

Ograniczenie natężenia pola elektrycznego pod linią napowietrzną 110 kV poprzez dedykowaną konfigurację geometryczną przewodów roboczych

Streszczenie. Pole elektryczne w otoczeniu trójfazowej linii wysokiego napięcia stanowi superpozycję składowych elektrycznych pól generowanych przez każdy z przewodów roboczych linii. Stosując zatem zaplanowaną konfigurację geometryczną przewodów roboczych można spowodować stan w którym pola składowe mogą się w pewnym zakresie wzajemnie kompensować, a w konsekwencji obniża się wypadkowe natężenie pola elektrycznego generowanego przez linię napowietrzną.

Abstract. The global value of the electric field intensity near overhead power lines is the superposition of the components of the electrical field generated by each of the phase wires of the power line. Therefore, the use of planned geometrical configuration of the phase wires can result, to some extent, in mutual compensation of component fields what reduces the intensity of global electric field generated by the overhead power lines. (Minimization of electric field intensity of 110 kV overhead power lines by purposeful configuration of phase wires).

Słowa kluczowe: linie wysokiego napięcia, pole elektryczne, symulacje cyfrowe, metoda elementów skończonych, ochrona środowiska.

Keywords: overhead power lines, electric fields, digital simulations, finite elements method, safe of environment.

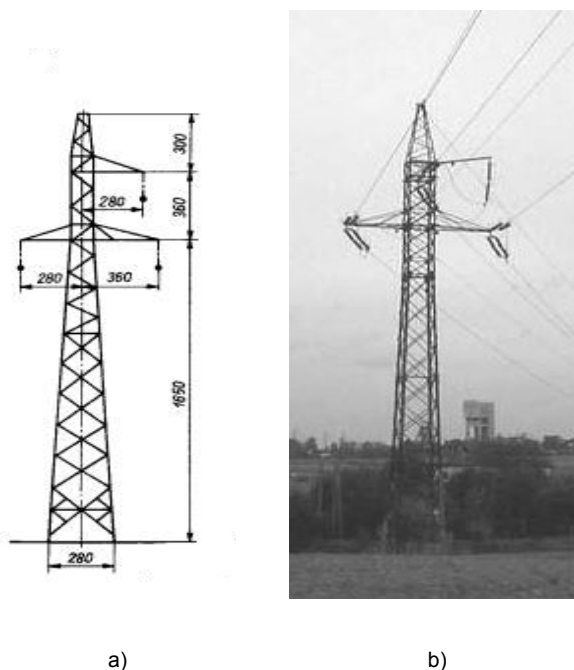
Wstęp

Napowietrzne linie wysokiego napięcia (NLWN) są podstawowym medium do przesyłu energii elektrycznej dużych mocy. W sieciach przesyłowych wykorzystuje się linie o napięciu 110kV, 220kV oraz 400kV. Sposób projektowania NLWN zapewnia bezpieczeństwo ich użytkowania, szczególnie w zakresie bezpieczeństwa przeciwporażeniowego, ale także pod kątem ograniczenia ekspozycji ludności na pole elektromagnetyczne, które jest jednym ze zjawisk towarzyszących przesyłowi energii elektrycznej. W otoczeniu przewodów występuje pole elektryczne i magnetyczne. Natężenie pola magnetycznego zależy wprost od prądu płynącego w linii, pole elektryczne jest funkcją napięcia linii, a jego rozkład przestrzenny zależy w dużej mierze od konstrukcji słupów i konfiguracji przewodów. Zwykle przebieg NLWN projektuje się tak, aby w miarę możliwości omijały one tereny zurbanizowane, ale często to urbanizacja zbliża się do istniejących już linii i wtedy może pojawić się problem z zachowaniem standardów wymaganych przez ustawę Prawo ochrony Środowiska [1]. Rozporządzenie Ministra Środowiska [2] określa dopuszczalne poziomy pola elektromagnetycznego w szerokim zakresie częstotliwości, wyróżniając też częstotliwość 50Hz stosowaną w energetyce. Ograniczeniu podlega zarówno natężenie pola magnetycznego jak i elektrycznego. Dopuszczalne natężenia pola magnetycznego w miejscach dostępnych dla ludności wynosi 60A/m, pola elektrycznego ogólnie 10kV/m, ale wprowadzono dodatkowe ograniczenie 1kV/m dla terenów przeznaczonych pod zabudowę mieszkaniową. O ile w natężenie składowej magnetycznej zwykle jest dużo poniżej wartości dopuszczalnych, to w niektórych przypadkach natężenie składowej elektrycznej może być zbliżone lub nawet przekraczać ograniczenie 1kV/m w sytuacjach, kiedy obszary zabudowy mieszkaniowej znacząco zbliżają się do NLWN. Sytuacje takie mają miejsce szczególnie w miastach lub na przedmieściach, gdzie rozwój budownictwa powoduje zainteresowanie gruntami w bezpośrednim otoczeniu NLWN. Jednym z możliwych rozwiązań technicznych jest zastąpienie NLWN kablem podziemnym, ale jest to operacja droga i nie zawsze możliwa do realizacji. W niniejszej pracy zaproponowano inne rozwiązanie problemu – dobór konfiguracji wzajemnej przewodów roboczych NLWN dla

