

# Analiza możliwości ograniczania natężenia składowej elektrycznej pola elektromagnetycznego przez zastosowanie dodatkowych przewodów w napowietrznych liniach elektroenergetycznych

**Streszczenie.** Jednym z ubocznych skutków towarzyszących pracy napowietrznych linii elektroenergetycznych jest emisja wokół przewodów roboczych pola elektromagnetycznego o niskiej częstotliwości, które składa się z dwóch składowych: elektrycznej oraz magnetycznej. W związku z potencjalnym oddziaływaniem pola elektromagnetycznego na środowisko, a w szczególności na organizmy żywe, dąży się do ograniczania natężenia występujących pól elektromagnetycznych. W odpowiednich aktach prawnych zostały określone wartości maksymalne, których przekroczenie mogłoby nieść potencjalnie niekorzystne skutki dla środowiska. W niniejszym artykule poddano obliczeniowej identyfikacji rozkład natężenia pola elektromagnetycznego generowanego przez linię napowietrzną 400 kV wyposażoną w dodatkowe elementy, których zadaniem jest ograniczenie emisji pola elektromagnetycznego pod przewodami.

**Abstract.** Abstract. One of the side effects of overhead power lines is the emission of a low-frequency electromagnetic field around working wires, which consists of two components: electrical and magnetic. In connection with the potential impact of electromagnetic field on the environment, and in particular on living organisms, it is strived to reduce the intensity of the existing electromagnetic fields. The relevant legal acts set maximum values that, if exceeded, could have potentially adverse effects on the environment. In this article the distribution of electromagnetic field strength generated by an overhead line 400 kV equipped with additional elements, whose task is to limit electromagnetic field emissions under wires, has been subject to computational identification. (*Analysis of the possibility of reduction of electrical fields intensity through use of the additional elements for overhead power lines*).

**Słowa kluczowe:** Linie napowietrzne wysokiego napięcia, pole elektryczne,

**Keywords:** Overhead power lines, electrical field.

## Wstęp

Linie elektroenergetyczne podczas przesyłu energii elektrycznej wytwarzają wokół torów prądowych pole elektromagnetyczne. Znajomość rozkładu składowej elektrycznej oraz magnetycznej natężenia pola elektromagnetycznego jest niezbędna do oceny oddziaływania na środowisko przez obiekty elektroenergetyczne. W wielu państwach dopuszczalne wartości graniczne są określone przez odpowiednie akty prawne. W Polsce takim dokumentem jest Rozporządzenie Ministra Środowiska w sprawie dopuszczalnych poziomów pól elektromagnetycznych w środowisku oraz sposobów sprawdzania dotrzymania tych poziomów [1].

Według tego dokumentu dopuszczalne natężenie dla składowej elektrycznej pola elektromagnetycznego nie może być wyższe niż:

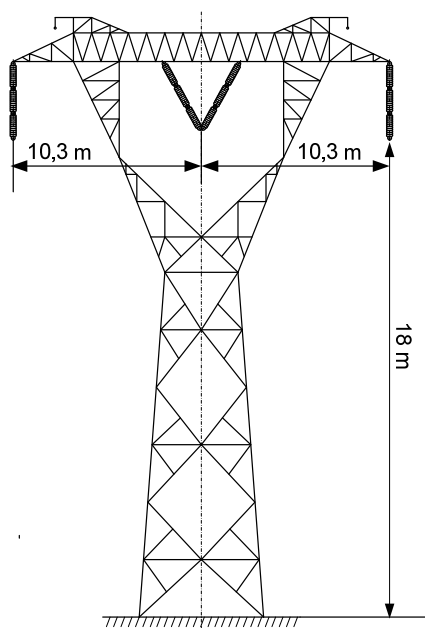
- 1 kV/m na obszarach zabudowy mieszkalnej,
- 10 kV/m na obszarach dostępnych dla ludności [1].

