyjniejszych zaleceń [12, 13] i regulacji prawnych [14, 15], pociągają za sobą konieczność wnikliwego badania warunków elektromagnetycznych w jakich przebywają elektromonterzy wykonujący PPN.

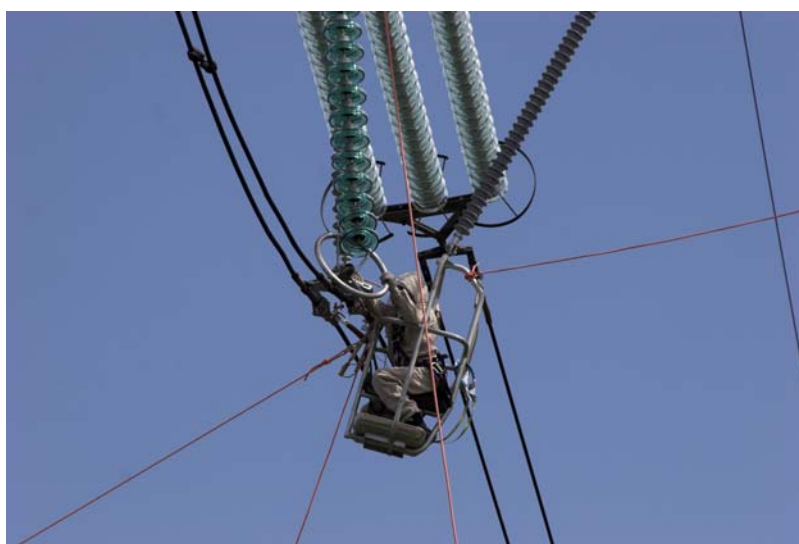
Problematyka ekspozycji pracowników wykonujących PPN na pola elektryczne i magnetyczne o częstotliwości 50 Hz jest w chwili obecnej stosunkowo dobrze rozpoznana [6–11], zarówno w zakresie istniejących wyników obliczeń teoretycznych, jak i bogatego materiału pomiarowego. Zupełnie inna sytuacja ma miejsce w odniesieniu do pól elektromagnetycznych o wyższych częstotliwościach, a w szczególności o częstotliwościach radiowych, których źródłami są wyładowania niezupełne [16–25] powstające na elementach przewodzących o wysokim potencjale, znajdujących się w strefach roboczych PPN bądź w ich bezpośrednim sąsiedztwie. Nieliczne pomiary terenowe [26] wskazują, że natężenia tych pól przy powierzchni ciała elektromontera wykonującego PPN metodą „na potencjale” (rys. 1, 2) mogą znacznie przekraczać wartości dopuszczalne, określone zarówno obowiązującymi obecnie przepisami krajowymi [14], jak i regulacjami Unii Europejskiej [15], które to regulacje w niedalekiej przyszłości będą wprowadzane do prawodawstwa krajów członkowskich.

PPN techniką „na potencjale” stosowane są na obiektach elektroenergetycznych o najwyższych napięciach znamionowych. Pracownicy wykonujący PPN powyższą metodą ubrani są w specjalne elektroprzewodzące (ekwipotencjalne) kombinezony (rys. 1 i 2), które podłączone są do znajdujących się w strefie roboczej elementów pod napięciem. Kombinezony te, działające jak klatka Faraday’a, skutecznie chronią elektromontera przed oddziaływaniem pierwotnego pola elektrycznego o częstotliwości 50 Hz. Jednak to pierwotne pole elektryczne, jak już wcześniej wspomniano, może inicjować wyładowania niezupełne, które z kolei są źródłami pól elektromagnetycznych o wyższych częstotliwościach. Te ostatnie pola przenikają przez wspomniany elektroprzewodzący kombinezon i wnikają w głąb organizmu pracownika, co może powodować niekorzystne skutki zdrowotne.

Powstawanie wyładowań niezupełnych, zależy od wartości natężenia pierwotnego pola elektrycznego o częstotliwości 50 Hz przy powierzchniach elementów pod napięciem, a także od warunków atmosferycznych. Przyjmuje się, że w tzw.

normalnych warunkach atmosferycznych, progowe natężenie pola elektrycznego, przy którym inicjowane są wyładowania niezupełne wynosi 2000 kV/m (20 kV/cm).

Celem niniejszej pracy jest próba zlokalizowania wyładowań niezupełnych w strefach roboczych elektryków wykonujących PPN metodą „na potencjale” oraz sformułowanie środków zaradczych zmierzających do ich eliminacji lub istotnego ograniczenia.



**Rys. 1. Wymiana izolatorów na liniach WN o najwyższych napięciach znamionowych metodą „na potencjale”** ([www.powerlinetraining.net](http://www.powerlinetraining.net) – góra, pokazy PPN podczas ICOLIM'2008 – dół)



**Rys. 2. PPN metodą „na potencjale” prowadzone z izolowanych platform umieszczonych na podnośnikach; [www.livelinesolutions.com](http://www.livelinesolutions.com) – góra, [www.bchydro.com](http://www.bchydro.com) (fot. Cara Grimshaw) – dół**

## 2. MODEL PIERWOTNEGO POLA ELEKTRYCZNEGO ORAZ ZARYS METODY NUMERYCZNEJ

Rozkłady pola elektrycznego o częstotliwości 50 Hz w strefie roboczej elektromontera wykonującego PPN metodą „na potencjale” obliczono stosując metodę hybrydową łączącą metodę elementów brzegowych (MEB) z pewnym wariantem metody ładunków symulowanych (MŁS), zwanym tutaj metodą elementów liniowych (MEL). I tak, elementy, których jeden z wymiarów jest znacznie większy od dwóch pozostałych, takie jak kątowniki kratownic słupów, przewody fazowe i odgromowe, odwzorowano stosując MEL. Z kolei sylwetkę elektromontera oraz izolatory i przewody pod napięciem znajdujące się w strefie roboczej PPN zamodelowano stosując MEB. Powyższa metoda hybrydowa, wykorzystywana wcześniej przez autora do analizy pola elektrycznego w sąsiedztwie różnego rodzaju obiektów elektroenergetycznych, została szczegółowo opisana we wcześniejszych jego publikacjach, np. [9, 27, 28], uściślona w artykule [29] oraz kompleksowo przetestowana w pracy [30]. Tutaj podano jedynie wyjściowe równania całkowo-brzegowe, stanowiące jej podstawę.

