

Wpływ konstrukcji słupów oraz układu faz na rozkłady pola elektrycznego i magnetycznego w otoczeniu linii 400 kV

Streszczenie. W artykule przedstawiono wyniki badań określające wpływ rodzajów słupów oraz układów faz na rozkłady natężenia pola elektrycznego i magnetycznego wytwarzanego przez przewody napowietrznych, dwutorowych linii o napięciu 400 kV. Na podstawie przeprowadzonych obliczeń i przyjęciu kilku wartości kryterialnych określono najbardziej niekorzystne i korzystne układy faz ze względu na oddziaływanie pola elektromagnetycznego.

Abstract. The article presents research results determining the influence of supports types of and phase systems on the distribution of electric and magnetic field intensity generated by overhead wires of double-circuit lines with a voltage of 400 kV. Based on the calculations and the adoption of several criteria values, the most unfavorable and favorable phase systems were determined due to the influence of the electromagnetic field. (*The influence of the structure of supports and the phase system on the distribution of electric and magnetic fields in the vicinity of 400 kV lines*)

Słowa kluczowe: linie napowietrzne, pole elektromagnetyczne, układy faz

Keywords: overhead power lines, electromagnetic fields, phase systems

Wprowadzenie

Pod koniec roku 2022 w Polsce długość wszystkich linii NN (220 i 400 kV) w przeliczeniu na jeden tor wynosiła 15965 km [1]. W ciągu ostatnich 7 lat (od roku 2015) operator KSE wybudował ponad 2000 km nowych linii o napięciu 400 kV. Jest to rezultat realizowanego od kilku lat przez PSE SA dużego programu inwestycyjnego, którego najnowsze cele zostały sprecyzowane w Planie rozwoju sieci przesyłowej na lata 2023-2032 [2]. Dzięki niemu możliwa będzie transformacja energetyczna, w tym przyłączenie nowych źródeł wytwórczych oraz dużych odbiorców energii elektrycznej. Plan rozwoju sieci przesyłowej na lata 2023-2032 powstał po ukazaniu się nowych dokumentów strategicznych określających kierunek zmian w Krajowym Systemie Elektroenergetycznym.

W opracowanym Planie [2] przewiduje się do roku 2032 między innymi budowę ponad 5200 km torów linii 400 kV, budowę linii HVDC o długości ponad 700 km oraz budowę 27 nowych stacji elektroenergetycznych.

Problemy w budowie linii napowietrznych 400 kV

Inwestycje z zakresu rozwoju elektroenergetycznej sieci przesyłowej są przedsięwzięciami wysoce złożonymi, wymagającymi przeprowadzenia wieloaspektowych procesów formalno-prawnych oraz realizacji rozległych prac budowlano-montażowych obejmujących często terytorium od kilku do kilkunastu gmin.

Budowa napowietrznej linii o napięciu 400 kV wiąże się praktycznie zawsze z protestami ludności zamieszkującej tereny, przez które przechodzić ma trasa linii. Podstawową przyczyną tych protestów jest obawa przed oddziaływaniem pola elektromagnetycznego oraz hałasu wytwarzanego przez przewody fazowe linii oraz utratą walorów krajobrazowych terenu, przez który przebiega trasa takiej linii. Dlatego też bardzo ważnym elementem w procesie budowy linii napowietrznych są konsultacje społeczne, podczas których inwestor (PSE SA) powinien przedstawić zainteresowanym stronom proponowane warianty przebiegu trasy projektowanej linii oraz określić ich wpływ na środowisko. Odpowiednia komunikacja i dialog z lokalną społecznością jest kluczowa dla akceptacji i zrozumienia całego projektu.

Nowobudowane linie 400 kV powinny być zaprojektowane i wykonane zgodnie z normą PN-EN 50341-1:2013-03 [3] wraz z Krajowymi Warunkami

Normatywnymi (NNA) [4] oraz standardowymi specyfikacjami technicznymi opracowanymi przez PSE [5]. Dodatkowo muszą spełniać wymagania obowiązujących przepisów dotyczących oddziaływania na środowisko [6, 7,8].