W tabeli 1 zestawiono typowe przedziały wartości natężenia pola elektrycznego generowanego podczas pracy przez obiekty elektroenergetyczne oraz napowietrzne linie przesyłowe o różnych poziomach napięć roboczych.

Tabela 1. Maksymalne wartości pola elektrycznego o częstotliwości 50 Hz wytwarzane przez obiekty elektroenergetyczne (wyznaczone dla wysokości  $h=2\text{m}$  nad poziomem ziemi)

Obiekt	Natężenie E [kV/m]
Pod liniami niskiego napięcia 0,4 kV	< 1,0
Pod liniami średniego napięcia 15-20 kV	< 1,0
Pod liniami wysokiego napięcia 110 kV	0,4 – 2,5
Pod liniami wysokiego napięcia 220 kV	1,0 – 6,0
Pod liniami wysokiego napięcia 400 kV	1,0 – 8,0
Po zewnętrznej stronie muru lub ogrodzenia stacji elektroenergetycznej wysokiego napięcia	< 0,5

Istnieje wiele metod stosowanych do obliczeniowej analizy rozkładu pola elektromagnetycznego, w których uwzględnia się źródła pola elektromagnetycznego. W przypadku składowej elektrycznej są różnice potencjałów pochodzące od ładunków elektrycznych. Natomiast w przypadku składowej magnetycznej są to poruszające się ładunki elektryczne. Poza elementami stanowiącymi źródła pól elektromagnetycznych uwzględnia się również inne elementy, takie jak np. konstrukcje wsporcze, przewody odgromowe, obiekty budowlane czy też elementy przyrody (drzewa, krzewy, wszelkie niejednorodności oraz osobliwości gruntu, na którym posadzone są obiekty elektroenergetyczne poddane analizie) [2]. Dawniej w powszechnym użyciu były sposoby obliczeniowej identyfikacji natężenia pola elektromagnetycznego bazujące



Rys. 1. Sylwetka słupa typu Y52 linii napowietrznej 400

na analitycznych rozwiązaniach zagadnień polowych ze szczególnym uwzględnieniem metody odbić zwierciadlanych jak również metody superpozycji.

Obecnie wykorzystuje się najczęściej metody elementów skończonych w różnych odmianach. Sprawdzają się one szczególnie dobrze w przypadku problemów o skomplikowanej geometrii, często dodatkowo pozbawionej symetrii, która pozwalałaby na zastosowanie pewnych uproszczeń podczas obliczeń numerycznych.

Umożliwia to zatem analizę dowolnie skomplikowanego przypadku linii napowietrznej bez względu na konfigurację oraz liczbę torów prądowych, przewodów odgromowych jak również pozostałych elementów, nawet tych nie należących do konstrukcji linii elektroenergetycznych.

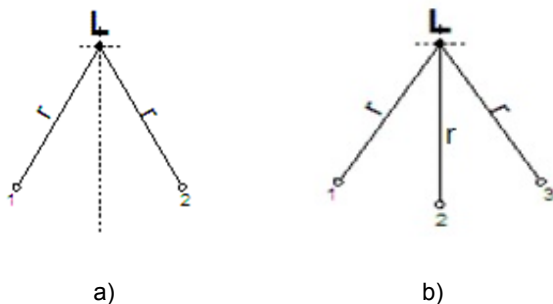
Na wartość natężenia składowej elektrycznej pola elektromagnetycznego osiąganego w otoczeniu linii napowietrznych wysokiego napięcia wpływają przede wszystkim następujące parametry:

- napięcie robocze linii,
- odległości pomiędzy przewodami fazowymi a ziemią,
- odstępy pomiędzy przewodami różnych faz lub wiązkami przewodów, jeśli w linii zastosowano przewody wiązkowe,
- geometryczny układ przewodów fazowych oraz wzajemne ich usytuowanie,
- pola przekrojów poprzecznych przewodów.

