

# Oddziaływanie elektromagnetyczne linii przesyłowych 400 kV na środowisko – analiza i metody jego redukcji

Rafał Tarko , Jakub Gajdzica , Wiesław Nowak 

AGH Akademia Górniczo-Hutnicza, Wydział Elektrotechniki, Automatyki, Informatyki i Inżynierii Biomedycznej, Kraków

---

**Streszczenie:** Celem artykułu jest analiza możliwości redukcji szerokości stref oddziaływania pola elektrycznego przez zmianę parametrów projektowych linii elektroenergetycznych określających przestrzenne rozmieszczenie jej przewodów. Analizę tę przeprowadzono z zastosowaniem opracowanych i zweryfikowanych eksperymentalnie modeli do wyznaczania pola elektrycznego w otoczeniu linii. Modele obliczeniowe wykorzystano do badań szerokości stref oddziaływania pola elektrycznego jedno- i dwutorowych linii elektroenergetycznych 400 kV. Badania potwierdziły możliwość znacznej redukcji szerokości stref oddziaływania pola elektrycznego dzięki odpowiedniemu wyborowi kluczowych parametrów projektowych i konstrukcyjnych linii. Sformułowane wnioski słuszne są nie tylko w odniesieniu do linii 400 kV, ale także wskazują na kierunki zmian parametrów linii o innych napięciach znamionowych (powyżej 100 kV).

**Słowa kluczowe:** korytarz infrastrukturalny, napowietrzne linie elektroenergetyczne, pole elektryczne, modelowanie, redukcja pola elektrycznego, projektowanie linii elektroenergetycznych

## ELECTROMAGNETIC ENVIRONMENTAL IMPACT OF 400 KV TRANSMISSION LINES – ANALYSIS AND METHODS OF ITS REDUCTION

**Abstract:** The aim of this paper is to analyze the possibilities of reducing the width of electric field influence zones by changing the design parameters of power lines and defining the spatial distribution of its conductors. This analysis was carried out using the developed and experimentally verified models for determining the electric field. The computational models were used to analyze the width of the electric field influence zones of single and double circuit 400 kV power lines. The analyses confirmed that the width of the electric field influence zones can be significantly reduced if the most important design and construction parameters of the line are properly selected. The obtained conclusions are valid not only for 400 kV lines, but also set directions to follow when changing the parameters of high voltage transmission lines of other rated voltages (above 100 kV).

**Keywords:** right of way, overhead lines, electric field, modeling, electric field reduction, overhead line design

## 1. Wstęp

Ograniczanie negatywnego oddziaływania napowietrznych linii elektroenergetycznych wysokich i najwyższych napięć na środowisko jest zagadnieniem wieloaspektowym. Działania mające na celu redukcję tych oddziaływań podejmowane są praktycznie rzecz biorąc od początków przesyłania i dystrybucji energii elektrycznej – zmieniają się jedynie kierunki i priorytety działań, które dostosowuje się do aktualnych problemów technicznych, prawnych, ekonomicznych oraz ekologicznych. Wśród tych problemów szczególne znaczenie ma obecnie zagadnienie korytarzy infrastrukturalnych (korytarzy przesyłowych) jako wyodrębnionych pod względem prawnym terenów, niezbędnych do posadowienia i eksploatacji linii elektroenergetycznych. Jednym z obszarów takiego korytarza jest strefa oddziaływania linii elektroenergetycznej rozumiana jako powierzchnia części nieruchomości, na której prawo własności doznaje uszczerbku z uwagi na ograniczenia w zagospodarowaniu terenu oraz konieczność zapewnienia bezpieczeństwa osób i mienia.

