

Ograniczanie zasięgu oddziaływania pól elektromagnetycznych wytwarzanych przez elektroenergetyczne linie przesyłowe

Streszczenie. Artykuł dotyczy analizy możliwości redukcji szerokości stref oddziaływania pola elektrycznego, poprzez zmianę wybranych parametrów projektowych linii elektroenergetycznych. 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 linii 400 kV, jednak otrzymane wnioski są słuszne także dla linii o innych napięciach znamionowych.

Abstract. The article focuses on the analysis of the possibilities of reducing the width of electric field influence zones by changing the design parameters of power lines. This analysis was carried out using the developed and experimentally verified models for determining the electric field in the power line environment. The computational models were used to analyze the width of the electric field influence zones of 400 kV lines. However, the conclusions obtained are also relevant for lines with other rated voltages. (**Impact range reduction of the electromagnetic fields generated by power transmission lines**).

Słowa kluczowe: redukcja pola elektrycznego, elektroenergetyczne linie napowietrzne, modelowanie, projektowanie linii napowietrznych.
Keywords: electric field reduction, overhead lines, modeling, overhead line design.

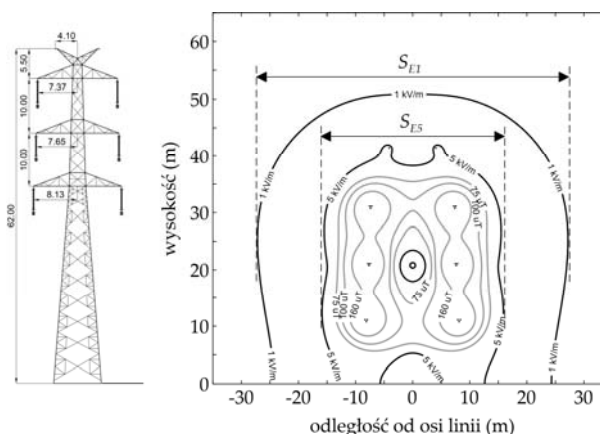
Wstęp

Ograniczanie oddziaływania napowietrznych linii elektroenergetycznych wysokich i najwyższych napięć na środowisko jest zagadnieniem wieloaspektowym. Działania w kierunku redukcji tych oddziaływań czynione są od początków przesyłania i dystrybucji energii elektrycznej – zmieniają się jedynie kierunki i priorytety działań, które dostosowują się do aktualnych problemów technicznych, prawnych, ekonomicznych oraz ekologicznych.

Przy projektowaniu linii elektroenergetycznych dąży się do ograniczania zasięgu stref oddziaływania linii na środowisko. Podstawowym czynnikiem, który determinuje szerokość strefy oddziaływania linii elektroenergetycznej jest emisja do środowiska pola elektromagnetycznego. 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. Parametrami charakteryzującymi te składowe są natężenie pola elektrycznego (kV/m) oraz indukcja magnetyczna (μT). W 1998 roku International Commission on Non-Ionizing Radiation Protection (ICNIRP) wydała wskazówki [1], 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 wydanych w 1999 r. zaleceniach Unii Europejskiej [2]. Pomimo tego, w niektórych krajach obowiązują lokalne regulacje prawne [3], w których wartości dopuszczalne pól elektrycznych i magnetycznych są zarówno większe, jak i mniejsze od wartości zalecanych w dokumentach międzynarodowych. Przykładem takiego kraju jest Polska, gdzie dopuszczalna wartość natężenia pola elektrycznego wynosi 1 kV/m .

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. Umowny zasięg strefy oddziaływania elektromagnetycznego wynika z przestrzennego rozkładu pola elektrycznego oraz pola magnetycznego i ograniczony jest miejscem występowania założonych wartości dopuszczalnych. Na rysunku 1 przedstawiono przykładowe obrazy pola elektrycznego i

pola magnetycznego w przekroju poprzecznym dwutorowej linii 400 kV.



