



Barbara FLORKOWSKA, Andrzej JACKOWICZ-KORCZYŃSKI

Akademia Górniczo-Hutnicza, Katedra Elektroenergetyki(1)

Analiza ekspozycji zawodowej na pole elektromagnetyczne w pracach pod napięciem

Streszczenie. Technologia prac pod napięciem (PPN) wykonywana metodą „na potencjale” uwzględnia przemieszczanie się pracownika w polu elektromagnetycznym linii napowietrznej, którego wartości zmieniają się w szerokim zakresie i zależą od napięcia znamionowego linii i prądu obciążenia. W artykule przedstawiono obrazy pola elektrycznego i magnetycznego dla wybranych etapów transportu pracownika w otoczenie przewodu fazowego w czasie PPN metodą „na potencjale”. Uwzględniono, w przypadku pola elektrycznego, jego deformację przez bryłę geometryczną modelu pracownika w odzieży ochronnej o określonym współczynniku ekranowania. Wyniki analizy odniesiono do aktualnie obowiązującego, krajowego aktu prawnego w zakresie warunków pracy w polu elektromagnetycznym.

Abstract. (Analysis of technical personnel exposition on electromagnetic fields in live line working). Technology of live-working takes into consideration movement of personnel in electromagnetic field of transmission line. Values of this field vary in wide range and depend on line nominal voltage and loading current. This article presents distributions of electric and magnetic field for several phases of personnel transport to space surrounding phase conductor. For electric field, deformation of its distribution by safety clothes with shielding factor defined was considered. Results of analysis are referenced to actual domestic safety rules of exposition on electromagnetic field.

Słowa kluczowe: prace pod napięciem, pole elektromagnetyczne, ekspozycja zawodowa.

Keywords: live line working, electromagnetic field, technical personnel exposition.

Wstęp

Technologia wykonywania eksploatacyjnych czynności remontowych i konserwacyjnych podczas normalnej pracy systemu elektroenergetycznego polega na prowadzeniu prac pod napięciem (PPN). Prace te stosowane są praktycznie na każdym poziomie napięcia. W przypadku układów izolacyjnych linii i stacji wysokich i najwyższych napięć technologia obejmuje głównie prace wykonywane w kontakcie przy wykorzystaniu metody „na potencjale” [1,7].

Jedną z trudniejszych operacji podczas prac pod napięciem na liniach napowietrznych wysokich i najwyższych napięć jest transport pracownika w otoczenie przewodu fazowego. W każdym przypadku, zarówno wtedy, gdy odbywa się to z drabiny izolacyjnej, jak i w inny sposób występują narażenia związane z ekspozycją personelu na działanie pola elektromagnetycznego o częstotliwości 50 Hz generowanego przez przewody fazowe linii napowietrznej [2,3,4]. Wynika to ze znacznych, w porównaniu z ekspozycją środowiskową, wartości natężenia pola elektrycznego i magnetycznego w strefie prowadzenia prac pod napięciem.

Strefa prac pod napięciem D_L jest odległością określającą zewnętrzną granicę obszaru prac pod napięciem, natomiast odległość D_V wyznacza zewnętrzną granicę strefy w pobliżu napięcia. Zalecane odstęp w powietrzu D_L i D_V zawarte są w normie [5]. Tak np. dla najwyższego napięcia urządzenia U_m równego 420 kV odstęp D_L wynosi 340 cm a odstęp D_V – 540 cm.

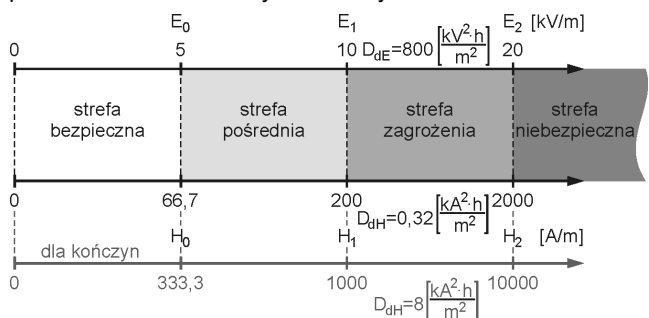
Technologie PPN opisując procedury robocze odpowiednie dla każdego poziomu napięcia, podają sposoby transportu pracownika z powierzchni do strefy prac pod napięciem. Z punktu widzenia ekspozycji zawodowej pracowników w polu elektromagnetycznym jest to zatem problem kształtowania warunków pracy w oparciu o ustalone wartości najwyższych dopuszczalnych natężeń pól elektromagnetycznych z uwzględnieniem dopuszczalnego czasu ekspozycji [6].