Dla punktów obserwacji  $P_i$  położonych na powierzchniach obiektów dobrze przewodzących (przewody, kratownice, kombinezon elektromontera), na których znany jest potencjał elektryczny (warunek brzegowy Dirichleta) można sformułować następujące równanie Fredholma pierwszego rodzaju:

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

gdzie:

- $\Gamma_{Cj}$  – powierzchnia  $j$ -tego obiektu przewodzącego modelowanego z zastosowaniem MEB,
- $\Gamma_{Dj}$  – powierzchnia  $j$ -tego izolatora modelowanego z zastosowaniem MEB,
- $\Gamma_{Kj}$  – powierzchnia  $j$ -tego elementu przewodzącego modelowanego z zastosowaniem MEL,
- $K_j$  – krzywa reprezentująca  $j$ -ty element przewodzący modelowany z zastosowaniem MEL,
- $\sigma$  – gęstość ładunku powierzchniowego,
- $\tau$  – gęstość ładunku liniowego,
- $\varphi(P_i)$  – potencjał elektryczny w punkcie  $P_i$ ,

- $n_1, n_3$  – liczby obiektów modelowanych odpowiednio elementami brzegowymi i liniowymi, na których powierzchniach znany jest potencjał elektryczny,  
 $n_2$  – liczba obiektów modelowanych z zastosowaniem MEB, na których nie jest znany potencjał elektryczny (izolatory).

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

$$G(P, P_i) = \frac{1}{4\pi\epsilon_0} \left( \frac{1}{r_1} - \frac{1}{r_2} \right) \quad (2)$$

przy czym:

$$r_{1,2} = \sqrt{(x - x_i)^2 + (y - y_i)^2 + (z \mp z_i)^2} \quad (3)$$

Z kolei dla punktów obserwacji,  $P_i$ , położonych na powierzchniach obiektów nieprzewodzących (izolatory), na których nie jest znany potencjał elektryczny obowiązuje następujące równanie Fredholma drugiego rodzaju:

$$\begin{aligned} \frac{1}{2\epsilon_0} \frac{\epsilon_{D_i} + \epsilon_0}{\epsilon_{D_i} - \epsilon_0} \sigma(P_i) + \sum_{j=1}^{n_1} \int_{\Gamma_{C_j}} \frac{\partial G(P, P_i)}{\partial n_i} \sigma(P) dP + \sum_{j=1}^{n_2} \int_{\Gamma_{D_j}} \frac{\partial G(P, P_i)}{\partial n_i} \sigma(P) dP + \\ + \sum_{j=1}^{n_3} \int_{K_j} \frac{\partial G(P, P_i)}{\partial n_i} \tau(P) dP = 0 \quad \text{dla } P_i \in \bigcup_{j=1}^{n_1} \Gamma_{D_j} \end{aligned} \quad (4)$$

gdzie  $\epsilon_0$  jest stałą elektryczną a  $\epsilon_{D_i}$  oznacza przenikalność elektryczną  $i$ -tego dielektryka.

Po numerycznym rozwiązaniu układu równań (1) i (4), względem  $\sigma$  i  $\tau$ , natężenie pola elektrycznego w dowolnym punkcie przestrzeni powietrznej oblicza się ze wzoru:

$$\mathbf{E}(P_i) = - \sum_{j=1}^{n_S} \int_{S_j} \text{grad}_i G(P, P_i) \sigma(P) dP - \sum_{j=1}^{n_L} \int_{L_j} \text{grad}_i G(P, P_i) \sigma(P) dP \quad (5)$$

gdzie:

- $S_j$  –  $j$ -ty elementu brzegowy,  
 $L_j$  –  $j$ -ty element liniowy,  
 $n_S$  – liczba elementów brzegowych,  
 $n_L$  – liczba elementów liniowych.

Przedstawiona metoda numeryczna zaimplementowana została w autorskim programie BEMsolver 3D przeznaczonym do obliczania pól elektrycznych, magnetycznych i elektromagnetycznych niskiej częstotliwości.

### 3. ANALIZA PIERWOTNEGO POLA ELEKTRYCZNEGO W STREFIE ROBOCZEJ PPN METODĄ „NA POTENCJALE”

---

W niniejszym punkcie przeanalizowano rozkłady pola elektrycznego o częstotliwości 50 Hz w strefie roboczej elektromontera przeprowadzającego wymianę środkowego izolatora słupa przelotowego linii 220 kV, tak jak to pokazano na rysunku 3. W artykule [26] przedstawiono, wyniki pomiarów pól (o częstotliwościach z zakresu: 1 – 100 kHz oraz 0,1 – 300 MHz) przy powierzchni ciała elektromontera, wykonującego tego rodzaju operację na podobnym słupie linii WN. Jak widać na rysunku 3b, elektromonter pracujący „na potencjale”, przyjmuje pozycję pochyloną i praktycznie dotyka piersią przewodu fazowego. W rozważanym przypadku poszczególne fazy składają się z pojedynczych przewodów o przekroju 525 mm<sup>2</sup>. Nie zastosowano tutaj wiązek wieloprzewodowych, mających za zadanie ograniczać zjawisko ulotu. Stosowanie takich wiązek jest w zasadzie regułą w przypadku linii o napięciu 400 kV i wyższych. Przewody fazowe zawieszono na słupie na wysokości 32 m.

Analizę przeprowadzono pod kątem możliwości występowania wyładowań niezupełnych w bezpośrednim sąsiedztwie elektromontera oraz na jego kombinezonie. Uwzględniono różne ustawienia pracownika, podczas wykonywania rozważanej operacji. Model numeryczny słupa WN wraz z elektromonterem pokazano na rysunku 4. Wykorzystano tutaj uproszczony osiowo-symetryczny model sylwetki człowieka, opisany w wielu publikacjach, między innymi w [30 i 31].

Na wstępie przeanalizowano rozkłady pola elektrycznego w strefie roboczej PPN w sąsiedztwie środkowego izolatora, bez uwzględnienia obecności elektromontera. Wykonano obliczenia, zarówno z pominięciem, jak i z uwzględnieniem wpływu kratownicy słupa. Wyniki obliczeń przedstawiono na rysunku 5. Jak widać natężenie pola elektrycznego przy powierzchni przewodu roboczego, w przypadku uwzględnienia kratownicy słupa, wyraźnie przekracza 2000 kV/m (20 kV/cm), co skutkuje powstawaniem wyładowań niezupełnych (ulotu) na powierzchni przewodu. Jest to zgodne z sytuacją występującą w praktyce,

gdzie zwykle na przewodach roboczych, właśnie w sąsiedztwie izolatorów i kratownicy słupa obserwowany jest ulot.