Podstawowym czynnikiem, który determinuje szerokość strefy oddziaływania linii elektroenergetycznej, jest emisja do środowiska pola elektromagnetycznego. Rosnąca świadomość społeczeństwa w zakresie ekologii jest powodem niesłabnącego zainteresowania zagadnieniem negatywnego wpływu napowietrznych linii elektroenergetycznych wysokich i najwyższych napięć na środowisko. Z tego względu od wielu już lat funkcjonują obostrzenia prawne, w szczególności dotyczące składowej elektrycznej oraz składowej magnetycznej pola elektromagnetycznego o częstotliwości sieciowej 50 Hz albo 60 Hz. Parametrami charakteryzującymi te składowe są natężenie pola elektrycznego (kV/m) oraz indukcja magnetyczna ( $\mu\text{T}$ ). W 1998 roku International Commission on Non-Ionizing Radiation Protection wydała wytyczne (ICNIRP 1998), w których określono dopuszczalne wartości tych składowych na poziomie  $E = 5 \text{ kV/m}$  oraz  $B = 100 \mu\text{T}$ . Wartości te zostały przyjęte w większości krajów, jak również są zalecane w wydanej w 1999 roku rekomendacji Unii Europejskiej (*Council Recommendation...* 1999). Mimo to w niektórych krajach obowiązują lokalne regulacje prawne (Stam 2017), w których wartości dopuszczalne pól elektrycznych i magnetycznych są zarówno większe, jak i mniejsze od wartości zalecanych w dokumentach międzynarodowych. Przykładami takich odstępstw są wymagania w krajach wymienionych w tabeli 1. Należy również nadmienić, że w 2010 roku International Commission on Non-Ionizing Radiation Protection opublikowała nowe wytyczne (ICNIRP 2010), w których zwiększona została dopuszczalna wartość indukcji pola magnetycznego z  $100 \mu\text{T}$  do  $160 \mu\text{T}$ .

Przedmiotem artykułu jest analiza wpływu parametrów projektowych linii elektroenergetycznych, określających przestrzenne rozmieszczenie jej przewodów, na szerokości stref  $S_{E5}$  oraz  $S_{E1}$  oddziaływania pola elektrycznego (rys. 1).

**Tabela 1**

Dopuszczalne wartości graniczne składowej elektrycznej i magnetycznej pola elektromagnetycznego w wybranych krajach na terenach przeznaczonych do zamieszkania

Państwo	50 Hz	
	natężenie pola elektrycznego [kV/m]	indukcja magnetyczna [ $\mu$ T]
Chiny	4,0	100
Chorwacja	2,0	40
Czechy	2,0	200
Japonia	3,0	200
Polska	1,0	75
Rosja	0,5	5
Słowenia	0,5	10
Wielka Brytania	9,0	360

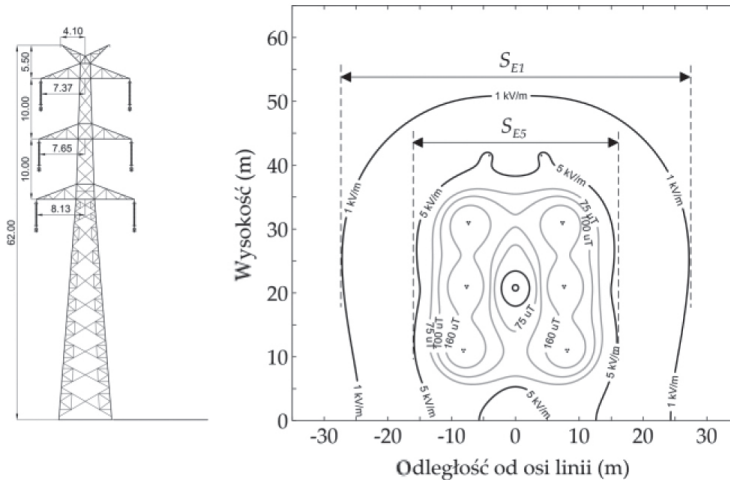
Źródło: opracowanie własne na podstawie Stam (2017)

## 2. Pole elektryczne i magnetyczne w otoczeniu linii przesyłowych

Na wielkość emisji pola elektromagnetycznego wpływa wiele czynników, wśród których podstawowe znaczenie ma napięcie znamionowe oraz obciążenie prądowe linii. Drugim, równie istotnym, czynnikiem jest rozmieszczenie przestrzenne przewodów fazowych i odgromowych linii, które wynika z kształtu zastosowanych konstrukcji wsporczych i łańcuchów izolatorowych. Zasięg strefy oddziaływania elektromagnetycznego wynika z przestrzennego rozkładu pola elektrycznego oraz pola magnetycznego i ograniczony jest miejscem występowania założonych wartości dopuszczalnych (rys. 1).