minimalizacji natężenia pola elektrycznego w wybranym obszarze wokół linii.

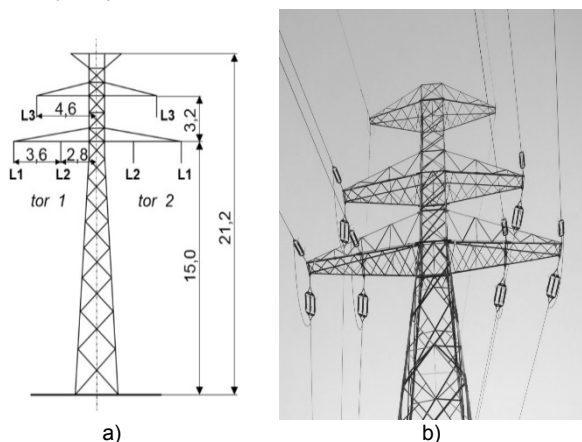
Materiał i metody

Na potrzeby niniejszego opracowania analizie obliczeniowej poddano rozkłady natężenia pola elektrycznego dla kilku wariantów lokalizacji przewodów na konstrukcjach wsporczych linii napowietrznych 110 kV. Numeryczne symulacje rozkładu natężenia pola elektrycznego wykonano dla wysokości $h=2\text{m}$ nad poziomem terenu w pasie o szerokości 50 m tzn. po 25 m w obie strony licząc od osi linii elektroenergetycznej. Założono, że najniższe zawieszono przewody znajdują się na wysokości $h=8\text{ m}$ nad poziomem terenu, natomiast pozostałe wymiary wynikają z geometrii konstrukcji wsporczej oraz zastosowanego osprzętu liniowego takiego jak izolatory, odstępniki etc.



Rys.1. Słup przelotowy typu B2 linii napowietrznej 110 kV

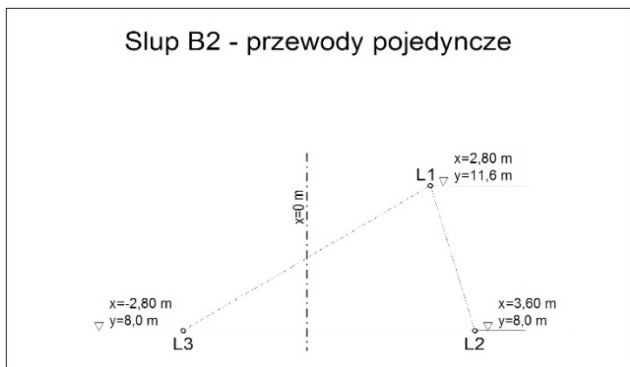
Na rysunku 1 przedstawiono konfigurację geometryczną przewodów roboczych standardowej jednotorowej linii napowietrznej 110 kV zbudowanej w oparciu o kratowe słupy przelotowe typu B2 [3], a na rysunku 2 konfigurację geometryczną przewodów roboczych dwutorowej linii napowietrznej 110 kV rozwieszanej na kratowych słupach przelotowych typu Pm DC240 [4].