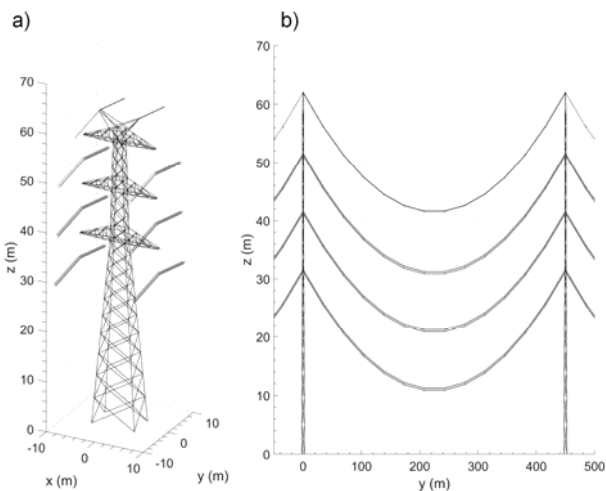
Rys.1. Przykładowe obrazy pola elektrycznego i pola magnetycznego oraz szerokości stref oddziaływania w przekroju poprzecznym dwutorowej linii 400 kV (wyniki badań własnych)
 S_{E5} , S_{E1} – szerokości strefy oddziaływania pola elektrycznego dla wartości dopuszczalnych 5 kV/m oraz 1 kV/m

Obrazy te stanowią izoliny dla referencyjnych wartości natężenia pola elektrycznego wynoszących 5 kV/m oraz 1 kV/m , a także izoliny pola magnetycznego dla referencyjnych wartości indukcji magnetycznej: $160 \mu\text{T}$, $100 \mu\text{T}$ i $75 \mu\text{T}$. Izoliny te zostały wyznaczone dla najwyższego napięcia roboczego linii wynoszącego 420 kV , największej dopuszczalnej obciążalności prądowej przewodów 2500 A oraz najmniejszej odległości przewodów fazowych od ziemi wynoszącej $11,0 \text{ m}$. Z przedstawionych na rysunku 1 obrazów wynika, że referencyjne wartości indukcji magnetycznej $B = 75 \div 160 \mu\text{T}$ zawierają się w przestrzeni, w której natężenie pola elektrycznego $E > 5 \text{ kV/m}$. Z tego powodu o szerokości strefy oddziaływania elektromagnetycznego linii decyduje składowa elektryczna pola – szerokość S_{E5} oraz szerokość S_{E1} na rysunku 1. Stwierdzenie to jest prawdziwe nie tylko dla przedstawionych tu obrazów, ale może być uogólnione również dla innych konstrukcji linii elektroenergetycznych najwyższych napięć.

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. Analizę przeprowadzono z zastosowaniem opracowanych i zweryfikowanych eksperymentalnie modeli do wyznaczania pola elektrycznego w otoczeniu linii [4]. Zaprezentowane w artykule wyniki mogą stanowić podstawę dla wyboru optymalnego rozwiązania technicznego linii w aspekcie minimalizacji negatywnego oddziaływania na środowisko, a także sugerują możliwe kierunki zmian konstrukcyjnych dla linii o innych napięciach znamionowych.

Model do analizy pola elektrycznego linii elektroenergetycznych wysokich napięć

Przy częstotliwości sieciowej $f = 50$ Hz składowa elektryczna pola może być rozpatrywana niezależnie od składowej magnetycznej. Kolejnym uproszczeniem jest zastosowanie do analizy pola elektrycznego praw elektrostatyki [5,6]. W ogólnym ujęciu, podstawą obliczeń są równania wiążące natężenie pola elektrycznego E z ładunkami elektrycznymi Q zgromadzonymi na elementach rozważanego układu i z ich rozmieszczeniem w przestrzeni. Przy tworzeniu równań dla pola elektrycznego w otoczeniu napowietrznych linii elektroenergetycznych, szczególne znaczenie ma metoda ładunków symulowanych [7]. W metodzie tej, rzeczywisty rozkład ładunków na powierzchniach przewodników o znanych wartościach potencjałów, jest zastępowany zbiorem ładunków fikcyjnych (symulujących). 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).