Rysunek 1 przedstawia izolinie obrazujące referencyjne wartości natężenia pola elektrycznego wynoszące 5 kV/m oraz 1 kV/m, a także izolinie pola magnetycznego dla referencyjnych wartości indukcji magnetycznej: 160  $\mu$ T, 100  $\mu$ T i 75  $\mu$ T. Izolinie te zostały wyznaczone dla najwyższego napięcia roboczego linii 420 kV, największej dopuszczalnej obciążalności prądowej linii 2500 A oraz najmniejszej odległości przewodów fazowych od ziemi wynoszącej 11,0 m. Z rysunku 1 wynika, że obszary ograniczone wartościami indukcji magnetycznej 75  $\mu$ T, 100  $\mu$ T oraz 160  $\mu$ T zawierają się w strefie, w której wartości natężenia pola elektrycznego są większe od 5 kV/m.

Z tego powodu o szerokości strefy oddziaływania elektromagnetycznego linii elektroenergetycznej decyduje składowa elektryczna pola elektromagnetycznego – szerokość  $S_{E5}$  oraz szerokość  $S_{E1}$  na rysunku 1. Stwierdzenie to jest prawdziwe nie tylko w przypadku rozwiązań przedstawionych poniżej, ale może być uogólnione również w odniesieniu do innych konstrukcji linii elektroenergetycznych najwyższych napięć.



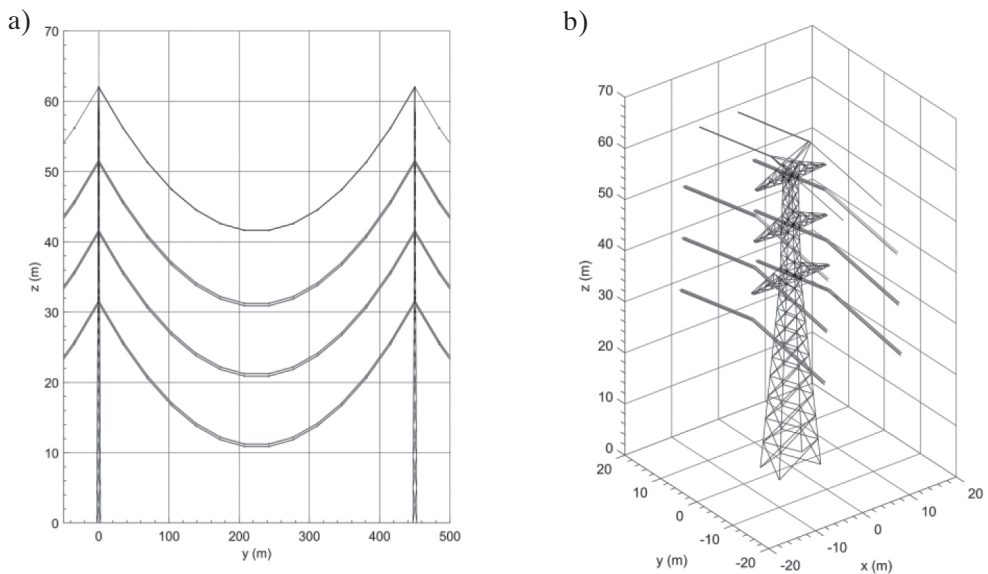
**Rys. 1.** Przykładowe obrazy pola elektrycznego i pola magnetycznego oraz szerokości stref oddziaływania w przekroju poprzecznym dwutorowej linii 400 kV:  $S_{E5}$ ,  $S_{E1}$  – szerokości strefy oddziaływania pola elektrycznego dla wartości dopuszczalnych 5 kV/m oraz 1 kV/m