Temu zagadnieniu, rozważanemu w oparciu o analizy rozkładu przestrzennego pola elektromagnetycznego w środowisku PPN, z uwzględnieniem deformacji pola przez

wprowadzenie do niego człowieka, poświęcony jest niniejszy artykuł.

Wymagania przepisów

Regulacje prawne dotyczące dopuszczalnej ekspozycji personelu zawodowego [8,9] określają cztery strefy ochronne charakteryzujące narażenia związane z oddziaływaniem pola elektromagnetycznego dla technicznie stosowanych zakresów częstotliwości. W przypadku częstotliwości 50 Hz narażenia te określone są oddzielnie dla składowych elektrycznej i magnetycznej, jako że w tym zakresie częstotliwości składowe te są praktycznie wzajemnie niezależne. Granice tych stref wynikają z wartości natężenia pola elektromagnetycznego. Przebywanie w strefie bezpiecznej S_B nie podlega czasowym ograniczeniom. Czas przebywania personelu w strefie pośredniej S_P nie może przekraczać 8 godzin w ciągu doby. W strefie zagrożenia S_Z czas przebywania pracownika jest uzależniony od dopuszczalnej dozy pola elektrycznego i magnetycznego. Dozę pola elektrycznego i magnetycznego określają odpowiednio wielkości D_{dE} [$V^2/m^2 \cdot h$] i D_{dH} [$A^2/m^2 \cdot h$]. Dopuszczalne wartości dozy określone są w [8]. Przebywanie personelu w strefie niebezpiecznej S_N jest zabronione. Graniczne wartości skuteczne natężeń pola elektrycznego E_0 , E_1 i E_2 oraz magnetycznego – H_0 , H_1 i H_2 dla omawianych stref przedstawiono schematycznie na rys. 1.



Rys.1. Granice stref ochronnych w polu elektromagnetycznym 50 Hz

W przypadku pola magnetycznego należy podkreślić, że ekspozycja miejscowa kończyn personelu może być pięciokrotnie większa od wartości granicznej, natomiast doza pola – dwudziestopięciokrotnie większa.

Skutki ekspozycji są jednak ściśle uzależnione nie tylko od natężenia pola, ale również od czasu trwania jego oddziaływania i od charakterystyki zmian natężenia pola w czasie. W przypadku przebywania pracownika w strefie zagrożenia w czasie równym t godzin (w ciągu zmiany roboczej) i równoczesnym oddziaływaniu pola elektrycznego E i magnetycznego H o częstotliwości f wyznacza się wskaźnik ekspozycji W ze wzoru:

$$(1) \quad W = \frac{E(f)^2 \cdot t}{D_{dE}(f)} + \frac{H(f)^2 \cdot t}{D_{dH}(f)}$$

Jest to wskaźnik ekspozycji uwzględniający dozę rzeczywistą pola elektrycznego i magnetycznego.

Cele prowadzonej analizy

Wartości pola elektromagnetycznego odnoszą się do wartości skutecznej przebiegu, a doza jest proporcjonalna do energii pola absorbowanej przez organizm ludzki.

Procedury prac pod napięciem uwzględniają narażenia od pól elektromagnetycznych, a więc wyznaczenie w/w stref ochronnych, ich zasięgu przy danym napięciu znamionowym linii napowietrznej, a także dozy pola elektrycznego i magnetycznego. Podstawą ich obliczenia są czasy przebywania pracownika w strefie zagrożenia, wynikające z organizacji pracy, kolejności zadań i.t.p..