Ze względu na konieczność ograniczania w środowisku tzw. czynników szkodliwych, a za takie uważa się pole elektromagnetyczne podejmuje się szereg zabiegów zmierzających do eliminacji lub choćby ograniczenia obecności składowej elektrycznej oraz magnetycznej pola elektromagnetycznego. Oddziaływanie pól oraz fal elektromagnetycznych na organizm człowieka nie jest obojętne. Wolnozmiennne pola elektromagnetyczne już przy natężeniach spotykanych w sąsiedztwie linii najwyższych napięć mogą powodować mierzalne zmiany w organizmach żywych.

Znane są praktyczne sposoby kształtowania rozkładu pola elektrycznego wytwarzanego przez przewody robocze jednotorowych linii napowietrznych, jednak złożoność zjawisk towarzyszących przesyłowi energii elektrycznej za pośrednictwem napowietrznych linii elektroenergetycznych powoduje konieczność każdorazowej weryfikacji uzyskanych wyników.

Rozwiązanie polegające na umieszczeniu dodatkowego uziemionego przewodu w odstępie zapewniającym bezpieczną przerwę izolacyjną pod każdym z przewodów (lub wiązek) roboczych linii powoduje najsilniejsze ograniczenie natężenia pola elektrycznego w kierunku pionowym w obszarze poniżej dodatkowych uziemionych przewodów.



Rys.2. Rozmieszczenie dodatkowych uziemionych przewodów względem wiązki przewodów roboczych w powiększeniu, a) 2 dodatkowe przewody, b) 3 dodatkowe przewody

Słabszy efekt ograniczenia natężenia pola elektrycznego uzyskuje się w kierunku poziomym prostopadłym do osi linii elektroenergetycznej. Ze względu na potencjalne możliwości tkwiące w zagospodarowaniu i zabudowie terenów sąsiadujących z liniami napowietrznymi istotne byłoby doprowadzenie tego obszaru do stanu, w którym występujące tam czynniki środowiskowe (tu: natężenie pola elektrycznego) nie przekraczałyby wartości dopuszczonych odpowiednimi aktami prawnymi. Co istotne, opisana powyżej metoda nie wiąże się z poniesieniem dodatkowych nadmiernych kosztów, zatem jest względnie tania i możliwa do adaptacji w dowolnych warunkach.

Innym rozwiązaniem może być zastosowanie osobnej wolnostojącej konstrukcji zlokalizowanej równolegle do osi linii elektroenergetycznej, na której przy zachowaniu wymaganych minimalnych bezpiecznych odstępów izolacyjnych na odpowiedniej wysokości umieszcza się uziemiony przewód lub też zespół przewodów mających za zadanie wprowadzenie do takiego układu potencjału zerowego, który sprawia, że na części obszaru graniczącego z taką konstrukcją natężenie pola elektrycznego jest znacznie niższe niż w przypadku braku takiej konstrukcji. Rozwiązanie takie jest jednak znacznie droższe w budowie oraz w znaczący sposób wpływa na dodatkowe pogorszenie walorów krajobrazowych. Ten czynnik może być również istotny w przypadku starania się o warunki zabudowy lub akceptację dokumentacji projektowej podczas budowy lub modernizacji linii elektroenergetycznej jak również w przypadku chęci zabudowy gruntów graniczących z pasem technologicznym linii. Ze względu na stopień ograniczenia natężenia składowej elektrycznej pola ten sposób może być jednak bardzo skuteczny pod warunkiem wykonania odpowiednio gęstej przewodzącej konstrukcji stojącej na drodze linii sił pola elektrycznego.