Zgodnie z dokumentem [5] w założeniach projektowych należy przedstawić wykresy rozkładów natężenia pola elektrycznego i magnetycznego pod linią (w funkcji odległości od osi linii) przy pracujących obu torach i jednym torze oraz wykazać, że obie składowe pola elektromagnetycznego nie przekraczają w żadnym układzie pracy oraz dla przyjętej minimalnej odległości przewodów fazowych od ziemi wartości dopuszczalnych (10 kV/m i 60 A/m) dla miejsc dostępnych dla ludzi w żadnym miejscu pod linią oraz wartości dopuszczalnych dla terenów przeznaczonych pod zabudowę mieszkaniową na granicy pasa technologicznego linii (1 kV/m i 60 A/m).

W artykule Autor zaprezentował jaki wpływ na rozkłady pola elektrycznego i magnetycznego mają konstrukcje wsporcze wykorzystywane w budowie nowych linii o napięciu 400 kV, w których przewody rozmieszczone są w różnych odległościach od siebie i różnych konfiguracjach. Dodatkowo określił wpływ układu faz w liniach dwutorowych na wartości maksymalne wytwarzanego pola elektrycznego i magnetycznego oraz wartości obu składowych na granicy pasa technologicznego linii.

Konstrukcje wsporcze stosowane w budowie nowych linii 400 kV

W ciągu ostatnich kilku lat na terenie naszego kraju zostało wybudowanych kilkanaście nowych linii napowietrznych o napięciu 400 kV. Planuje się budowę kolejnych. W większości przypadków były lub będą to linie dwutorowe budowane z wykorzystaniem standardowych słupów kratowych serii E33, serii EK33, serii Z1, serii Z_k33 serii EN422:16, serii SC34 i SB34 oraz serii S34. W większości serii słupów przewody jednego toru umieszczone są jeden nad drugim, przy czym na słupach serii E33, EK33, ZK33 i S34 w największej odległości od osi słupa umieszczone są przewody (wiązki) na dolnym poprzeczniku, a na słupach serii EN422:16 oraz SC34 i SB34 w największej odległości od osi słupa umieszczone są przewody (wiązki) na poprzeczniku środkowym. W tabeli 1 zestawiono odległości przewodów (wiązek) od osi słupów przelotowych P i mocnych M6 różnych serii słupów linii 400 kV.

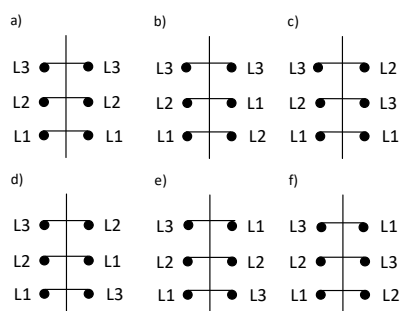
Dla odcinków linii prowadzonych przez tereny lasów możliwe jest zastosowanie dwóch konstrukcji linii z wykorzystaniem słupów leśnych typu PL oraz nadleśnych typu PNL lub MNL. W przypadku słupów nadleśnych różnych serii przewody nie są zawieszane w układzie pionowym tylko w układzie trójkątnym – dwa przewody jednego toru na poprzeczniku dolnym oraz jeden przewód na poprzeczniku górnym.