Wyznaczenie granic stref podczas PPN wymaga określenia rozkładów pola elektrycznego i magnetycznego w przestrzeni, w której prace te są prowadzone. Określenie dozy wymaga ponadto wyznaczenia swoistego „profilu” pola w trasie przemieszczania się pracownika do potencjału przewodu fazowego oraz znajomości prędkości jego ruchu.

Analizowana procedura

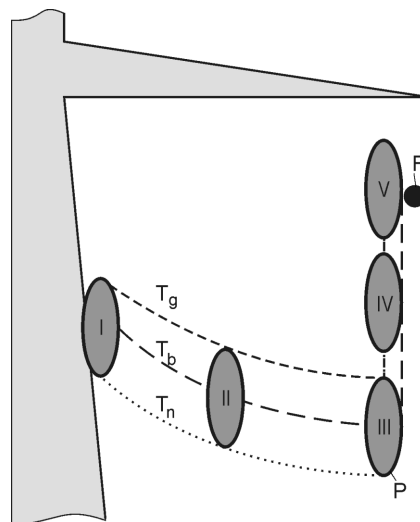
Procedury prac pod napięciem uwzględniają poszczególne etapy transportu pracownika z powierzchni ziemi w otoczenie przewodu fazowego. Wykonano obliczenia rozkładu pola elektrycznego i magnetycznego w obszarze ruchu pracownika w warunkach prac pod napięciem wyposażonego w ekranowaną odzież ochronną o współczynniku ekranowania pola elektrycznego 98,5% [3]. W czasie procedury przyjęto, że prędkość ruchu pracownika z konstrukcji słupa do przewodu fazowego wynosi 20 cm/s (720 m/h).

Jako przykład przyjęto, że źródłem pola jest dwutorowa linia o napięciu znamionowym 400 kV, obciążona symetrycznie w dwóch torach prądami fazowymi 1000 A, zawieszona na słupie przelotowym typu Z52P.

Analizowano procedurę przedstawioną na rysunku 2, w ramach której pracownik przemieszcza się z konstrukcji wsporczej słupa do przewodu fazowego.

Metoda analizy

Do obliczeń rozkładu pola elektrycznego i magnetycznego wykorzystano metodę elementów skończonych (MES) [10]. W analizie zastosowano zespolony potencjał elektryczny dla pola elektrycznego i zespolony, wektorowy potencjał magnetyczny dla pola magnetycznego. W obliczeniach uwzględniono eliptyczną polaryzację wektorów pola elektrycznego i magnetycznego oraz przyjęto, że środowisko analizy ma liniowe własności elektryczne i magnetyczne. Zastosowana metoda pozwala na zobrazowanie deformacji pola elektromagnetycznego w kolejnych etapach ruchu pracownika w czasie PPN.



Rys.2. Kolejne etapy (I, II, III, IV i V) zbliżania się pracownika do potencjału przewodu fazowego oraz trajektorie głowy, brzucha i nóg (odpowiednio T_g, T_b, T_n), F – przewód fazowy, P – pracownik

Problematyka modelowania

Modelowanie pola elektrycznego obejmowało uwzględnienie ekwipotencjalnej uziemionej konstrukcji wsporczej słupa oraz wzajemnego odwrócenia kolejności faz w sąsiednich torach. Dla uwzględnienia wpływu pracownika w odzieży ochronnej na rozkład pola elektrycznego przyjęto jego model opisany elipsoidą obrotową o wymiarach osi 1,8 m i 0,7 m (przeciętne wymiary człowieka).

Uwzględnienie odzieży ochronnej w obliczeniach możliwe jest, w przypadku zastosowanej metody, w dwojaki sposób. Pierwszy polega na zastosowaniu warunku brzegowego, umożliwiającego ustalenie potencjału elipsoidy. Sposób ten pozwala poprawnie określić deformację pola wywołaną obecnością pracownika. Drugi sposób, w przeciwieństwie do pierwszego, pozwala na ocenę ekspozycji personelu na pole elektryczne w odzieży ochronnej, której rzeczywisty współczynnik ekranowania jest mniejszy od 100%. W praktyce, w zależności od wykonania odzieży współczynnik ekranowania waha się w granicach 98,5%-99,9%. Sposób ten wykorzystuje zastosowanie warunku brzegowego drugiego rodzaju oraz wartości przenikalności elektrycznej względnej. Dla odzieży o współczynniku ekranowania 98,5% przenikalność elektryczna względna elipsoidy powinna wynosić $\epsilon_r=66,7$, a dla odzieży z ekranowaniem 99,9% - $\epsilon_r=1000$.