W przypadku napowietrznych linii wielotorowych istnieje ponadto możliwość odpowiedniej konfiguracji przestrzennej poszczególnych faz oraz całych torów prądowych względem siebie w sposób umożliwiający wzajemną kompensację generowanych pól składowych, co sprawia, że wypadkowe natężenie pola elektrycznego może ulec znacznemu obniżeniu. W praktyce efekt ten jest często wykorzystywany, ponieważ daje widoczny efekt w postaci zmniejszonego obciążenia środowiska polem elektromagnetycznym niskiej częstotliwości przy niewielkim nakładzie kosztów oraz pracy związanej z analizą obliczeniową, a następnie z doбором optymalnego rozwiązania [3].

W niniejszej pracy autorzy postanowili dokonać obliczeniowej identyfikacji rozkładu natężenia pola elektrycznego, a następnie poddać analizie przypadek jednotorowej linii 400 kV o przewodach roboczych w formie wiązek rozmieszczonych w układzie poziomym na słupie przelotowym typu Y2 wyposażonych dodatkowo w zespół dwóch oraz trzech dodatkowych uziemionych przewodów umieszczonych w odległości 6m od torów prądowych linii. Symulacje cyfrowe wykonano przy pomocy metody elementów skończonych, a następnie dokonano analizy uzyskanych wyników.

Bezpośrednim wynikiem działania aplikacji komputerowej bazującej na metodzie elementów skończonych jest tablica z potencjałami elektrycznymi w wybranych punktach przestrzeni. Ponieważ natężenie pola elektrycznego potencjalnego jest gradientem potencjału ze znakiem minus to znając odległości między punktami oraz ich potencjały można wyliczyć natężenie pola elektrycznego. Gradient jest operacją przyporządkowującą polu skalarnemu  $V$  pole wektorowe  $\text{grad}(V)$ . Gradient  $V$  jest pochodną funkcji  $V$  w kierunku jej największego wzrostu.

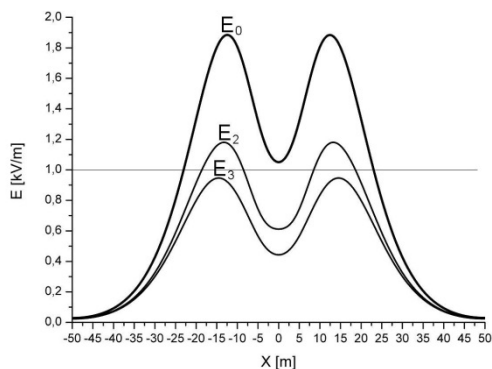
Wektor natężenia pola w dowolnym punkcie jest prostopadły do przechodzącej przez ten punkt powierzchni ekwipotencjalnej (tzn. takiej, która łączy punkty o tym samym potencjale elektrycznym). W istocie obierając na powierzchni ekwipotencjalnej ( $dV=0$ ) dwa punkty P1 i P2 w odległości  $dl$  otrzymuje się  $E \cdot dl = -dV=0$ , co przy założeniu, że moduł wektorów  $E$  oraz  $dl$  są niezerowe zachodzi tylko wtedy gdy oba te wektory są wzajemnie prostopadłe [4][5].

Przy odpowiednim zagęszczeniu węzłów siatki elementów skończonych udaje się uzyskać w ten sposób zadowalającą dokładność obliczeń natężenia pola elektrycznego w dowolnym punkcie analizowanej przestrzeni.

### Analiza natężenia pola elektromagnetycznego pod linią napowietrzną 400 kV dla różnych wariantów konstrukcji

Jako punkt odniesienia do dalszych rozważań posłużył przypadek typowej linii napowietrznej 400 kV zbudowanej na słupach przelotowych typu Y52 (Rys. 1). Dodatkowo poddano analizie dwa warianty linii z dodatkowymi dwoma (Rys. 2 a) lub trzema (Rys. 2 b) uziemionymi przewodami zawieszonymi na konstrukcji słupa poniżej przewodów roboczych równoległych do osi linii.