W dalszych obliczeniach uwzględniono obecność elektromontera, którego metalizowany kombinezon podłączony jest do przewodu fazowego. Jego obecność w strefie roboczej PPN istotnie wpływa na rozkłady pierwotnego pola elektrycznego. W pierwszej kolejności wyznaczono rozkłady pola wokół pracownika usytuowanego na drabince izolacyjnej w pozycji wyprostowanej, na różnych wysokościach ponad poziomem terenu, a mianowicie: 31,1 m, 31,6 m i 32,1 m. Jego odległość od środkowego przewodu fazowego wynosiła 0,2 m. Wyniki obliczeń pokazano na rysunkach 6, 7 i 8. Jak widać, w żadnym z analizowanych przypadków natężenie pola elektrycznego, zarówno na powierzchni kombinezonu, jak i przy powierzchni przewodu, nie osiąga 2000 kV/m, przekraczając jedynie nieznacznie 1200 kV/m (na powierzchni przewodu fazowego). Jest to wartość znacznie mniejsza niż w analizowanym wcześniej przypadku nieuwzględniającym obecności elektromontera. Można to wyjaśnić faktem, że optywowy model człowieka charakteryzuje się krzywiznami o znacznie większych promieniach niż przewód roboczy. Jak wiadomo natężenie pola elektrycznego w sąsiedztwie elektrody jest tym większe im mniejszy jest jej promień krzywizny. Jednocześnie obecność człowieka powoduje zmniejszenie natężenia pola elektrycznego na powierzchni przewodu, tak jak ma to miejsce w przypadku stosowania wiązek wieloprzewodowych w miejsce przewodów pojedynczych w celu ograniczenia ulotu. Jednocześnie we wszystkich trzech analizowanych przypadkach największe wartości natężenia pola elektrycznego obserwuje się w okolicy głowy, przy czym rosną ono w miarę przesuwania się człowieka do góry. Jest to w pełni zrozumiałe, gdyż pozostająca pod napięciem głowa znajduje się najbliżej elementów kratownicy słupa (o potencjale zerowym).

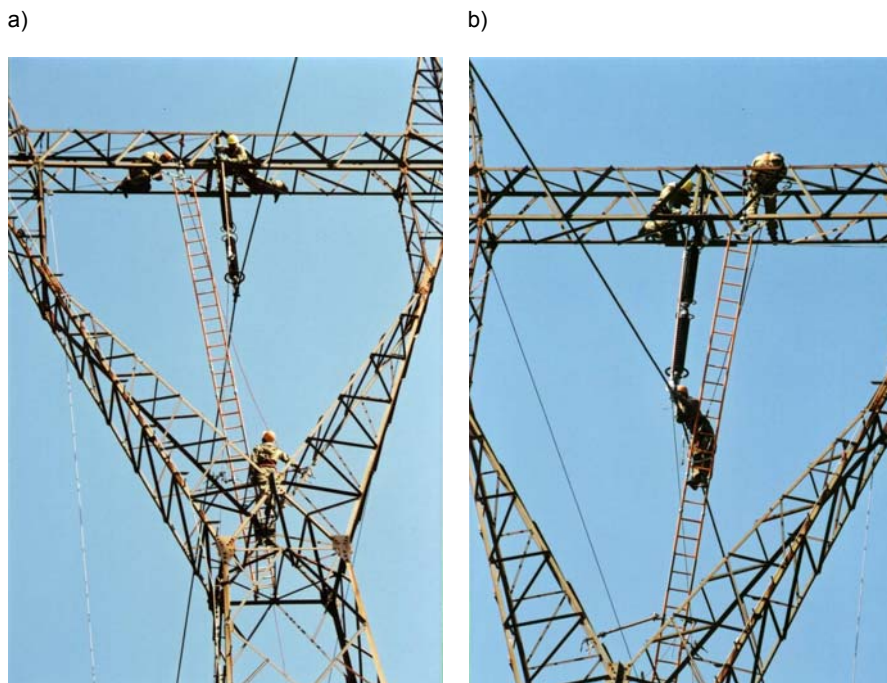
Dla pełniejszego zobrazowania zagadnienia, w następnym przykładzie rozważono elektromontera w pozycji pochylonej, tak jak to pokazano na dolnej części rysunku 4. Wyznaczono rozkłady pola w strefie roboczej PPN, dla dwóch ustawień pracownika, a mianowicie gdy odległość głowy od przewodu fazowego wynosi: 0,15 m oraz 0,35 m. Wyniki obliczeń przedstawiono na rysunkach: 9 i 10. Także w tym przypadku natężenie pierwotnego pola elektrycznego, zarówno na kombinezonie, jak i na powierzchni przewodu fazowego nie osiąga progowej wartości, przy której następuje inicjacja wyładowań niezupełnych.

Warto tutaj wspomnieć, że źródłem zaobserwowanych pól (o częstotliwościach z zakresu 1 kHz – 300 MHz) przy powierzchni ciała elektromontera nie jest zjawisko ulotu wokół przewodu fazowego lecz są nim prawdopodobnie wyładowania niezupełne na kombinezonie elektromontera. Pola te bowiem, jak zauważono w [26], obserwuje się dopiero po elektrycznym połączeniu kombinezonu elektromontera z przewodem fazowym.