O ile analiza ekspozycji na pole elektryczne wymaga przeprowadzenia szeregu obliczeń dla różnych etapów przemieszczania się pracownika, o tyle brak ekranowania personelu przed polem magnetycznym jest przyczyną braku deformacji rozkładu tego pola w czasie prac pod napięciem. W przypadku analizy ekspozycji na pole magnetyczne identyfikacja stref może być zatem przeprowadzona jednorazowo.

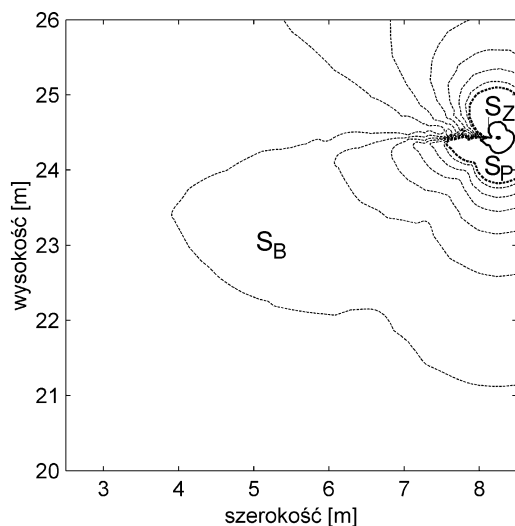
Ekspozycja na pole magnetyczne

Wyznaczenie ekspozycji na pole magnetyczne wymagało na wstępie określenia zasięgu stref wynikających z wartości skutecznych natężenia pola magnetycznego (rys. 3).

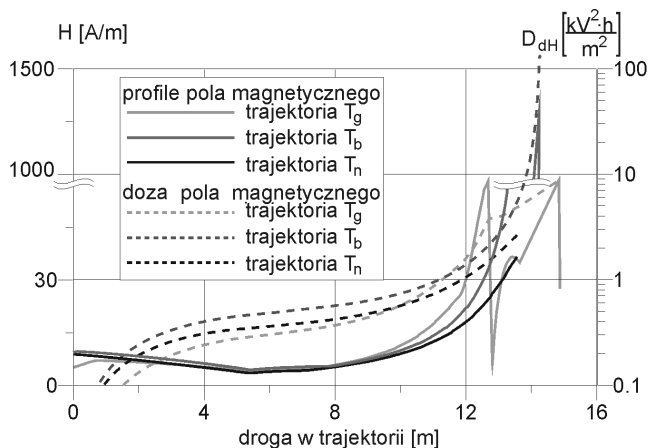
Maksymalną wartość natężenia pola magnetycznego w otoczeniu przewodów wynosi 1328 A/m w pobliżu najwyższego przewodu fazowego. Wskazuje to na brak strefy niebezpiecznej S_N . Zasięg strefy zagrożenia S_z dla wszystkich faz obejmuje przestrzeń w odległości do 30 cm

od przewodów fazowych, natomiast granica strefy pośredniej S_P przebiega w odległości maksymalnie 1 m od przewodu fazowego. Rozkład stref wskazuje na konieczność ograniczania czasu prac pod napięciem w analizowanym przypadku linii 400 kV.

Na podstawie wyznaczonych rozkładów określono „profile” natężenia pola magnetycznego dla trajektorii głowy, brzucha oraz nóg pracownika (rys. 4). Dozę pola magnetycznego w czasie ruchu pracownika określono na podstawie całkowania kwadratu natężenia pola magnetycznego w dziedzinie czasu. Zestawienie wartości maksymalnych natężeń w trajektoriach, ich wartości w etapie V oraz dozy dla wymienionych trajektorii przedstawiono w tab. 1.