Pole elektryczne napowietrznych linii elektroenergetycznych jest silnie niejednostajne, a największe jego wartości występują na powierzchniach przewodów. W przypadku gdy wartości te przekroczą natężenie początkowe jonizacji powietrza, w otoczeniu przewodów wystąpi zjawisko ulotu elektrycznego. Jednym z zasadniczych czynników decydujących o powstawaniu ulotu i jego intensywności jest konstrukcja przewodów fazowych linii. Wartości natężenia pola elektrycznego na powierzchniach przewodów fazowych można zmniejszyć przez stosowanie wiązek przewodowych. Jednym z negatywnych skutków ulotu elektrycznego jest hałas (szum akustyczny). Zagadnienia analizy skutków ulotu elektrycznego nie są jednak przedmiotem niniejszego artykułu.

### 3. Model do analizy pola elektrycznego linii elektroenergetycznych wysokich napięć

W otoczeniu napowietrznych linii elektroenergetycznych wysokiego napięcia występuje pole elektromagnetyczne. Przy częstotliwości sieciowej  $f = 50$  Hz składowa elektryczna tego pola może być rozpatrywana niezależnie od składowej magnetycznej.

Kolejnym uproszczeniem jest założenie bezwirowości pola elektrycznego o częstotliwości sieciowej, co pozwala zastosować do analizy pola elektrycznego prawa elektrostatyki (El Dein 2014, Griffiths 2017). W ogólnym ujęciu podstawą obliczeń są równania wiążące natężenie pola elektrycznego  $\mathbf{E}$  z ładunkami elektrycznymi  $Q$  zgromadzonymi na elementach rozważanego układu i z ich rozmieszczeniem w przestrzeni. W przypadku równań pola elektrycznego w otoczeniu napowietrznych linii elektroenergetycznych szczególne znaczenie ma metoda ładunków symulowanych (Li i in. 2015, Rącz i Németh 2021). W metodzie tej zastępuje się rzeczywisty rozkład ładunków na powierzchniach przewodników o znanych wartościach potencjałów zbiorem ładunków fikcyjnych (symulujących) tak, aby pole elektryczne wywołane tymi ładunkami było identyczne z polem rzeczywistym. Jako ładunki symulujące przyjmuje się najprostsze pod względem geometrycznym elementy, między innymi ładunki liniowe, rozłożone równomiernie na odcinku linii prostej. Na rysunku 2 przedstawiono sposób odwzorowania przewodów przykładowego przęsła (rys. 2a) oraz konstrukcji wsporczej dwutorowej linii 400 kV (rys. 2b).



**Rys. 2.** Sposób odwzorowania przykładowej dwutorowej linii 400 kV do metody ładunków symulowanych: a) przewodów przęsła; b) konstrukcji wsporczej

Przedstawiona linia wyposażona jest w sześć przewodów fazowych wykonanych jako wiązki trójprzewodowe (łącznie 18 przewodów) oraz dwa przewody odgromowe. Kształt krzywej łańcuchowej każdego z przewodów linii aproksymowano 13 odcinkami prostoliniowymi. Konstrukcja wsporcza została natomiast odwzorowana w postaci zbioru 352 odcinków reprezentujących kształtowniki tworzące siatkę przestrzenną bryły stupa. Potencjały odcinków aproksymujących przewody fazowe są równe napięciom

fazowym linii, a potencjały odcinków aproksymujących przewody odgromowe oraz konstrukcję wsporcza są równe zero.