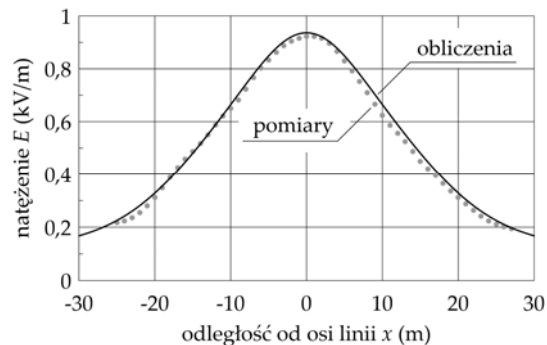


Rys.2. Zbiór liniowych ładunków symulujących dla przykładowej dwutorowej linii 400 kV: a) konstrukcja wsporcza, b) przewody przęsła

Przedstawiona linia wyposażona jest w sześć przewodów fazowych wykonanych jako wiązki trójprzewodowe oraz dwa przewody odgromowe (łącznie 20 przewodów). Kształt krzywej łańcuchowej każdego z przewodów linii aproksymowano 13 odcinkami prostoliniowymi. Konstrukcja wsporcza została natomiast odwzorowana w postaci 352 odcinków reprezentujących kształtowniki tworzące siatkę przestrzenną bryły słupa. Potencjały odcinków aproksymujących przewody fazowe są równe napięciom fazowym linii, a potencjały odcinków

aproksymujących przewody odgromowe oraz konstrukcję wsporczą są równe zero.

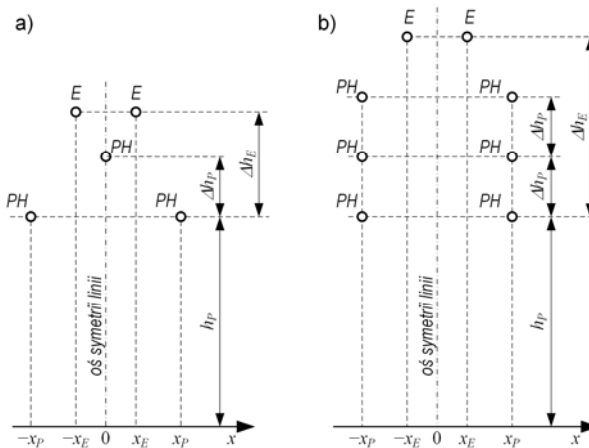
Podstawą obliczeń jest zastosowanie modelu pola elektrycznego opracowanego przez Autorów i przedstawionego w publikacjach [4,8]. Model ten został poddany weryfikacji pomiarowej dla dwutorowej linii elektroenergetycznej 220 kV, a przykładowe porównanie wyników wartości natężenia pola elektrycznego zmierzonego i obliczonego na wysokości 2 m nad powierzchnią ziemi przedstawiono na rysunku 3.



Rys.3. Weryfikacja pomiarowa modelu pola elektrycznego pod dwutorową linią 220 kV – porównanie rozkładu zmierzonego i obliczonego w przekroju poprzecznym linii na wysokości 2 m

Przedmiot i zakres badań

Model obliczeniowy pola elektrycznego wykorzystano do badań szerokości stref S_{E5} i S_{E1} oddziaływania pola elektrycznego linii 400 kV. Przedmiotem badań były jedno- i dwutorowe linie elektroenergetyczne, których konfiguracje rozmieszczenia przewodów przedstawiono na rysunku 4.