Tabela 1. Odległości poszczególnych faz (wiązek przewodów) od osi słupa dla różnych serii i typów słupów

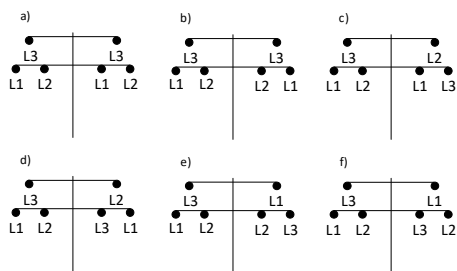
Seria słupów	Typ słupów	Odległość przewodu (wiązki) od osi słupa (m)		
		Dolny poprzecznik	Środkowy poprzecznik	Górny poprzecznik
E33 lub EK33	P	8,13	7,65	7,37
	M6	11,6	11,0	11,0
ZK33	P	8,26	7,33	7,13
	M6	12,0	11,2	11,2
EN422:16	Ps3	10,0	13,5	9,5
	M6s3	12,5	16,5	12,5
SC34	P	9,25	12,47	8,62
	M6	13,0	16,4	12,4
S34	P	8,30	8,03	7,76
	M6	11,25	10,75	10,75

Obliczenia rozkładów pola elektrycznego i magnetycznego w otoczeniu linii 400 kV

Analizę oddziaływania pola elektromagnetycznego towarzyszącego pracy dwutorowych linii napowietrznych o napięciu 400 kV przeprowadzono w oparciu o obliczenia dla pręseł złożonych z pary słupów przelotowych P-P oraz mocnych M6-M6 serii E33 (EK33), pary słupów przelotowych P-P serii SC34 (SB34) oraz pary słupów nadleśnych PNL-PNL serii SC34. Wybór takich słupów podyktowany był różną konfiguracją geometryczną przewodów – układ pionowy i trójkątny. Dodatkowo w każdym z pręseł wykonano obliczenia dla sześciu różnych układów faz obu torów linii, które zobrazowano na rysunkach 1 i 2.



Rys. 1. Analizowane układy faz na słupach o pionowym układzie przewodów a) układ 1, b) układ 2, c) układ 3, d) układ 4, d) układ 5, e) układ 6



Rys. 2. Analizowane układy faz na słupach nadleśnych o trójkątnym układzie przewodów a) układ 1, b) układ 2, c) układ 3, d) układ 4, d) układ 5, e) układ 6

Istotną kwestią w procesie projektowania linii w aspekcie potencjalnego oddziaływania pola

elektromagnetycznego na środowisko, jest wybór odpowiedniej serii słupów oraz w przypadku linii dwutorowych (wielotorowych) wybór optymalnego układu faz w poszczególnych torach linii. Czy istnieje taki układ faz, przy którym wartości poszczególnych składowych pól są największe lub najmniejsze? Zagadnienia te poruszane były w pracach [9,10,11]. Przy określaniu najbardziej niekorzystnego lub korzystnego układu faz autorzy prac [9,10] brali pod uwagę podczas obliczeń rozkładów pola elektrycznego i magnetycznego tylko maksymalne ich wartości (E_{max} , H_{max}) oraz szerokość obszaru, w którym $E > 1$ kV/m. Przeprowadzone obliczenia wykazywały jednak, że nie ma takiego układu faz, przy którym te trzy wielkości osiągałyby jednocześnie maksymalne albo minimalne wartości lub przekraczałyby wartości dopuszczalne sprecyzowane w przepisach [7].

Podczas obliczeń rozkładów pola elektrycznego i magnetycznego w otoczeniu różnych pręseł linii dla sześciu układów faz oprócz wyznaczenia wartości maksymalnych obu składowych pola i szerokości obszaru, w którym natężenie pola elektrycznego może przekroczyć wartość 1 kV/m, wyznaczono dodatkowo wartości obu składowych pola na granicy pasa technologicznego linii oraz wartości natężenia pola magnetycznego w odległości 60 m od osi linii. W celu porównania rozkładów pola elektromagnetycznego w otoczeniu linii 400 kV budowanych z użyciem różnych słupów do obliczeń przyjęto najbardziej niekorzystne warunki pracy linii – minimalną odległość przewodów od ziemi $h_{min}=10$ m, maksymalne napięcie 420 kV oraz maksymalne obciążenie przewodów (wiązka 3x468/24-A1F/UHST-261) $I_{max} = 3200$ A/fazę. Wyniki obliczeń dla pręśla złożonego z pary słupów P-P serii EK33 dla sześciu różnych układów faz przedstawiono w tabelach 2 i 3, a dla pręśla złożonego z pary słupów przelotowych serii SC34 w tabelach 4 i 5.