W obliczeniach stosowana jest metoda odbić lustrzanych i zasada superpozycji potencjału, na podstawie której można dla zbioru  $n$  ładunków rozłożonych równomiernie na odcinkach aproksymujących (rys. 2) zapisać układ równań:

$$v_i(t) = \sqrt{2}U_i \sin(2\pi ft + \varphi_i) = \sum_{j=1}^n (\alpha_{ij} - \beta_{ij}) q_j(t), \quad i = 1, \dots, n \quad (1)$$

gdzie:  $v_i(t)$  – potencjał chwilowy  $i$ -tego odcinka aproksymującego,  $U_i$  – wartość skuteczna napięcia fazowego  $i$ -tego odcinka aproksymującego,  $f$  – częstotliwość napięcia,  $\varphi_i$  – faza napięcia,  $q_j(t)$  – ładunek  $j$ -tego odcinka aproksymującego,  $\alpha_{ij}$  – współczynnik potencjalny pomiędzy odcinkiem  $i$ -tym a  $j$ -tym,  $\beta_{ij}$  – współczynnik potencjalny pomiędzy odcinkiem  $i$ -tym a odbiciem lustrzanym odcinka  $j$ -tego.

W równaniu (1) znane są potencjały  $v_i(t)$  odcinków aproksymujących, a współczynniki potencjalne  $\alpha_{ij}$  oraz  $\beta_{ij}$  oblicza się na podstawie geometrii tych odcinków w przyjętym układzie współrzędnych, wykorzystując następujące zależności:

$$\alpha_{ij} \quad \text{lub} \quad \beta_{ij} = \frac{1}{4\pi\epsilon_0 l_i l_j} \int_{l_i} \int_{l_j} \frac{dl_i \cdot dl_j}{r} \quad (2)$$

gdzie:  $r$  – odległość między elementami  $dl_i$  i  $dl_j$  przewodów o długościach  $l_i$  i  $l_j$ . Nieznane ładunki  $q(t)$  wyznacza się, rozwiązując równanie (1). Ładunki  $q_i(t)$  – jako kombinacje liniowe funkcji harmonicznym o tej samej pulsacji  $\omega$  – są funkcjami harmonicznymi o postaci:

$$q_i(t) = Q_i \sin(\omega t + \Theta_i), \quad i = 1, \dots, n \quad (3)$$

Ładunki odcinków w równaniu (3) pozwalają na podstawie zasady superpozycji wyznaczyć potencjał  $v_B$  pola elektrycznego w punkcie  $B(x, y, z)$  w otoczeniu linii elektroenergetycznej:

$$v_B(x, y, z, t) = \sum_{i=1}^n [\alpha_{Bi}(x, y, z) - \beta_{Bi}(x, y, z)] \cdot q_i(t) \quad (4)$$

gdzie  $\alpha_{Bi}$  ( $\beta_{Bi}$ ) jest współczynnikiem potencjalnym pomiędzy punktem  $B$  a odcinkiem (odbiciem lustrzanym odcinka)  $i$ -tego. Współczynnik ten wynika wprost z zależności (2):

$$\alpha_{Bi} (\beta_{Bi}) = \frac{1}{4\pi\epsilon_0 l_i} \int_{l_i} \frac{dl_i}{r} \quad (5)$$

gdzie  $r$  jest odległością między elementem  $dl_i$   $i$ -tego przewodu o długości  $l_i$  a punktem  $B$ .

Wektor natężenia pola elektrycznego w punkcie  $B$  jest gradientem potencjału w zależności (4):

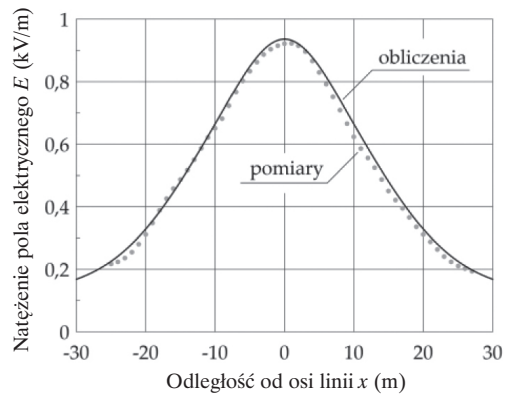
$$\mathbf{E} = -\text{grad } v_B(x, y, z, t) \quad (6)$$