Rys.3. Strefy w polu magnetycznym, strefy: S_B (---) (izolinie co 10 A/m), S_P (-), S_Z (-)



Rys.4. Natężenie i doza rzeczywista pola magnetycznego w trajektoriach ruchu głowy, brzucha i nóg.

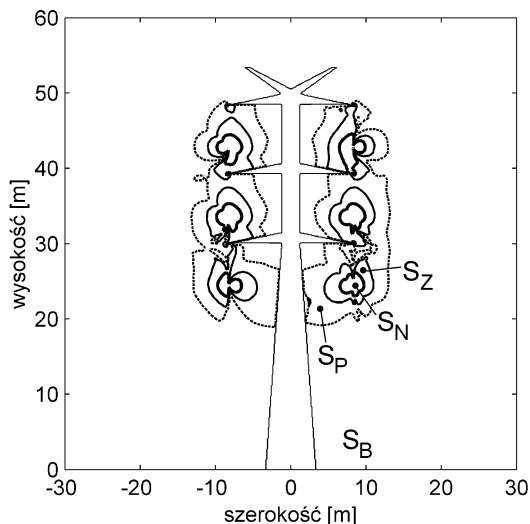
Tabela 1. Natężenia i dozy pola magnetycznego podczas PPN

trajektoria	H_{max} [A/m]	H_V [A/m]	D_{dH} [A ² ·h·m ⁻²]
głowy	59	28	8,93
brzucha	1277	76,5	132
nóg	37	37	2,64

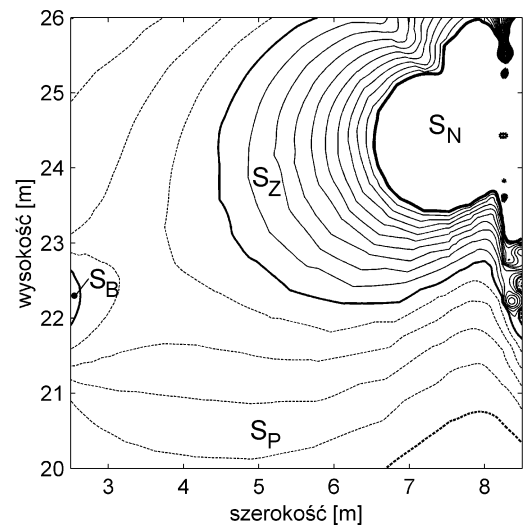
Ekspozycja na pole elektryczne

Strefy ochronne w polu elektrycznym dla przypadku praktycznie nie zniekształconego obecnością pola pracownika przedstawia rys. 5. Występują wówczas wszystkie strefy ochronne począwszy od strefy niebezpiecznej, przez strefy zagrożenia, pośrednią, do strefy bezpiecznej.

Rozkład pola elektrycznego w otoczeniu najniższego przewodu fazowego oraz wynikające z niego zasięgi stref w tej przestrzeni przedstawia rysunek 6. W omawianym przypadku strefa niebezpieczna występuje w odległości do 2 m od przewodu fazowego. Zasięg strefy pośredniej obejmuje praktycznie całą przestrzeń separującą najniższy przewód od konstrukcji wsporczej słupa. Największa odległość granicy tej strefy od przewodu fazowego wynosi ok. 10 m. W przedziale odległości 2-10 m od przewodów fazowych występuje strefa zagrożenia.