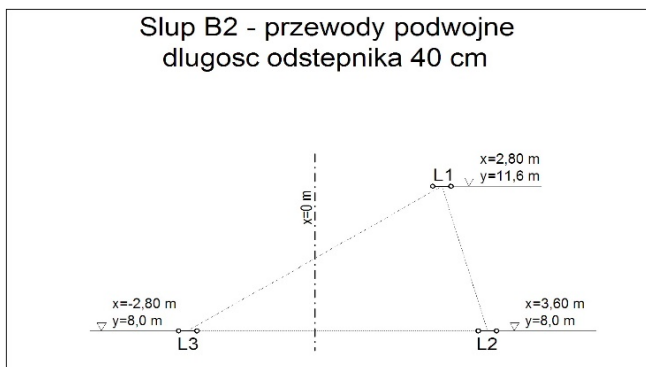
Rys.2. Słup przelotowy typu Pm DC240 dwutorowej linii napowietrznej 110 kV [5]

Analiza rozkładu pola elektrycznego dla wybranych konfiguracji przewodów fazowych

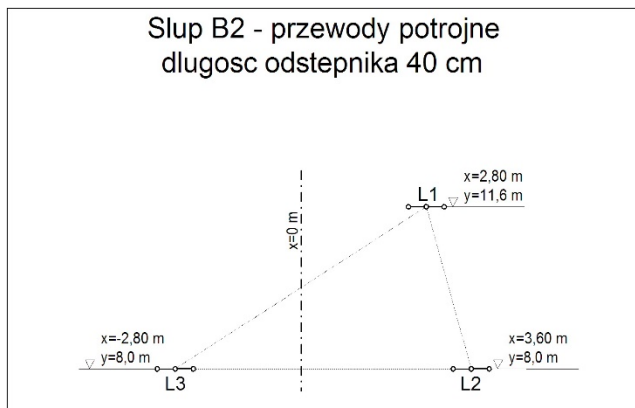
Do analizy wybrano różne konfiguracje przewodów roboczych jednotorowych NLWN 110kV. Zastosowano różne rozwiązania konstrukcyjne, w tym zwielokrotnianie przewodów roboczych. Analizę porównawczą przeprowadzono względem konfiguracji podstawowej – rys. 3. Konfiguracje alternatywne przedstawiono na rysunkach 4-7 a wyniki symulacji rozkładu pola elektrycznego w przekroju linii na rysunkach 8-12.



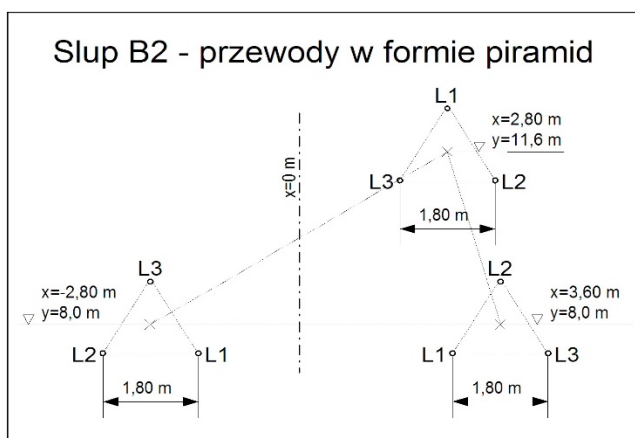
Rys. 3. Konfiguracja geometryczna przewodów pojedynczych na słupie przelotowym typu B2 (Wariant I – układ tradycyjny)