Rys.4. Analizowane parametry konstrukcji linii 400 kV: a) linia jednorodna, b) linia dwutorowa

Dla analizy wyodrębniono parametry konstrukcyjne (rys.4), mające istotne znaczenie dla szerokości stref S_{E5} oraz S_{E1} . Celem badań było określenie wpływu zmian wartości tych parametrów na możliwości redukcji stref oddziaływania. Analizowane parametry można sklasyfikować w trzy grupy. Pierwsza grupa obejmuje parametry x_P , h_P oraz Δh_P , które określają układ geometryczny przewodów fazowych w przekroju poprzecznym linii. Razem z parametrem 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 od ziemi. Do drugiej grupy należą parametry x_E oraz Δh_E , które razem z parametrem f_E określają rozmieszczenie przewodów odgromowych. Natomiast grupę trzecią stanowią parametry N i b charakteryzujące budowę wiązki przewodów fazowych.

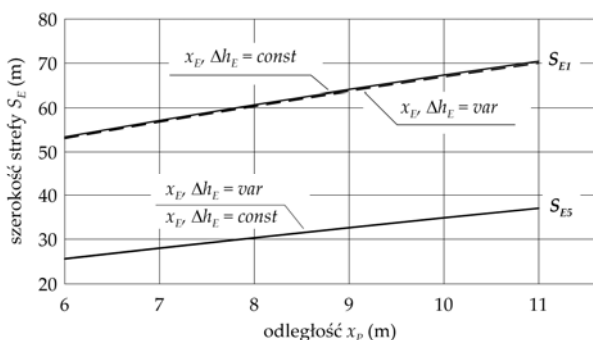
Zakres zmian wartości parametrów wynika z wymagań normatywnych [9], zapewniających bezpieczne odstępy izolacyjne, determinowane napięciem znamionowym, przepięciami oraz warunkami środowiskowymi. Dopuszczalne zakresy zmienności i typowe wartości rozpatrywanych parametrów linii 400 kV przedstawiono w tabeli 1.

Tabela 1. Dopuszczalne według [9] zakresy zmienności i typowe wartości parametrów konstrukcji wsporczych i wiązek przewodowych linii 400 kV

Parametr	Linie jednotorowe		Linie dwutorowe	
	Zakres	Typowa wartość	Zakres	Typowa wartość
x_p (m)	3÷12	10,3	4÷9	8,45
h_p (m)	Zależy od zwisu przewodów			
Δh_p (m)	0÷2	0	6÷10	9,2
x_E (m)	5÷12	7,5	0÷8,5	6,15
Δh_E (m)	6,5÷15	7	10	10
f_p (m)	Zależy od konstrukcji przewodów i ich naprężenia mechanicznego			
f_E (m)	Zależy od konstrukcji przewodów i ich naprężenia mechanicznego			
N	2÷4	2÷3	2÷4	2÷3
b (mm)	350÷500	400	350÷500	400

Analiza wpływu parametrów konstrukcyjnych linii na szerokości stref S_{E5} i S_{E1}

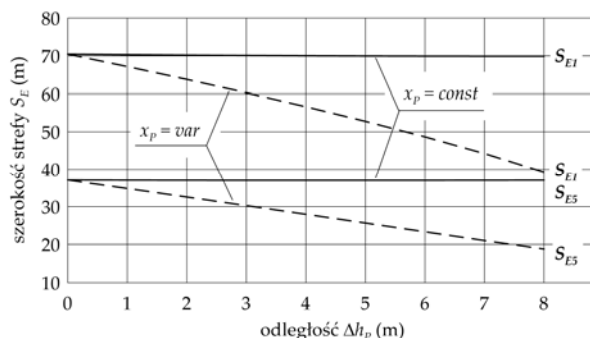
Na rysunku 5 przedstawiono zależności szerokości stref S_{E5} i S_{E1} w funkcji odległości x_p dla linii jednotorowej 400 kV z płaskim układem przewodów fazowych. Rozpatrzono zmianę x_p w przedziale od $x_{p(min)} = 6$ m do $x_{p(max)} = 11$ m. Wartość $x_{p(min)}$ wynika z normatywnych wymagań [9], dotyczących zapewnienia odstępów izolacyjnych, natomiast wartość $x_{p(max)}$ limitowana jest ograniczeniami technicznymi oraz ekonomicznymi. Ograniczenia techniczne wynikają ze zwiększania się momentu skręcającego konstrukcją słupa wraz ze wzrostem x_p , co przekłada się również na wzrost kosztów słupa, wynikający z konieczności zwiększania wytrzymałości mechanicznej jego konstrukcji oraz fundamentów. Kolejnym ograniczeniem o charakterze ekonomicznym będzie wzrost szerokości pasa technologicznego linii.