Rys.5. Strefy w polu elektrycznym (etap I), strefy: S_B (---), S_P (-), S_Z (-)

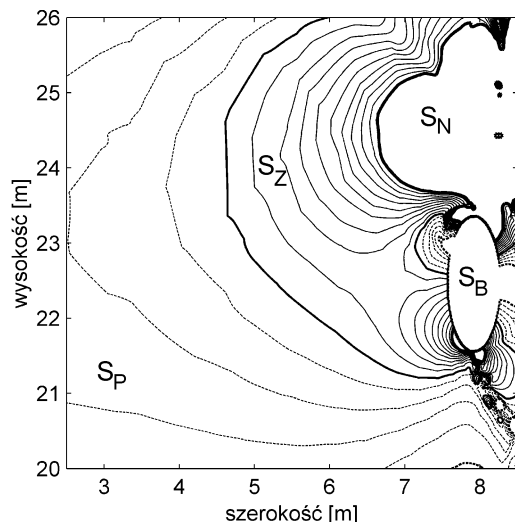


Rys.6. Strefy w polu elektrycznym (etap I), strefy: S_B (---), S_P (-), S_N (-) dla pola elektrycznego w otoczeniu przewodu fazowego (izolinie co 1 kV/m)

Zastosowanie odzieży ochronnej wprowadza zniekształcenie rozkładu pola elektrycznego, jednocześnie ograniczając ekspozycję na pole elektryczne. Technologia pracy metodą „na potencjały” polega na wyrównaniu potencjału odzieży z potencjałem przewodu. Gdy pracownik znajduje się wystarczająco blisko przewodu fazowego (ok. 2 m licząc od środka elipsoidy, etap IV) potencjał ten jest wyrównywany. Wówczas ekspozycja na pole elektryczne jest ograniczona praktycznie do zera ze względu na ekwipotencjalizację odzieży. Ocena ekspozycji musi zatem uwzględniać całość czynników takich jak przebieg procedur PPN oraz zastosowanie odzieży ochronnej.

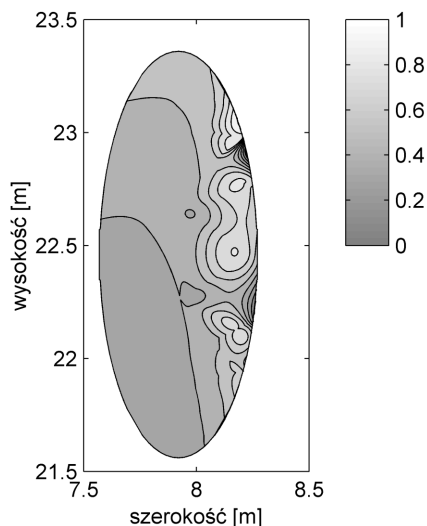
Analizując ekspozycję pracownika w etapie IV na pole elektryczne należy określić zarówno zmiany zasięgu stref w otoczeniu przewodu fazowego wywołane obecnością pracownika (rys. 7) jak i ekranowanie przy wykorzystaniu odzieży ochronnej.

Porównanie rozkładów przedstawionych na rys. 6 i 7 wskazuje na zmianę zasięgu stref w kierunku zwiększenia stref S_P , S_Z i S_N . Wartości skuteczne natężenia pola elektrycznego w strefie niebezpiecznej osiągają 900 kV/m.



Rys.7. Strefy w polu elektrycznym (etap IV), strefy: S_B (—), S_P (---), S_Z (—) oraz granica strefy niebezpiecznej (—) (izolinie co 1 kV/m)

Identyfikacja rozkładu natężenia pola elektrycznego wewnątrz elipsy pozwala na określenie ekspozycji pracownika w odzieży ochronnej (rys.8).



Rys.8. Ekspozycja w ekranowanej elipsie (etap IV), izolinie co 0,1 kV/m

W tym etapie ekspozycja pracownika w odzieży ochronnej na pole elektryczne, mimo dużych wartości natężenia pola elektrycznego na zewnątrz odzieży, jest niewielka. Największe natężenie pola elektrycznego występuje w okolicy głowy i wynosi ok. 1 kV/m w przypadku odzieży o współczynniku ekranowania 98,5%. Wskazuje to na ekspozycję personelu w odzieży ochronnej w strefie bezpiecznej pola elektrycznego.

Wnioski

Wyznaczone wartości natężenia pola magnetycznego wskazują na brak strefy niebezpiecznej. Analiza wartości dozy wskazuje jednak na istotne znaczenie tej wielkości w organizacji pracy i czasie jej trwania.