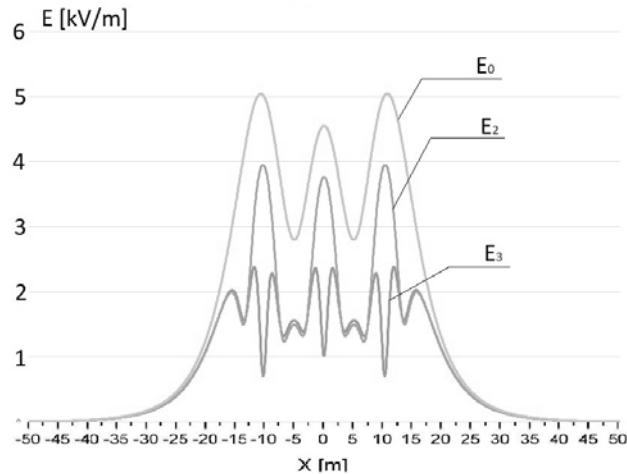
Tory prądowe zbudowane są w postaci podwójnej wiązki przewodów aluminiowych ze stalowym rdzeniem nośnym typu AFL-8-350 mm<sup>2</sup>, natomiast dodatkowe uziemione przewody ochronne umieszczono w odległości 6 m licząc od osi każdego z trzech torów prądowych poszczególnych faz. Wykonanie z rysunku (Rys. 2 a) składa się z dwóch dodatkowych przewodów ochronnych na fazę rozmieszczonych symetrycznie na planie okręgu o promieniu 6 m, pod kątem 15 stopni licząc od pionowej osi przechodzącej przez środek symetrii każdego z torów prądowych. Wykonanie z rysunku (Rys. 2 b) składa się z trzech dodatkowych przewodów ochronnych. Dwa z nich umieszczone są tak jak w wariancie z rysunku (Rys. 2 a) oraz z dodatkowego przewodu zlokalizowanego w odległości 6 m pionowo w dół w osi każdego z torów prądowych. Wyniki obliczeniowej identyfikacji rozkładu natężenia pola elektrycznego w otoczeniu badanej linii napowietrznej 400 kV przedstawiono na rysunku (Rys. 3).



Rys. 3 Rozkład pola elektrycznego na wysokości  $h=2$  m nad poziomem ziemi dla poszczególnych konfiguracji przewodów

W wersji podstawowej maksymalne natężenie pola elektrycznego zarejestrowanego na wysokości  $h=2$  m nad poziomem gruntu wynosiło  $E_{max}=1,88$  kV/m. Po zastosowaniu dwóch dodatkowych uziemionych elementów:  $E_{max}=1,18$  kV/m, natomiast w przypadku zastosowania trzech dodatkowych uziemionych elementów:  $E_{max}=0,94$  kV/m. Widać zatem wyraźnie, że wprowadzenie do konstrukcji linii napowietrznej dodatkowych elementów trwale połączonych z uziemieniem wpływa na obniżenie

natężenia pola elektrycznego, przy czym większa ich liczba wpływa w większym stopniu na wypadkową wartość natężenia pola elektrycznego, co pozwala na zredukowanie wpływu liniowego obiektu elektroenergetycznego na środowisko.



Rys. 4 Rozkład pola elektrycznego na wysokości  $h=11$  m nad poziomem ziemi dla poszczególnych konfiguracji przewodów

Dodatkowo autorzy dokonali identyfikacji natężenia pola elektrycznego na poziomie  $h=11$  m ponad poziomem gruntu. Graficzną reprezentację wyników w wybranym przekroju poprzecznym przedstawiono na rysunku (Rys. 4). Tutaj daje się zauważyć wyższą wartość maksymalnego natężenia składowej elektrycznej. Wyraźnie zaznaczone maksima natężenia pola elektrycznego odpowiadają lokalizacji torów prądowych analizowanej linii napowietrznej. Dla wariantu linii napowietrznej wyposażonej w trzy dodatkowe uziemione przewody służące do ochrony przed polem elektrycznym daje się również wyraźnie zauważyć obecność środkowego przewodu dodatkowego. Poniżej, dokładnie w jego osi, występuje lokalne minimum natężenia pola elektrycznego. Oznacza to silny wpływ wnoszonego przez uziemiony przewód dodatkowy potencjału ziemi na wypadkowy rozkład pola elektrycznego oraz zmianę linii sił jego oddziaływania. W odległości około 21,0 m licząc od osi linii natężenie pola elektrycznego na wysokości  $h=11$  m bez względu na zastosowanie dodatkowych przewodów nie przekracza wartości 1 kV/m, co może być istotne w przypadku lokalizacji wyższej zabudowy w otoczeniu takiej linii.