Rys.5. Wpływ odległości x_p na szerokości stref S_{E5} i S_{E1} dla jednotorowej linii 400 kV z przewodami fazowymi w układzie płaskim

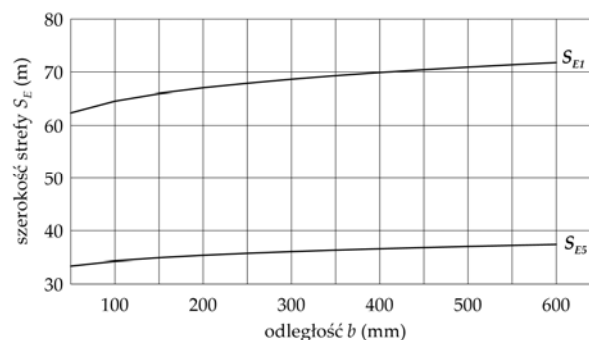
Ze zmniejszaniem odległości x_p w zakresie od 11 m do 6 m, następuje zwężenie szerokości strefy S_{E1} o 17,0 m (24,1%), a strefy S_{E5} o 11,4 m (30,9%). Zmniejszanie parametru x_p poniżej dolnej granicy $x_{p(min)} = 6$ m jest dla analizowanej linii 400 kV możliwe, lecz wymaga zmiany konfiguracji przewodów fazowych z układu płaskiego na układ trójkątny. Rekonfiguracja ta polega na zwiększeniu

wysokości zawieszenia fazy środkowej o $\Delta h_p = 0\div 8$ m przy jednoczesnym zmniejszaniu parametru x_p w zakresie 11÷3 m. Taka zmiana konstrukcji linii istotnie zmniejsza szerokości stref oddziaływania pola elektrycznego (rys.6). W rozpatrywanym przypadku uzyskuje się zwężenie szerokości strefy S_{E1} o 31,2 m (44,2%), a strefy S_{E5} o 18,3 m (49,4%). Należy zauważyć, że w przypadku niezmiennego położenia przewodów faz skrajnych ($x_p = var$) zmiana odległości Δh_p nie wpływa na szerokości stref S_{E1} oraz S_{E5} .



Rys.6. Wpływ odległości Δh_p na szerokości stref S_{E5} i S_{E1} dla jednotorowej linii 400 kV z przewodami fazowymi w układzie trójkątnym

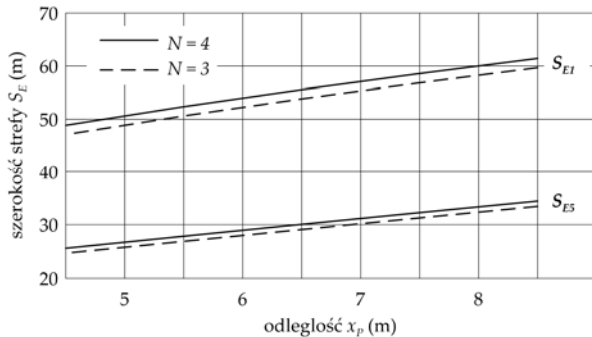
Przedstawione dotychczas rozważania dotyczyły linii, w której przewody fazowe wykonane były jako wiązki dwuprzewodowe o odległości $b = 400$ mm. W celu zbadania wpływu parametrów wiązki przewodowej na oddziaływanie elektromagnetyczne linii, przeanalizowano dla wiązki trójprzewodowej, wpływ zmiany odległości b na szerokość stref oddziaływania linii (rys.7). W rozważanym zakresie odległości $b = 50\div 600$ mm następuje wzrost szerokości strefy S_{E1} o 9,4 m (15,1%) oraz S_{E5} o 4,0 m (11,9%). Należy jednak wziąć pod uwagę, że w praktyce problem wyboru optymalnej wartości odstępów b jest złożony. Na wybór ten wpływa wiele innych czynników, przede wszystkim liczba przewodów w wiązce, warunki klimatyczne i wynikająca z nich konieczność zapobiegania nadmiernemu oblodzeniu, a także skutkom drgań podprzęsłowych pomiędzy odstępnikami przewodów. Z tych powodów wartości odstępów b wynoszą najczęściej około 300÷500 mm.