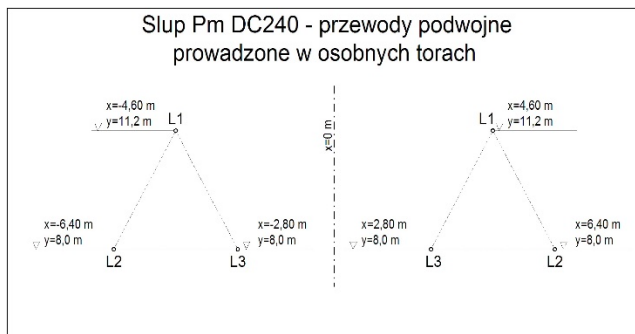
Rys.4. Konfiguracja geometryczna przewodów podwójnych na słupie przelotowym typu B2 (Wariant II)



Rys.5. Konfiguracja geometryczna przewodów potrójnych na słupie przelotowym typu B2 (Wariant III)



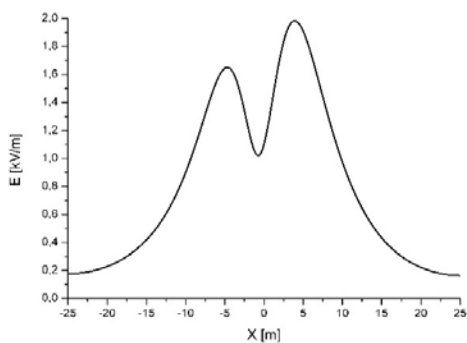
Rys.6. Konfiguracja geometryczna przewodów potrójnych w formie piramid na słupie przelotowym typu B2 (Wariant IV)



Rys.7. Konfiguracja geometryczna przewodów podwójnych na słupie przelotowym dwutorowym typu Pm DC240 (Wariant V)

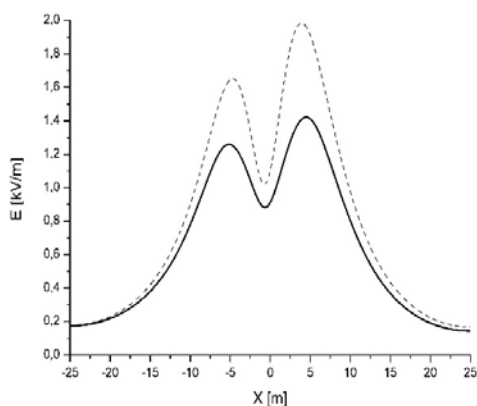
Warianty ułożenia przewodów dobierano na podstawie symulacji wstępnych oraz możliwości technicznych konstrukcji z zachowaniem podstawowych zasad projektowania NLWN. Wariant V jest rozwiązaniem najbardziej rozbudowanym – gdzie linia jednotorowa jest prowadzona jako linia dwutorowa. Zwielokrotnianie przewodów roboczych może być użyteczne nie tylko z punktu widzenia ograniczenia natężenia pola w otoczeniu linii, ale również dla podwyższenia dopuszczalnego obciążenia linii.

Na rysunku 8 przedstawiono rozkład natężenia pola elektrycznego dla typowej linii napowietrznej 110 kV wykonanej w oparciu o konstrukcję wsporcze typu B2 (Wariant I – rys. 3). Maksymalne natężenie pola elektrycznego dla tego przypadku wynosi $E_{max}=1,98$ kV/m w punkcie odległym o $x=+3,90$ m od osi linii i jest to rozkład odniesienia dla kolejnych symulacji.

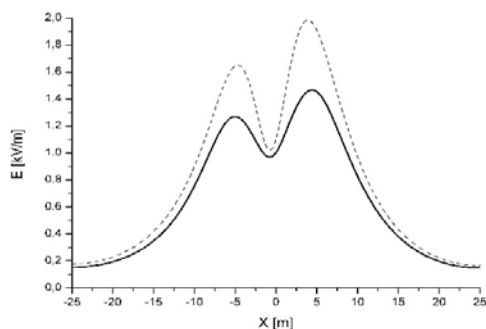


Rys.8. Rozkład pola elektrycznego dla linii o standardowej konfiguracji przewodów dla słupa typu B2 jak na rysunku 3

Na kolejnych rysunkach przedstawiono graficzną prezentację wyników rozkładu natężenia pola elektrycznego generowanego podczas pracy przez elektroenergetyczną linię napowietrzną o napięciu 110 kV dla proponowanych konfiguracji przewodów roboczych.