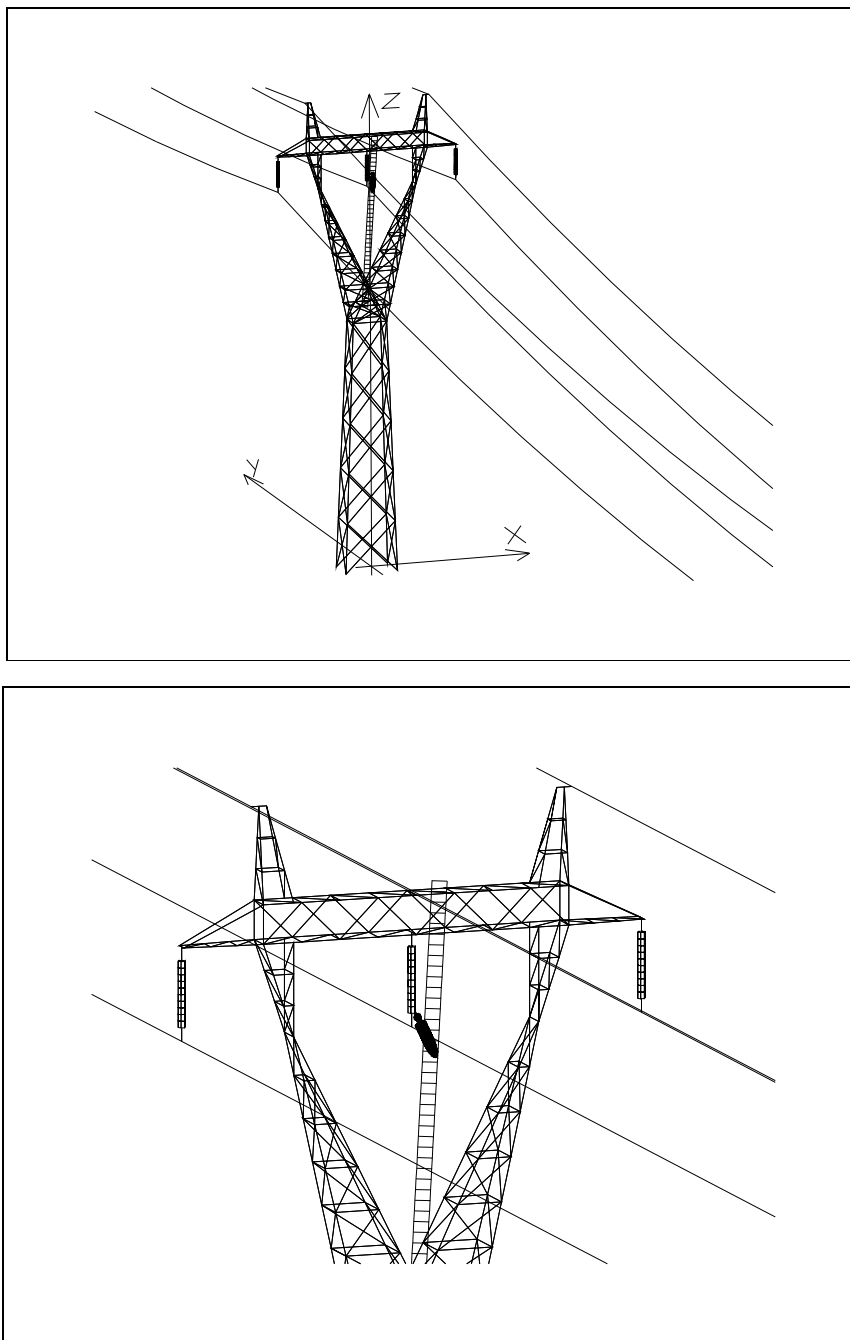


Powyższą sytuację można wyjaśnić faktem, że na rzeczywistym kombinezonie natężenie pierwotnego pola elektrycznego może osiągać lokalnie znacznie większe wartości niż to wynika z przedstawionych wyżej obliczeń wykonanych dla opływowego modelu ciała człowieka. Najprawdopodobniej, powodem tego są różnego rodzaju załamania i fałdy na ubiorze ochronnym, które można zaobserwować na rysunkach 1 – 3, a powodujące, zgodnie z zasadą ostrza, koncentrację pola elektrycznego w swoim sąsiedztwie.

Dlatego też na zakończenie przedstawiono wyniki obliczeń pierwotnego pola elektrycznego wokół opływowego modelu elektromontera z wprowadzonym w obszarze głowy zniekształceniem o kształcie stożka. Rozważono dwa przypadki deformacji, mianowicie o wysokości 3,5 cm oraz 5 cm, obie o promieniu podstawy 0,5 cm. Wyniki obliczeń pokazano na rysunku 10. Jak widać w drugim z analizowanych przypadków natężenie pola elektrycznego przekracza 2000 kV/m. Potwierdza to hipotezę o możliwości powstawania wylądowań niezupełnych na kombinezonie o nieregularnym kształcie.

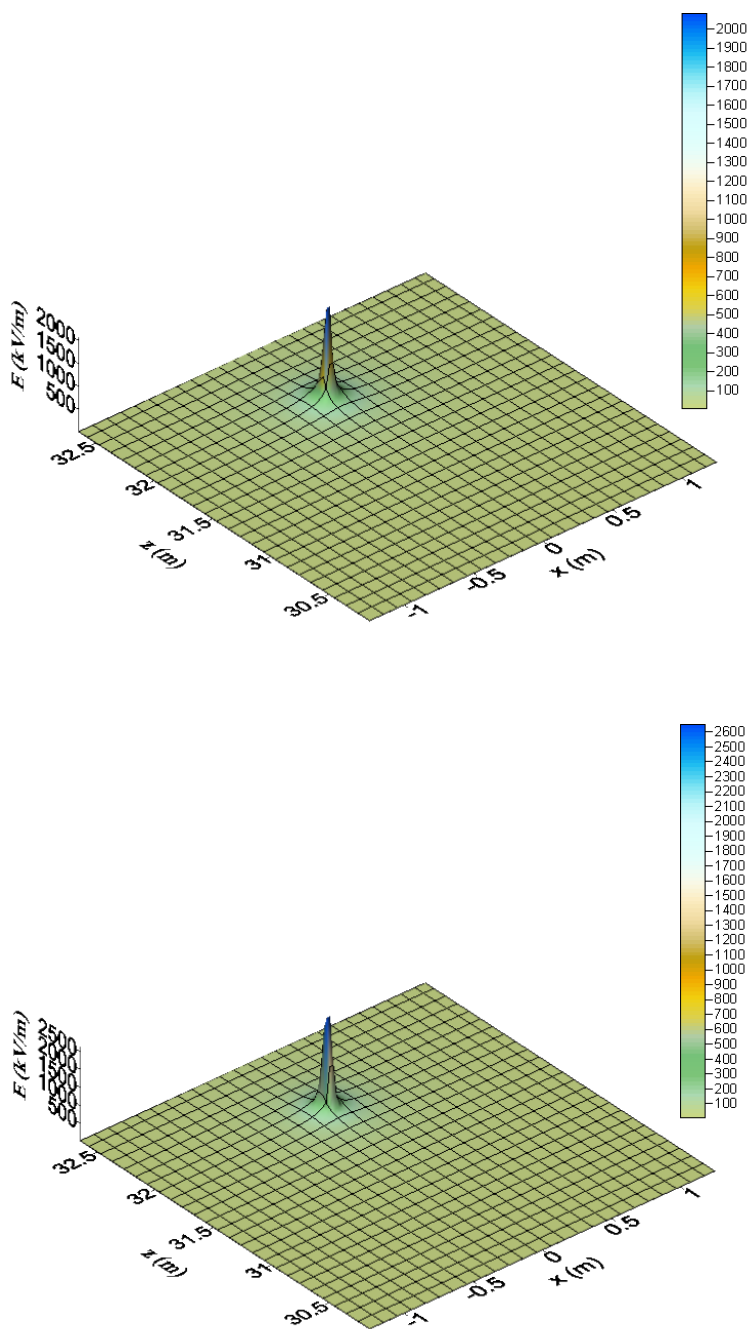


**Rys. 3.** Wymiana izolatora na słupie przelotowym linii 220 kV; elektromonter na drabinie izolacyjnej wykonuje pracę metodą „na potencjale” natomiast pracownicy na poprzeczniku wykonują prace pomocnicze metodą „z odległości”; (fot. [www.ppn.pl](http://www.ppn.pl))