Rys.7. Wpływ odległości b przewodów w wiązce na szerokości stref S_{E5} i S_{E1} dla jednotorowej linii 400 kV

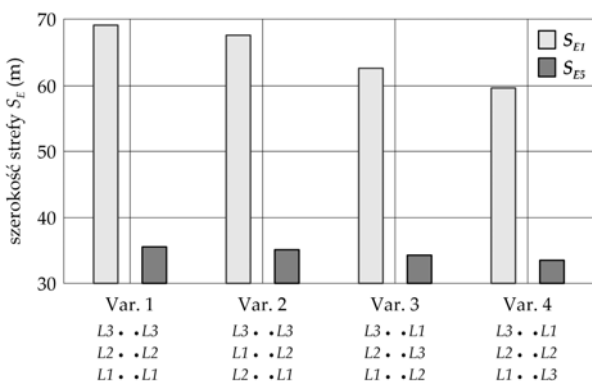
Wnioski wynikające z przeprowadzonych powyżej analiz linii jednotorowych, są pod względem jakościowym słuszne również dla linii dwutorowych. Dotyczy to przede wszystkim wpływu parametru x_p , będącego w przypadku linii dwutorowych odległością poziomą przewodów fazowych od osi linii (rys.4b) oraz wpływu budowy przewodów fazowych. Analizę wpływu parametru x_p na szerokość stref oddziaływania dla linii dwutorowej przeprowadzono przy założeniu niezmiennego położenia przewodów

odgromowych x_E , $\Delta h_E = \text{const}$ oraz niezmiennych odległości $\Delta h_p = \text{const}$ przewodów fazowych. Na rysunku 8 przedstawiono zależności szerokości stref S_{E5} i S_{E1} w funkcji odległości x_p . Rozpatrzono zmianę x_p w przedziale od $x_{p(\min)} = 4,5$ m do $x_{p(\max)} = 8,5$ m. Z rysunku 8 wynika, że niezależnie od liczby N przewodów w wiązce, ze zmniejszaniem odległości x_p w badanym zakresie, następuje zwężenie szerokości strefy S_{E1} o 12,6 m (20,7%), a strefy S_{E5} o 8,8 m (26,0%).



Rys.8. Wpływ odległości x_p na szerokości stref S_{E5} i S_{E1} dla dwutorowej linii 400 kV

Cechą charakterystyczną linii dwutorowych jest zależność oddziaływań elektromagnetycznych od układu faz w torach linii. Na rysunku 9 przedstawiono wyniki obliczeń dla czterech wariantów tych układów.



Rys.9. Wpływ układu faz w dwutorowej linii 400 kV na szerokości stref S_{E5} i S_{E1} dla dwutorowej linii 400 kV

Układ faz istotnie wpływa przede wszystkim na szerokość strefy S_{E1} . Największa szerokość jest dla wariantu 1 (69,1 m), a najmniejsza dla wariantu 4 (59,7 m). Przejście od układu faz w wariantcie 1 do układu faz w wariantcie 4 skutkuje redukcją strefy S_{E1} o 13,6%. Redukcja szerokości strefy S_{E5} jest zdecydowanie mniejsza i wynosi 5,9%.