Rys.9. Rozkład pola elektrycznego dla linii o konfiguracji przewodów jak na rysunku 4 (linia przerywana – rozkład dla podstawowej konfiguracji linii dla słupa typu B2)



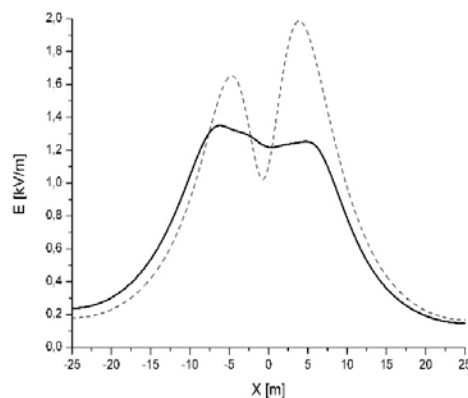
Rys.10. Rozkład pola elektrycznego dla linii o konfiguracji przewodów jak na rysunku 5 (linia przerywana – rozkład dla podstawowej konfiguracji linii dla słupa typu B2)

Na rysunku 9 przedstawiono rozkład natężenia pola elektrycznego dla linii napowietrznej 110 kV wykonanej w oparciu o konstrukcje wsporcze typu B2 przy zastosowaniu podwójnych przewodów w każdej z faz odległych od siebie o 40 cm (jak na Rys. 4). Maksymalne natężenie pola elektrycznego dla tego przypadku wynosi $E_{max}=1,42$ kV/m w punkcie odległym o $x=+4,50$ m od osi linii.

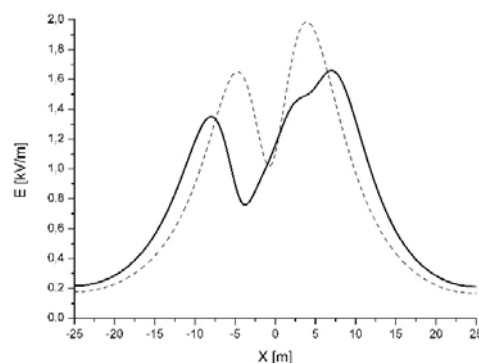
Na rysunku 10 przedstawiono rozkład natężenia pola elektrycznego dla linii napowietrznej 110 kV wykonanej w oparciu o konstrukcje wsporcze typu B2 przy

zastosowaniu potrójnych przewodów w każdej z faz ułożonych poziomo i odległych od siebie o 40 cm (jak na Rys. 5). Maksymalne natężenie pola elektrycznego dla tego przypadku wynosi $E_{max}=1,46$ kV/m w punkcie odległym o $x=+4,40$ m od osi linii. Zastosowanie dodatkowego trzeciego przewodu w każdym z torów prądowych nie przyniosło poprawy w postaci ograniczenia maksimum wartości natężenia pola elektrycznego. W wykonaniu trójprzewodowym maksymalne natężenie pola elektrycznego $E_{max}=1,46$ kV/m jest nawet minimalnie większe w stosunku do układu dwuprzewodowego gdzie $E_{max}=1,42$ kV/m.

Biorąc pod uwagę wyższe koszty wykonania i brak oczekiwanego efektu wzajemnej kompensacji pól składowych można stwierdzić że konfiguracja przewodów według wariantu III (jak na Rys. 5) jest ekonomicznie nieefektywna. Dalsze zwiększanie liczby przewodów w układzie płaskim również nie przyniosło oczekiwanych rezultatów technicznych i ekonomicznych.