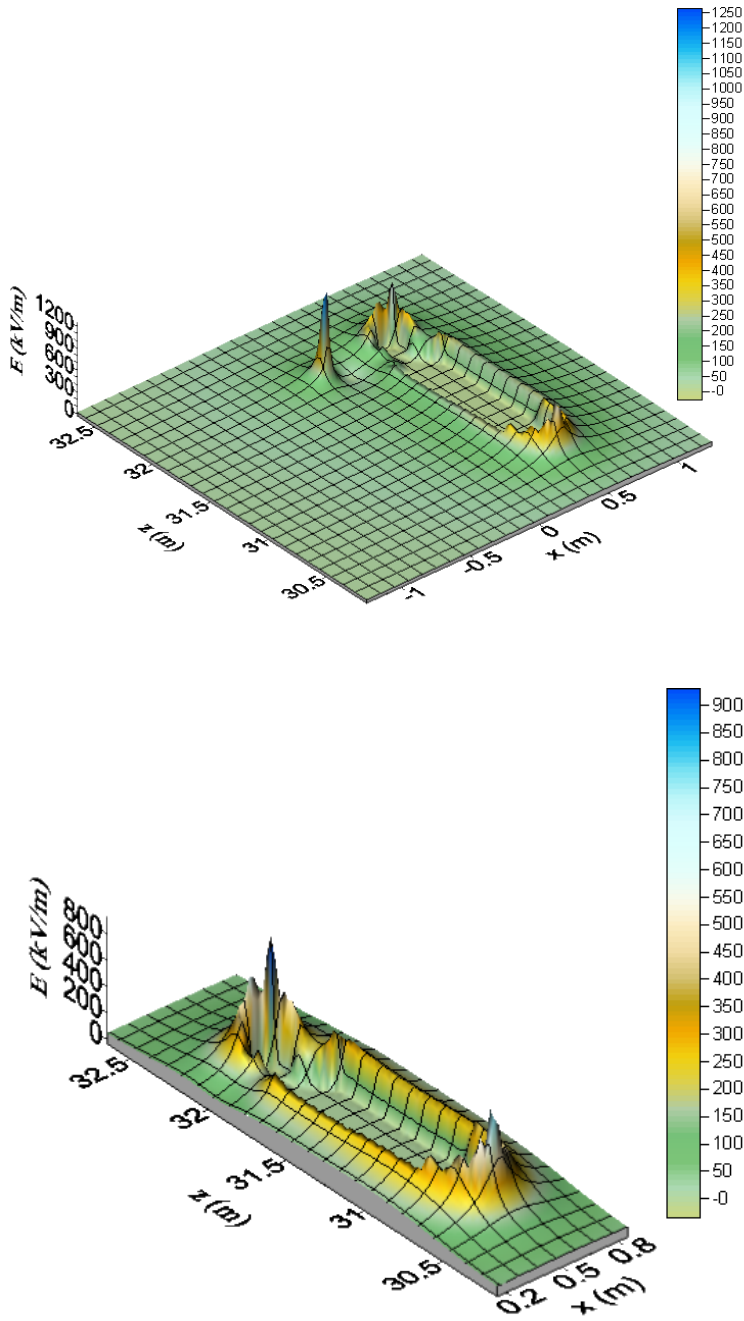


**Rys. 4. Model słupa przelotowego linii 220 kV z elektromonterem na drabinie izolacyjnej wykonującym pracę metodą „na potencjale”**

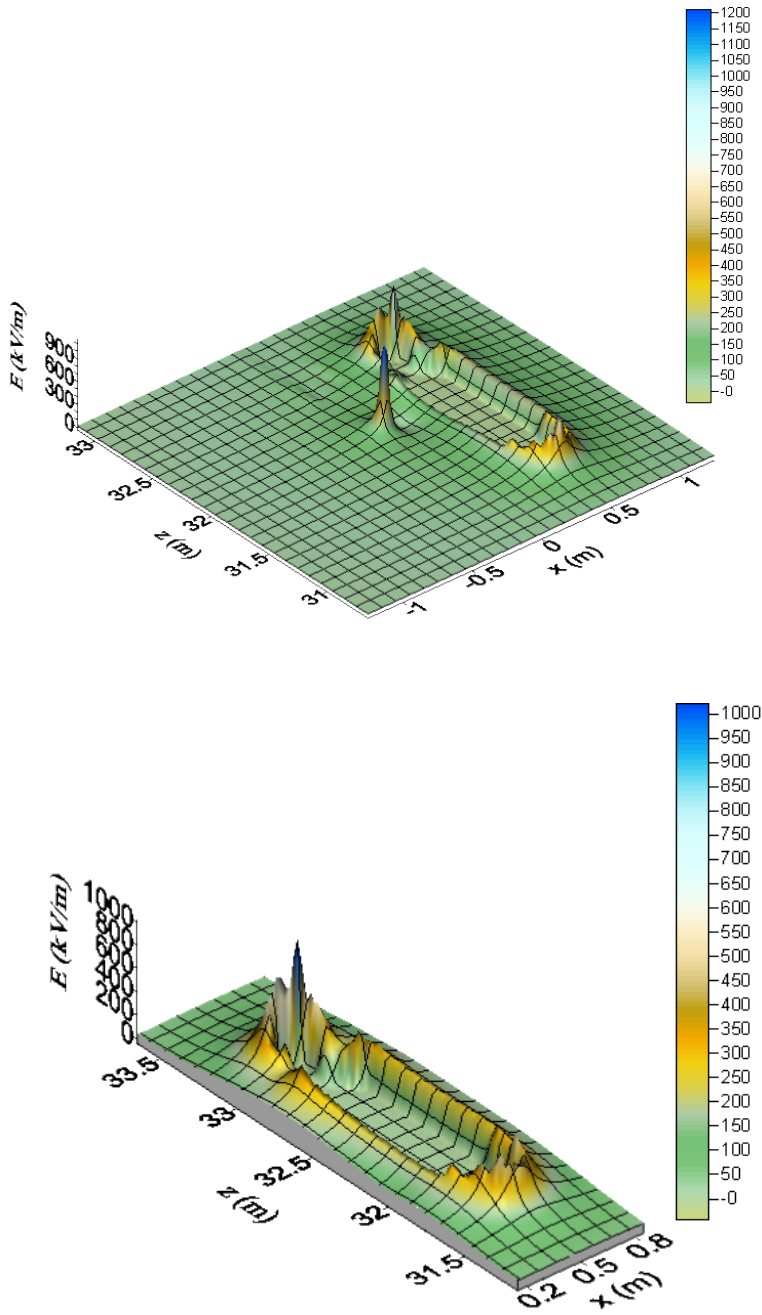
Elektromonter w pozycji wyprostowanej – góra oraz w pozycji pochylonej – dół