Podsumowanie

Badania wykazały, że głównym parametrem decydującym o szerokości strefy oddziaływania pola elektrycznego jest parametr x_p . Dotyczy to zarówno linii jedno- jak i dwutorowych. W przypadku linii jednorodnych istotny wpływ na szerokości stref ma również parametr Δh_p . Zwiększanie jego wartości pozwala na dalsze zmniejszanie wartości parametru x_p , co łącznie umożliwiło redukcję szerokości stref oddziaływania pola elektrycznego nawet o 50%. Wynika z tego, że dla linii jednorodnych, z punktu widzenia oddziaływania na środowisko, trójkątny układ przewodów fazowych jest zdecydowanie bardziej korzystny od układu płaskiego.

Dla linii dwutorowych, kolejność faz w poszczególnych torach ma istotne znaczenie dla szerokości stref oddziaływania pola elektrycznego. Największe różnice w ich szerokości, kształtują się na poziomie kilkunastu procent. W odróżnieniu od przewodów fazowych, położenie przewodów odgromowych praktycznie nie wpływa na szerokości stref.

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.

Otrzymane wyniki badań, są słuszne nie tylko dla 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.

Autorzy: mgr inż. Konrad Kochanowicz, AGH Akademia Górniczo-Hutnicza, Katedra Elektrotechniki i Elektroenergetyki, al. Mickiewicza 30, 30-059 Kraków, TD ENERGO sp. z o.o., al. Dygasińskiego 29, 30-820 Kraków, E-mail: kochanowicz@agh.edu.pl; dr hab. inż. Wiesław Nowak, AGH Akademia Górniczo-Hutnicza, Katedra Elektrotechniki i Elektroenergetyki, al. Mickiewicza 30, 30-059 Kraków, E-mail: wieslaw.nowak@agh.edu.pl; dr inż. Rafał Tarko, AGH Akademia Górniczo-Hutnicza, Katedra Elektrotechniki i Elektroenergetyki, al. Mickiewicza 30, 30-059 Kraków, E-mail: tarko@agh.edu.pl.

LITERATURA

- [1] International Commission On Non-Ionizing Radiation Protection. ICNIRP Guidelines for limiting exposure to time-varying electric, magnetic and electromagnetic field (up to 300 GHz). Health Physics, 1998, 74 (4), 494-522.
- [2] Council of the European Union. Council Recommendation of 12 July 1999 on the limitation of exposure of the general public to electromagnetic fields (0 Hz to 300 GHz). Official Journal of the European Communities, 1999, 42, 59-70.
- [3] National Institute for Public Health and the Environment. Comparison of international policies on electromagnetic fields (power frequency and radiofrequency fields). National Institute for Public Health and the Environment, RIVM: Bilthoven, The Netherlands, 2017.
- [4] Tarko R, Kochanowicz K, Nowak W, Szpyra W, Wszółek T. Reduction of the Environmental Impact of Electric Field Generated by High Voltage Power Transmission Lines. *Energies*. 2021; 14(19): 6388.
- [5] Griffiths. D.J. Introductions to electrodynamics. 4th ed.; Cambridge University Press: Cambridge, United Kingdom, 2017.
- [6] El Dein, A.Z. Calculation of the electric field around the tower of the overhead lines. *IEEE Trans. Power Del.* (2014), \no. 29, 899-907.
- [7] Li, Q.; Rowland, S.M.; Shuttleworth, R. Calculating the surface potential gradient of overhead line conductors. *IEEE Trans. Power Del.* (2015), No. 30, 43-52.
- [8] Tarko R, Kochanowicz K, Nowak W, Szpyra W, Wszółek T., Analysis of constructional possibilities of limiting the width of the electromagnetic interaction zone of transmission lines, *Zeszyty Naukowe Wydziału Elektrotechniki i Automatyki Politechniki Gdańskiej*, (2019), No. 62, 151-154
- [9] European Committee for Electrotechnical Standardization. EN-50341-1:2012 Overhead electrical lines exceeding AC 1 kV – Part 1: General requirements – Common specifications. CENELEC European Committee for Electrotechnical Standardization, Brussels, Belgium, 2012.