W celu weryfikacji przedstawionego modelu pola elektrycznego przeprowadzono pomiary pod dwutorową linią 220 kV (rys. 3a). Wykazały one dobrą zgodność zmierzonych i obliczonych wartości natężenia pola elektrycznego (rys. 3b), co potwierdziło nie tylko zasadność przyjętych założeń, ale również możliwość użycia tego modelu w dalszych badaniach redukcji stref oddziaływania pola elektrycznego napowietrznych linii elektroenergetycznych.

a)



b)



Rys. 3. Weryfikacja pomiarowa modelu pola elektrycznego pod dwutorową linią 220 kV:

a) fragment przęsła w miejscu pomiarów; b) porównanie rozkładów zmierzonego i obliczonego w przekroju poprzecznym linii na wysokości 2 m

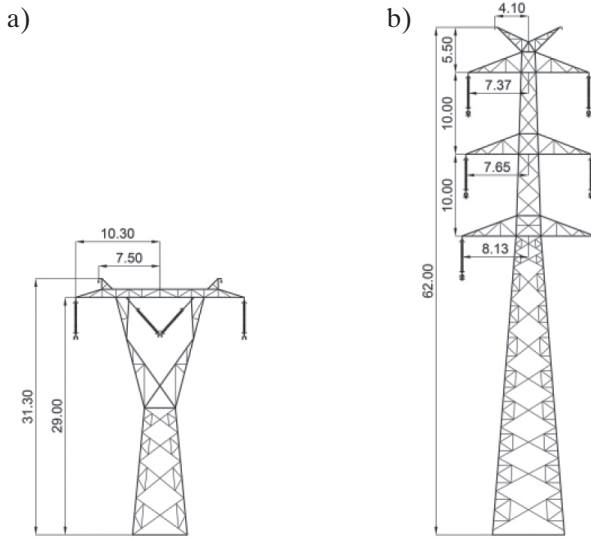
## 4. Wyniki badań

Przedstawiony w rozdziale 3 model obliczeniowy wykorzystano do badań szerokości stref  $S_{E5}$  i  $S_{E1}$  oddziaływania pola elektrycznego jedno- i dwutorowych linii elektroenergetycznych 400 kV (rys. 4).

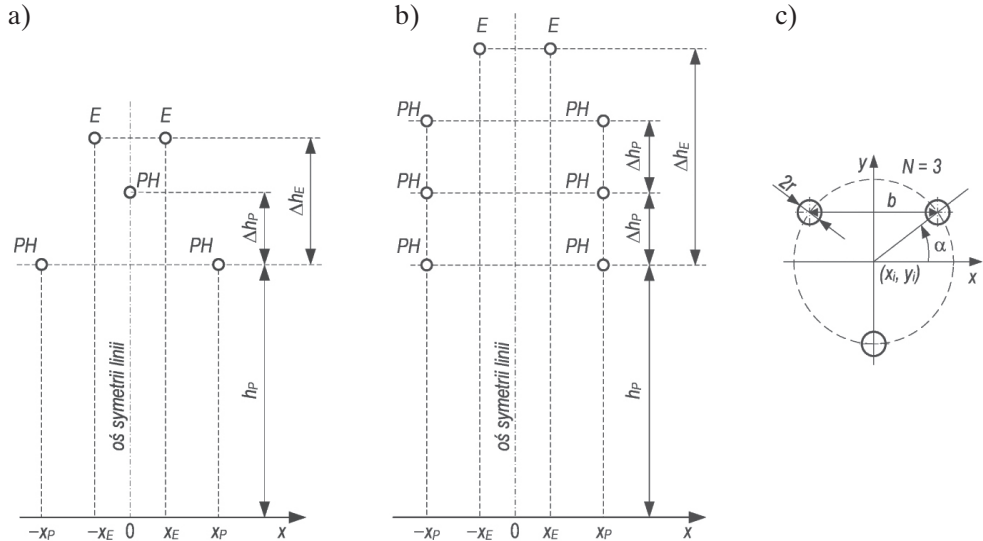
W celu analizy możliwości redukcji oddziaływania pola elektrycznego określono parametry konstrukcyjne (rys. 5) mające istotne znaczenie dla szerokości stref  $S_{E1}$  oraz  $S_{E5}$ . Badania miały określić wpływ zmian wartości tych parametrów na możliwości redukcji stref  $S_{E1}$  oraz  $S_{E5}$ .