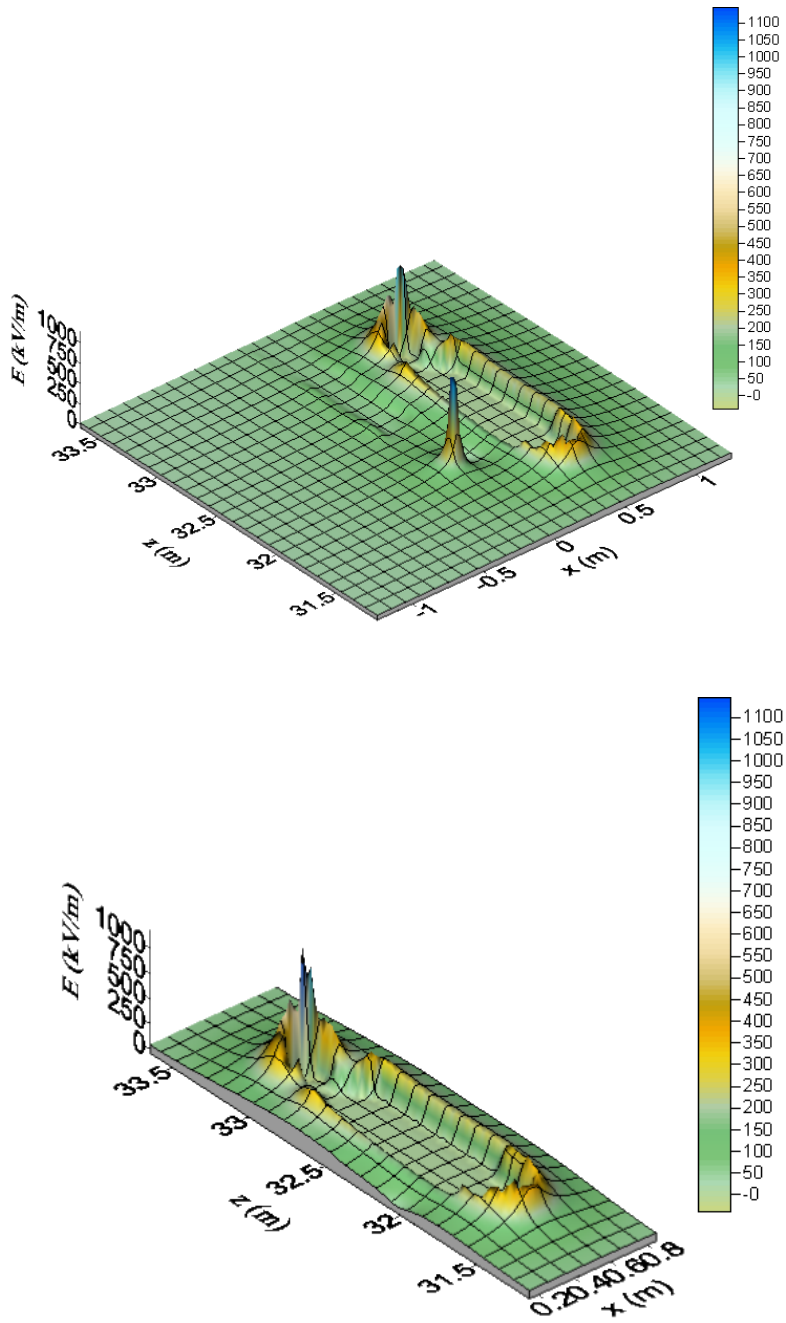
Rys. 5. Rozkład pola elektrycznego w otoczeniu środkowego przewodu linii 220 kV (pod nieobecność elektromontera) z uwzględnieniem (dół) i bez uwzględnienia (góra) kratownicy słupa



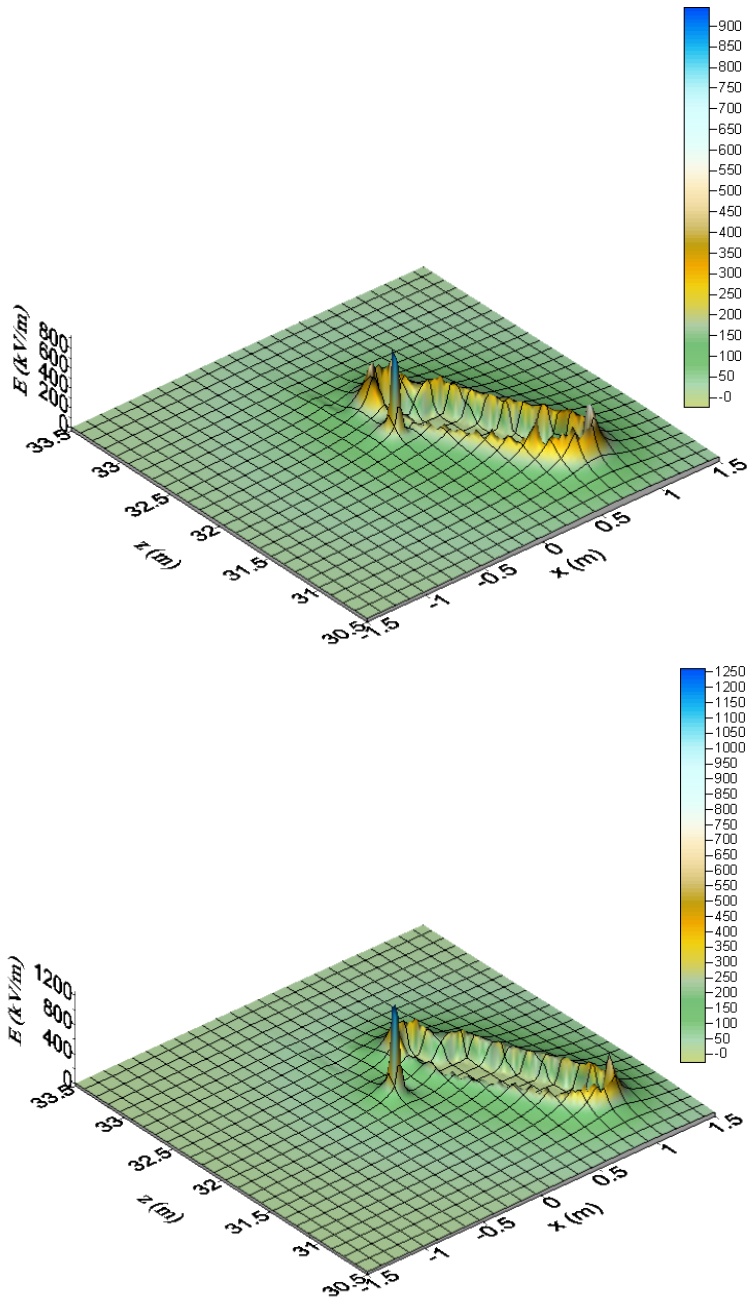
Rys. 6. Rozkład pola elektrycznego w strefie roboczej PPN metodą „na potencjale” (górze) oraz bezpośrednio przy powierzchni ciała elektrycznego (dół); elektrycznik ustawiony jest w pozycji wyprostowanej na wysokości 30,6 m ponad powierzchnią terenu