Zakładając pełną symetrię procedury powrotu pracownika na konstrukcję słupa w stosunku do analizowanej procedury podejścia do przewodu fazowego, wykazano, że ekspozycja na pole magnetyczne pozwala jedynie na pozostanie pracownika w etapie (V) w strefie zagrożenia przez ok. 30 sekund. Założenie, że pracownik przestrzegać będzie odpowiednich odległości od przewodu fazowego i praca w kontakcie dotyczyć będzie jedynie kontaktu rąk z przewodem fazowym, czas ten może zostać zwiększony do ok. 12,5 minuty, ze względu na dwudziestopięciokrotnie większą dozę dopuszczalną pola magnetycznego dla ekspozycji miejscowej kończyn.

Określenie ekspozycji na działanie pola elektrycznego wiąże się z uwzględnieniem wyrównania potencjału oraz wartości współczynnika ekranowania odzieży. Mimo, że obecność personelu w odzieży ochronnej znacznie deformuje pierwotny rozkład pola elektrycznego, oszacowane narażenia wewnątrz odzieży nie wskazują na obecność strefy pośredniej, gdyż wartości natężenia pola elektrycznego nie przekraczają 1 kV/m.

Praca była dofinansowana przez Komitet Badań Naukowych w ramach umów o badania własne nr 10.10.120.430 i 10.10.120.432

LITERATURA

- [1] Michniewski R., Aspekty techniczne i ekonomiczne prowadzenia prac pod napięciem w ZE Toruń S.A., Energetyka, 2002, t. X-XI, 752-760.
- [2] Dudek B., Wójcik M., Cader S., Wpływ pól elektromagnetycznych 50 Hz podczas prac pod napięciem, 4 Ogólnokrajowa Konferencja Naukowo-Techniczna „Prace pod Napięciem”, Bielsko-Biała, listopad, 1997.
- [3] ESMOL Subcommittee 15.07, Safety Consideration When Placing a Person With Tolls in an Air Gap to Change Porcelain and Glass Insulators on Transmission Systems of 345 kV and Above, Using Ladder, and Aerial Lift Methods, IEEE Transactions on Power Delivery, vol. 17, No. 3, July 2002.
- [4] Thione L., Pignini A., Baldo G., Poli E., Pirotte P., Dulac P., Conti R., Guidelines for insulation coordination in live working. Technical Brochure ELECTRA-CIGRE, Working Group 33.07, 151, February 2000.
- [5] EN 50179:1994 Power installations exceeding 1kV AC
- [6] Szuba M., Dudek B., Oszacowanie ekspozycji na pole magnetyczne przy pracach pod napięciem wykonywanych na liniach przesyłowych najwyższych napięć, III Konferencja Naukowo-Techniczna „Pola elektromagnetyczne a energetyka i środowisko”, Bielsko-Biała, 1996.
- [7] Gela G., Fox H. J., Jr, Ferraro R., Verdecchio T., Lyons P., Live Working on Vintage 138 kV Steel Lattice Structures, IEEE Transactions on Power Delivery, vol. 16, No. 1, 6-11, January 2001.
- [8] Rozporządzenie Ministra Pracy i Polityki Socjalnej z dnia 2 stycznia 2001 r. zmieniające rozporządzenie w sprawie najwyższych dopuszczalnych natężeń czynników szkodliwych dla zdrowia w środowisku pracy. Dz. U. Nr 4, poz. 36
- [9] PN-T-065890:2001. Ochrona pracy w polach i promieniowaniu elektromagnetycznych w zakresie częstotliwości od 0 Hz do 300 GHz, ark. 01 Terminologia, ark. 03 Metody pomiaru i oceny pola na stanowisku pracy.
- [10] Zhou P., Numerical Analysis of Electromagnetic Field, EESSES, 1993, 75–123.

Autorzy: dr hab. inż. Barbara Florkowska prof. AGH, Akademia Górniczo-Hutnicza, Katedra Elektroenergetyki, al. Mickiewicza 30, 30-059 Kraków, E-mail: beflor@agh.edu.pl; mgr inż. Andrzej Jackowicz-Korczyński, E-mail: ajk@agh.edu.pl