Parametry przedstawione na rysunku 5 można podzielić na trzy grupy. Pierwsza grupa obejmuje parametry  $x_p$ ,  $h_p$  oraz  $\Delta h_p$ , które określają układ geometryczny przewodów fazowych w przekroju poprzecznym linii. Razem ze zwisem przewodów (parametr  $f_p$ ) tworzą układ dający pełną informację na temat lokalizacji przewodów fazowych w danym

przekroju poprzecznym linii. Wartości parametrów  $h_P$  i  $f_P$  są ściśle powiązane z wymaganą odległością przewodów od ziemi. Do drugiej grupy należą parametry  $x_E$  oraz  $\Delta h_E$ , które razem ze zwisem przewodów odgromowych (parametr  $f_E$ ) określają rozmieszczenie przewodów odgromowych. Natomiast grupę trzecią stanowią parametry  $N$  i  $b$  charakteryzujące budowę wiązki przewodów fazowych (rys. 5c).



Rys. 4. Konfiguracja jednorodnej linii 400 kV (a) oraz dwutorowej linii 400 kV (b)



Rys. 5. Analizowane parametry konstrukcji linii 400 kV: a) linia jednorodna; b) linia dwutorowa; c) budowa przewodu fazowego



Zakres zmian wartości wymienionych parametrów wynika z wymagań normatywnych (EN-50341-1:2012) określających bezpieczne odstępstwa izolacyjne, które są determinowane napięciem znamionowym oraz warunkami przepięciowymi i środowiskowymi.

Przeprowadzone badania wykazały, że parametrem decydującym o szerokości strefy oddziaływania pola elektrycznego jest  $x_p$ . Zmniejszanie jego wartości pozwala uzyskać redukcję szerokości stref oddziaływania nawet o około 21–31%. Dotyczy to zarówno linii jedno-, jak i dwutorowych. W przypadku linii jednotorowych istotny wpływ na szerokości stref ma również parametr  $\Delta h_p$ . Zwiększanie jego wartości pozwala na dalsze zmniejszanie wartości parametru  $x_p$ , co łącznie umożliwia redukcję szerokości stref oddziaływania pola elektrycznego nawet o około 42–50%. Wynika z tego, że w przypadku linii jednotorowych trójkątny układ przewodów fazowych jest – pod względem oddziaływania na środowisko – zdecydowanie korzystniejszy od układu płaskiego.

Zwiększanie wysokości  $h_p$  zawieszenia przewodów fazowych na słupie wpływa nieznacznie na redukcję stref oddziaływania. Dotyczy to jedynie zwiększania odległości przewodów fazowych od ziemi na całej długości przęsła. Natomiast zmiana wysokości  $h_p$  przy niezmienniej odległości od ziemi przewodów fazowych w środku przęsła nie wpływa na szerokości stref oddziaływania pola elektrycznego.

Badania wykazały, że w przypadku linii dwutorowych kolejność faz w poszczególnych torach ma istotne znaczenie dla szerokości stref oddziaływania pola elektrycznego. Największe różnice w ich szerokości wynoszą kilkanaście procent.

Nieprzedstawione w niniejszym artykule badania wykazały, że ograniczenie stref oddziaływania pola elektrycznego zaproponowanymi sposobami wiąże się jednak ze zwiększeniem poziomu hałasu na granicy tych stref (w skrajnym przypadku nawet o około 10 dB) (Tarko i in. 2021). Tym samym o możliwości redukcji stref oddziaływania pola elektrycznego mogą decydować obowiązujące na danym obszarze limity natężenia hałasu.