### Podsumowanie

1. Umieszczenie w sąsiedztwie przewodów roboczych dodatkowych uziemionych elementów przewodzących powoduje ograniczenie wypadkowego natężenia składowej elektrycznej pola elektromagnetycznego w strefie znajdującej się pomiędzy przewodami fazowymi a powierzchnią ziemi.

2. Konfiguracja geometryczna przewodów roboczych linii elektroenergetycznej wraz z dodatkowymi uziemionymi elementami oraz ich liczba wpływa na kształt linii sił pola elektrycznego, zatem również na jego rozkład oraz natężenia w poszczególnych punktach badanego przekroju poprzecznego. Na podstawie przeprowadzonych analiz z wykonanych symulacji cyfrowych dokonano doboru takiego układu, dzięki któremu możliwe jest ograniczenie maksymalnego natężenia pola elektrycznego rejestrowanego na wysokości  $h=2$  m nad poziomem ziemi do dopuszczalnych wartości nieprzekraczających 1 kV/m.

3. Zwiększenie liczby dodatkowych uziemionych elementów przewodzących wpływa na zmniejszenie maksymalnych wartości natężenia pola elektrycznego w strefie ich oddziaływania w kierunku zewnętrznym patrząc od osi napowietrznej linii elektroenergetycznej. Dzięki temu możliwy jest dobór takiej liczby oraz konfiguracji tych dodatkowych elementów przewodzących aby uzyskać pożądany efekt ograniczenia natężenia składowej elektrycznej pola elektromagnetycznego w wybranym obszarze sąsiadującym z linią elektroenergetyczną.

**Autorzy:** mgr inż. Jacek Gumiela, Politechnika Wroclawska, Katedra Energoelektryki, ul. Wybrzeże Wyspiańskiego 27, 50-370 Wrocław, E-mail: [jacek.gumiela@pwr.edu.pl](mailto:jacek.gumiela@pwr.edu.pl); dr Dariusz Sztafrowski, Politechnika Wroclawska, Katedra Energoelektryki, ul. Wybrzeże Wyspiańskiego 27, 50-370 Wrocław, E-mail: [dariusz.sztafrowski@pwr.edu.pl](mailto:dariusz.sztafrowski@pwr.edu.pl).

## LITERATURA

- [1] Rozporządzenie Ministra Środowiska w sprawie dopuszczalnych poziomów pól elektromagnetycznych w środowisku oraz sposobów sprawdzania dotrzymania tych poziomów, 30 października, 2003
- [2] Gumiela J., Sztafrowski D., Application of additional grounded wires in high voltage overhead power lines to reduce the intensity of electric field generated by phase wires, Przegląd Elektrotechniczny, R. 94, nr 3, 2018
- [3] Wróblewski Z., Sztafrowski D., Gumiela J., The review of engineering solutions of overhead power lines and analysis of possibilities of reduction of electromagnetic fields, Proceedings of Electrotechnical Institute, No 63 (273), 2016
- [4] Bajorski Z., Dołycki S., Kurdziel R., Skopec A., Elektryczność i magnetyzm, Wydawnictwo Politechniki Wroclawskiej, Wrocław, 1977
- [5] Sadiku M. I., Numerical Techniques in Electromagnetics, Second edition, CRC Press, Boca Raton London New York Washington, D.C. 2001