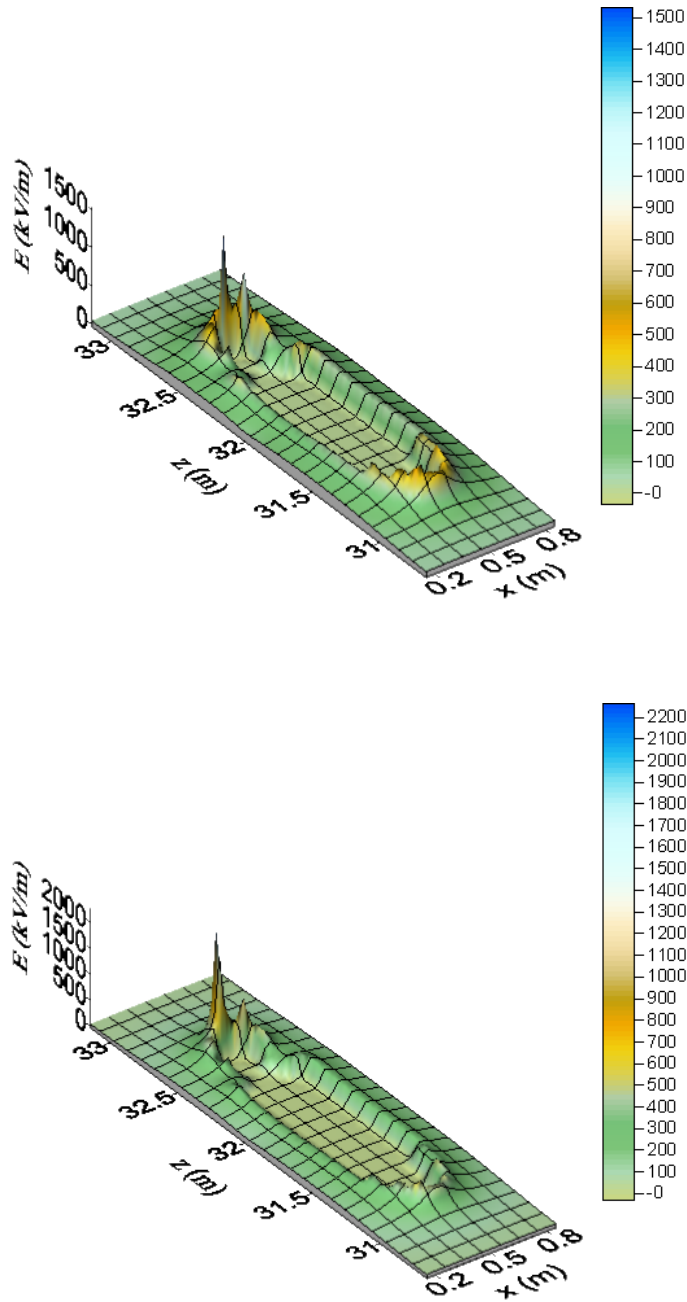
Rys. 7. Rozkład pola elektrycznego w strefie roboczej PPN metodą „na potencjale” (górze) oraz bezpośrednio przy powierzchni ciała elektromontera (dół); elektromonter ustawiony jest w pozycji wyprostowanej na wysokości 31,1 m ponad powierzchnią terenu



Rys. 8. Rozkład pola elektrycznego w strefie roboczej PPN metodą „na potencjale” (góra) oraz bezpośrednio przy powierzchni ciała elektromietera (dół); elektromieter ustawiony jest w pozycji wyprostowanej na wysokości 31,6 m ponad powierzchnią terenu



Rys. 9. Rozkład pola elektrycznego w strefie roboczej PPN metodą „na potencjale” (górze) oraz bezpośrednio przy powierzchni ciała elektrymonera (dół); elektrymoner ustawiony jest w pozycji pochylonej na wysokości 31 m ponad powierzchnią terenu; odległość głowy od przewodu: 0,15 m (górze) i 0,35 m (dół)



Rys. 10. Rozkład pola elektrycznego w otoczeniu modelu elektro-montera z wprowadzonym zniekształceniem w obszarze głowy, o wysokości 3 cm (górze) i 5 cm (dół)



## 4. PODSUMOWANIE

---

W artykule przeprowadzono próbę lokalizacji wylądowań niezupełnych w strefach roboczych elektromonterów wykonujących PPN metodą „na potencjale”, które to wylądowania mogą być źródłami ponadnormatywnych pól elektromagnetycznych o częstotliwościach z zakresu: 1 kHz – 300 MHz. Stwierdzono, że w przypadku opływowego kształtu modelu człowieka natężenie pierwotnego pola elektrycznego, w analizowanym obszarze, przyjmuje wartości znacznie niższe od wartości progowej, przy której następuje inicjacja wylądowań niezupełnych. Niewielkie zniekształcenie modelu człowieka powoduje jednak wzrost natężenia pola pierwotnego ponad wyżej wspomnianą wartość progową, wynoszącą 2000 kV/m. Dlatego też w celu ograniczenia ekspozycji elektromonterów (wykonujących PPN metodą „na potencjale”) na wyżej wspomniane pola elektromagnetyczne należy stosować kombinezony o możliwie opływowych kształtach, a także unikać stosowania metalowych narzędzi o ostrych krawędziach. Może to być jednak trudne do osiągnięcia ze względów czysto technicznych i ergonomicznych.

Dalsze badanie obliczeniowe ekspozycji pracowników (wykonujących PPN) na pola elektromagnetyczne generowane przez wylądowania niezupełne wymagałoby, w pierwszej kolejności, opracowania bardziej realistycznych geometrycznie modeli ubranych w kombinezony elektromonterów. Kolejnymi krokami byłoby wyznaczenia prądów wylądowań niezupełnych powstających na wspomnianych kombinezonach oraz obliczenie generowanych przez te prądy pól elektromagnetycznych. Tak postawionemu zadaniu sprzyja obserwowany w ostatnim czasie systematyczny postęp w dziedzinie numerycznego modelowania wylądowań niezupełnych [16–25].

## LITERATURA

1. Michniewski R.: Aspekty techniczne i ekonomiczne prowadzenia prac pod napięciem w ZE Toruń S.A. Energetyka, październik – listopad 2002, s. 752-760.
2. Płuciennik S.: Rozwój prac pod napięciem w Polsce. VIII Konferencja: „Prace pod napięciem w sieciach nn, SN i WN w Polsce i na świecie, Kraków, 2004, s. 7-13.
3. Dudek B. i Frymer K.: Wymiana aparatury pod napięciem w stacjach przesyłowych. XI Sympozjum Problemy Eksploatacji Układów Izolacyjnych Wysokiego Napięcia, Krynica, 25-28 września 2007, Przegląd Elektrotechniczny – Konferencje, R. 5, Nr 3, 2007, s. 70-73.
4. Michniewski R.: Prace pod napięciem realizowane przez ENERGA-OPERATOR S.A. Oddział w Toruniu na sieci przesyłowej 400 kV, 220 kV i 110 kV – uzyskane efekty ekonomiczne i związane z ochroną środowiska. International Conference on Live Maintenance, ICOLIM'2008, Toruń, 4 – 6 June, 2008.