Inaczej niż w przypadku przewodów fazowych położenie przewodów odgromowych praktycznie nie wpływa na szerokości stref oddziaływania pola elektrycznego.

Badania wykazały, że zwiększanie liczby przewodów w wiązce powoduje nieznaczne zwiększanie szerokości stref oddziaływania pola. Natomiast zmniejszanie odległości pomiędzy przewodami w wiązce przyczynia się do kilkunastoprocentowej redukcji szerokości stref. Należy jednak wziąć pod uwagę, że głównym celem stosowania w liniach wysokich napięć przewodów wiązkowych jest ograniczanie negatywnych skutków ulotu elektrycznego, między innymi emisji akustycznej. Z tego względu dobór parametrów przewodów wiązkowych uwarunkowany jest najczęściej czynnikami innymi niż szerokości stref oddziaływania pola elektrycznego.

## 5. Podsumowanie

W artykule wykazano, że zagadnienie redukcji negatywnego oddziaływania pola elektrycznego linii napowietrznych na środowisko jest problemem złożonym. Oryginalność rozwiązania tego problemu polega na zastosowaniu komplementarnych oraz zweryfikowanych eksperymentalnie modeli pola elektrycznego wytwarzanego przez linie elektroenergetyczne. Otrzymane wyniki są słuszne nie tylko w odniesieniu do linii 400 kV, ale również określają kierunki działań w projektowaniu i budowie linii o innych napięciach znamionowych. Należy przy tym wziąć pod uwagę, że zmniejszanie negatywnego oddziaływania na środowisko infrastruktury elektroenergetycznej jest jednym z elementów dokonującego się obecnie procesu transformacji energetycznej.

## Literatura

- Council Recommendation of 12 July 1999 on the limitation of exposure of the general public to electromagnetic fields (0 Hz to 300 GHz), 1999/519/EC, OJ L 199, 30.07.1999.
- El Dein A.Z., 2014, *Calculation of the electric field around the tower of the overhead lines*, IEEE Transactions on Power Delivery, vol. 29(2), s. 899–907. <https://doi.org/10.1109/TPWRD.2013.2273500>.
- EN-50341-1:2012, *Overhead Electrical Lines Exceeding AC 1 kV – Part. 1: General Requirements – Common Specifications*, CEN-CENELEC European Committee for Electrotechnical Standardization, Brussels.
- Griffiths D.J., 2017, *Introductions to Electrodynamics*, 4<sup>th</sup> ed., Cambridge University Press, Cambridge, UK.
- ICNIRP (International Commission on Non-Ionizing Radiation Protection), 1998, *ICNIRP Guidelines for limiting exposure to time-varying electric, magnetic and electromagnetic field (up to 300 GHz)*, Health Physics, vol. 74(4), s. 494–522.
- ICNIRP (International Commission on Non-Ionizing Radiation Protection), 2010, *ICNIRP Guidelines for limiting exposure to time-varying electric and magnetic fields (1 Hz to 100 kHz)*, Health Physics, vol. 99, s. 818–836.
- Li Q., Rowland S.M., Shuttleworth R., 2015, *Calculating the surface potential gradient of overhead line conductors*, IEEE Transactions on Power Delivery, vol. 30(1), s. 34–52. <https://doi.org/10.1109/TPWRD.2014.2325597>.
- Rácz L., Németh B., 2021, *Dynamic line rating – An effective method to increase the safety of power lines*, Applied Sciences, vol. 11(2), 492. <https://doi.org/10.3390/app11020492>.

- Stam R., 2017, *Comparison of international policies on electromagnetic fields (power frequency and radiofrequency fields)*, National Institute for Public Health and the Environment, RIVM, Bilthoven.
- Tarko R., Kochanowicz K., Nowak W., Szpyra W., Wszolek T., 2021, *Reduction of the environmental impact of electric field generated by high voltage power transmission lines*, *Energies*, vol. 14(19), 6388. <https://doi.org/10.3390/en14196388>.