Rys.11. Rozkład pola elektrycznego dla linii o konfiguracji przewodów jak na rysunku 6 (linia przerywana – rozkład dla podstawowej konfiguracji linii dla słupa typu B2)



Rys.12. Rozkład pola elektrycznego dla linii o konfiguracji przewodów jak na rysunku 7 (linia przerywana – rozkład dla podstawowej konfiguracji linii dla słupa typu B2)

Kolejny wariant przedstawiono na rysunku 11. Jest to linia 110 kV wykonana również w oparciu o konstrukcje wsporcze typu B2 ale z układem dodatkowych wsporników – odstępników. Zastosowano układ przewodów fazowych w wiązkach – przewody w ramach wiązki odległe od siebie o 1,80 m, a wiązki są uformowane w kształcie piramid z przeplotem faz (jak na Rys. 6). Przeanalizowano różne układy przeplotu faz oraz różne odległości między przewodami w piramidzie. Optymalny okazał się układ z rys. 6. Maksymalne natężenie pola elektrycznego dla tego

przypadku wynosi $E_{max}=1,35$ kV/m w punkcie odległym o $x=-6,20$ m od osi linii. Jest to co prawda wynik lepszy niż dla wariantu II, ale biorąc pod uwagę stopień komplikacji konstrukcji oraz stosunkowo niewielką poprawę w zakresie ograniczenia maksymalnego natężenia pola elektrycznego generowanego przez taką linię można stwierdzić, że wariant IV jest również nieefektywny ekonomicznie. Dodatkowo można przypuszczać, że ze względu na zmniejszone odległości pomiędzy przewodami różnych faz wzrosną pojemności międzyprzewodowe co w konsekwencji bezpośrednio przełoży się na wzrost strat w linii napowietrznej wykonanej w powyższy sposób.

Ostatni analizowany wariant to zmiana konstrukcji wsporczych – słupów z B2 na dedykowane dla linii dwutorowej słupy typu Pm DC240. Jednotorową linię 110kV rozdzielono na dwa równoległe tory jak na rysunku 7). Wyniki analiz przedstawiono na rysunku 12.

Maksymalne natężenie pola elektrycznego dla tego przypadku wynosi $E_{max}=1,66$ kV/m w punkcie odległym o $x=+7,00$ m od osi linii. I nie jest o wynik zadowalający. Przedstawiony wariant może być również wykorzystany w liniach dwutorowych, ale należy pamiętać, że w przypadku wyłączenia jednego z torów nastąpi istotna zmiana rozkładu natężenia pola elektrycznego – po stronie pracującego toru wystąpi znaczne podwyższenie natężenia pola względem pracy obu torów.

Przeprowadzona analiza wskazuje, że jednotorowa linia 110kV na słupie B2 wykonana w układzie tradycyjnym (rys.3) charakteryzuje się najwyższym natężeniem pola elektrycznego w stosunku do innych przeanalizowanych wariantów. W przypadku niekonwencjonalnych konfiguracji geometrycznych lokalizacji przewodów roboczych linii napowietrznej uzyskuje się efekt wzajemnej kompensacji generowanych przez nie pól składowych, jednak zawsze kosztem skomplikowania konstrukcji i wielokrotnienia liczby przewodów roboczych.

W tabeli 1 zebrano wyniki obliczeń szerokości pasa terenu, na którym występuje przekroczenia natężenia pola $E>1$ kV/m. pozwala to oszacować ewentualne korzyści z zastosowania zaproponowanych wariantów w różnych sytuacjach.