5. Gela G., Verdecchio T., Carroll E.: "Advances in helicopter-based live works", ICOLIM'2008, Toruń, 4 – 6 June, 2008.
6. Krajewski W.: Analiza pól: elektrycznego i magnetycznego w otoczeniu elektromontera wykonującego prace pod napięciem. Przegląd Elektrotechniczny, Nr 9, 2007, s. 57-59.
7. Krajewski W.: Generator siatek MEB i MEL do analizy zagrożeń elektromagnetycznych w warunkach wykonywania prac pod napięciem w energetyce. Prace Instytutu Elektrotechniki, zeszyt 236, 2008, s. 5-30.
8. Krajewski W.: BEM evaluation of eddy currents induced in a live-line worker body. 9<sup>th</sup> International Conference on Live Maintenance, ICOLIM'2008, Toruń, 4 – 6 June, 2008.
9. Krajewski W.: Numerical assessment of electromagnetic exposure during live-line works on HV objects. IET – Science, Measurement & Technology, Vol. 3, No. 1, 2009, s. 27 – 38.
10. Nadolny, Z., Rakowska, A.: Metoda redukcji natężenia pola elektrycznego w czasie wykonywania prac pod napięciem na linii wysokiego napięcia 110 kV, Przegląd Elektrotechniczny, R. 82, Nr 12, 2006, s. 89 – 92.
11. Nadolny Z., Rakowska A.: Analiza pola elektrycznego w trakcie wymiany izolatorów na pracującej linii 220 kV w aspekcie zagrożenia człowieka. Przegląd Elektrotechniczny, R. 86, Nr 5, 2010, s. 200 – 203.
12. International Commission on Non-Ionizing Radiation Protection (ICNIRP), "Guidelines for limiting exposure to time-varying electric, magnetic, and electromagnetic fields (up to 300 GHz)," Health Physics, Vol. 74, No. 4, 1998, s. 494 – 522.
13. International Commission on Non-Ionizing Radiation Protection (ICNIRP), "Guidelines for limiting exposure to time-varying electric and magnetic fields (1 Hz to 100 kHz)," Health Physics, Vol. 99, No. 6, 2010, s. 818 – 836.
14. Rozporządzenie Ministra Pracy i Polityki Społecznej z dnia 29 listopada 2002 r. w sprawie najwyższych dopuszczalnych natężeń czynników szkodliwych dla zdrowia w środowisku pracy. Dz. U. 2002, Nr 217, poz. 1833.
15. Directive 2004/40/EC of the European Parliament and of the Council of 29 April 2004 on the minimum health and safety requirements regarding the exposure of workers to the risk arising from physical agents (electromagnetic fields) (18<sup>th</sup> individual Directive within the meaning of Article 16 (1) of Directive 89/391/EEC), Official Journal of the European Union, Nr L-184, 2004, s. 1 – 9.
16. Gutfleisch, F. and L. Niemeyer: "Measurement and simulation of pd in epoxy voids", IEEE Transactions on Dielectrics and Electrical Insulation, Vol. 2, No. 5, 1995, pp.729 – 743.
17. L. Niemeyer, "A generalized approach to partial discharge modelling", IEEE Transactions on Dielectrics and Electrical Insulation, Vol. 2, 1995, s. 510 – 528.
18. Florkowska B., Włodek R.: "Analysis of partial discharges in air using phase-resolved patterns", IEEE 1996 Annual Report of the Conference on Electrical Insulation and Dielectric Phenomena, Vol. 2, s. 606 – 609.
19. Florkowska B., Nowak W., Tarko R.: "Modelling of the corona for the analysis of the overvoltage waves propagation in the overhead high voltage transmission lines", Archives of Electrical Engineering, Vol. LV-No. 215-1, 2006, s. 47 – 62.
20. Fiala P., Gescheidtova E., and Jirku T.: "Numerical Modelling a Microwave and Detection of Partial Discharge inside of HV Transformer", PIERS Proceedings, Xi'an, China, March 22–26, 2010.
21. Ficker T.: "Streamer Spots on Dielectric Barriers", IEEE Transactions on Plasma Science, Vol. 36, No. 4, 2008, s. 1310–1311.

22. Ficker T.: "Electron Avalanches I-Statistics of Partial Microdischarges in Their Pre-streamer Stage", IEEE Transactions on Dielectrics and Electrical Insulation Vol. 10, No. 4; 2003, s. 689 – 699.
23. Ficker T.: "Electron Avalanches II- Fractal Morphology of Partial Microdischarge Spots on Dielectric Barriers", IEEE Transactions on Dielectrics and Electrical Insulation Vol. 10, No. 4; 2003, s. 700 – 707.
24. Ficker T.: "Electron Avalanche Statistics", ACTA PHYSICA POLONICA A No. 6, Vol. 116, 2009, s. 1018 – 1020.
25. Oussalah, N., Zebboudj Y., and Boggs S. A.: "Partial discharge pulse propagation in shielded power cable and implications for detection sensitivity", IEEE Electrical Insulation Magazine, Vol. 23, No. 6, 2007, s. 5 – 10.
26. Nadolny Z., Nowacki T., Rakowska A.: Analiza pola elektrycznego i magnetycznego w czasie wykonywania prac pod napięciem na linii 220 kV, Wiadomości Elektrotechniczne, Nr 1, 2005, s. 26 – 31.
27. Krajewski W.: 3-D model of the electric field excited by overhead HV lines. Archiv für Elektrotechnik, Nr 1, 1998, s. 55 – 63.
28. Krajewski W.: Elementy brzegowe i liniowe w analizie wybranych zagadnień EMC niskiej częstotliwości, Prace Instytutu Elektrotechniki, zeszyt 224, 2005 (monografia).
29. Krajewski W.: Analiza dokładności wybranych technik całkowo-brzegowych w kontekście modelowania zagadnień EMC niskiej częstotliwości. Prace Instytutu Elektrotechniki, zeszyt 233, 2007, s. 43 – 80.
30. Krajewski W.: Validation of a numerical approach to the analysis of a live-line worker exposure to the electric field, Progress In Electromagnetics Research (PIER), 2011, Vol. 119, s. 315 – 333.
31. Krajewski W.: Analiza prądów indukowanych w organizmie elektryka wykonującego pracę pod napięciem techniką „na potencjale”, Przegląd Elektrotechniczny, 2010, Nr 3, s. 132 – 135.

*Rękopis dostarczono dnia 10.09.2012 r.*

## LOCALIZATION OF PARTIAL DISCHARGES IN ZONES OF LIVE-LINE WORKS ON HV OBJECTS

Wojciech KRAJEWSKI

**ABSTRACT** *Nowadays, the problem of the live-line worker's exposure to the electric and magnetic fields of power frequency (50 Hz) is rather well recognised. On the other hand, the issue of the lineman's exposure to the electromagnetic fields of higher frequencies (including radio frequencies) is not examined as yet. The above-mentioned fields are excited by partial discharges on energised elements. Measurements indicate that strengths of these fields, near body of bare-hand worker, can significantly exceed admissible values*

*imposed by Polish and European regulations. Initialization of partial discharges depends on the strength of the primary electric field of 50 Hz (at the surfaces of energised elements) as well as on the atmospheric conditions. In the paper, the primary electric field (in the bare-hand-working zone) has been analysed in the context of possibility of the partial discharge initialisation. Different lineman's positions are taken into account. The own author's software package (based on boundary-integral methods) is employed for this purpose.*

**Keywords:** *boundary-integral methods, electromagnetic field, live-line works, partial discharges*



**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., obecnie na stanowisku profesora nadzwyczajnego. 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. Współpracuje z International Electrotechnical Commission w charakterze eksperta z zakresu pól elektromagnetycznych (komitet TC 106). Jest stałym recenzentem w czasopismach naukowych z listy Thomsona, m.in. w brytyjskich: IET Science, Measurement & Technology oraz IET Generation, Transmission & Distribution, amerykańskim Progress in Electromagnetics Research, a także wydawanym przez Elsevier czasopiśmie ENERGY. Kilkakrotnie recenzował granty dla MNiSW. 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, w tym kilkunastu z listy Thomsona. 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).