Tabela 1. Maksymalne natężenie pola elektrycznego oraz szerokość pasa terenu, w którym występuje przekroczenie $E>1$ kV/m

Wariant	E_{max} [kV/m]	X [m] gdzie $E>1$ kV/m
I	1,98	od -9,3 do +9,8
II	1,42	od -8,2 do -2,1
III	1,46	od -8,1 do -1,6
IV	1,35	od -10,4 do +8,3
V	1,66	od -1,2 do +11,8

Uwzględniając wszelkie koszty oraz stopień złożoności konstrukcji najbardziej optymalnym układem jest wariant II czyli wykonanie przewodów fazowych w formie podwójnych wiązek. Przy stosunkowo najmniejszej komplikacji konstrukcji uzyskuje się zarówno ograniczenie maksymalnego natężenia pola ok ok. 30% względem układu tradycyjnego, jak i blisko trzykrotne zmniejszenie szerokości pasa terenu pod linią, w którym natężenie pola elektrycznego przekracza wartość dopuszczalną $E=1$ kV/m (z ponad 19m do około 6m). Dodatkowo pas ten jest niesymetryczny po obu stronach linii co może pozwolić na lepsze wykorzystanie terenu np. przy zbliżeniu budynku do linii.



Rys13. Przykład zbliżenia budynku mieszkalnego do NLWN

Wnioski

Tereny w otoczeniu linii wysokiego napięcia, zwłaszcza w miastach są coraz częściej zagospodarowywane. Zaproponowane w niniejszej pracy rozwiązania mogą być jednym ze sposobów optymalizacji układu linii da uzyskania zmniejszenia oddziaływania na środowisko [4,5,6,7]. Zastosowanie dedykowanego rozwiązania technicznego geometrycznej konfiguracji przewodów roboczych pozwala na znaczące obniżenie natężenia składowej elektrycznej pola generowanego przez linię napowietzną 110 kV, ale jednocześnie podnosi koszty, stąd w gestii inwestora leży ocena uzyskanych korzyści ekologicznych w stosunku do poniesionych nakładów.

Autorzy: dr Dariusz Szafrowski, Katedra Energoelektryki, ul. Wybrzeże Wyspiańskiego 27, 50-370 Wrocław, E-mail: dariusz.szafrowski@pwr.edu.pl
 dr hab. inż. Paweł Bieńkowski, Politechnika Wrocławska, Katedra Telekomunikacji i Teleinformatyki, ul. Wybrzeże Wyspiańskiego 27, 50-370 Wrocław, E-mail: pawel.bienkowski@pwr.edu.pl
 mgr inż. Jacek Gumiela, Katedra Energoelektryki, ul. Wybrzeże Wyspiańskiego 27, 50-370 Wrocław, E-mail: jacek.gumiela@pwr.edu.pl

LITERATURA

- [1] Ustawa z dnia 27 kwietnia 2001 r. Prawo ochrony środowiska, *Dziennik Ustaw nr 62, poz. 627, 2001 (z późniejszymi zmianami)*
- [2] Rozporządzenie Ministra Środowiska w sprawie dopuszczalnych poziomów pól elektromagnetycznych w środowisku oraz sposobów sprawdzania dotrzymania tych poziomów z dnia 30.10.2003, *Dziennik Ustaw nr 192, poz. 1883, 2003*
- [3] Zeńczak M., Analiza pola elektrycznego i magnetycznego wokół linii elektroenergetycznych i wybranych urządzeń elektroenergetycznych, *Napędy i Sterowanie Nr 9 2001*
- [4] Szuba M. [i inni], Linie i stacje elektroenergetyczne w środowisku człowieka (Wydanie 4), *Biuro Konsultingowo-Menadżerskie EKO-MARK, Warszawa 2008*
- [5] <http://www.elektroinstalacje.info/>
- [6] Habrych M., Wróblewski Z., Tendencje w budowie wielotorowych linii elektroenergetycznych wysokiego napięcia w aspekcie oddziaływania pola elektromagnetycznego na środowisko, *V Konferencja Naukowo-Techniczna, Elektroenergetyczne sieci rozdzielcze – SIECI 2004, Wrocław (2004)*
- [7] Szafrowski D., Gumiela J., Wróblewski Z. Measuring analysis of the distribution of magnetic field free of errors resulting from fluctuation of currents. *Przegląd Elektrotechniczny. 92 (2016), nr 12, 45-48*