Tabela 2. Zestawienie obliczonych wartości natężenia pola elektrycznego i magnetycznego oraz szerokości obszaru, w którym $E > 1$ kV/m, dla pręseł złożonych z pary słupów przelotowych serii EK33, przy wysokości zawieszenia przewodów $h_{min} = 10$ m

Układ faz	E_{max} [kV/m]	H_{max} [A/m]	Szer. obsz., gdzie $E > 1$ kV/m [m]	E na gr. pasa tech. [kV/m]	H na gr. pasa tech. [A/m]	H w odl. 60 m od osi linii [A/m]
Układ 1	8,57	43,4	$\pm 23,2$	0,25	11,9	4,6
Układ 2	7,98	44,2	$\pm 23,5$	0,16	10,2	3,9
Układ 3	8,47	41,9	$\pm 23,2$	0,27	10,8	4,1
Układ 4	7,80	46,1	-23,8 +23,5	0,22	7,4	2,5
Układ 5	7,24	48,0	$\pm 23,9$	0,12	4,6	1,2
Układ 6	7,80	46,1	-23,5 +23,8	0,22	7,4	2,5

Tabela 3. Zestawienie obliczonych wartości natężenia pola elektrycznego i magnetycznego oraz szerokości obszaru, w którym $E > 1$ kV/m, dla pręseł złożonych z pary słupów przelotowych serii EK33, przy wysokości zawieszenia przewodów $h_{min} = 30$ m

Układ faz	E_{max} [kV/m]	H_{max} [A/m]	Szer. obsz., gdzie $E > 1$ kV/m [m]	E na gr. pasa tech. [kV/m]	H na gr. pasa tech. [A/m]	H w odl. 60 m od osi linii [A/m]
Układ 1	2,35	11,3	$\pm 26,3$	0,54	6,6	3,5
Układ 2	1,60	8,9	$\pm 22,5$	0,45	5,6	3,0
Układ 3	2,29	10,4	$\pm 26,0$	0,54	6,0	3,2
Układ 4	1,21	6,1	-18,8 +18,3	0,40	3,8	1,9
Układ 5	0,88	5,7	-	0,38	2,2	0,8
Układ 6	1,21	6,1	-18,3 +18,8	0,40	3,8	1,9

Tabela 4. Zestawienie obliczonych wartości natężenia pola elektrycznego i magnetycznego oraz szerokości obszaru, w którym $E > 1$ kV/m, dla pręseł złożonych z pary słupów przelotowych serii SC34, przy wysokości zawieszenia przewodów $h_{min} = 10$ m

Układ faz	E_{max} [kV/m]	H_{max} [A/m]	Szer. obsz., gdzie $E > 1$ kV/m [m]	E na gr. pasa tech. [kV/m]	H na gr. pasa tech. [A/m]	H w odl. 60 m od osi linii [A/m]
Układ 1	8,30	43,8	$\pm 25,9$	0,56	12,7	4,9
Układ 2	7,73	41,9	$\pm 25,8$	0,49	11,0	4,3
Układ 3	8,26	43,3	$\pm 27,7$	0,69	11,6	4,3
Układ 4	7,58	45,6	-28 +26,8	0,68	8,2	2,8
Układ 5	7,39	48,3	$\pm 27,2$	0,53	5,5	1,4
Układ 6	7,58	45,6	-26,8 + 28	0,68	8,2	2,8

Tabela 5. Zestawienie obliczonych wartości natężenia pola elektrycznego i magnetycznego oraz szerokości obszaru, w którym $E > 1$ kV/m, dla pręseł złożonych z pary słupów przelotowych serii SC34, przy wysokości zawieszenia przewodów $h_{min} = 30$ m

Układ faz	E_{max} [kV/m]	H_{max} [A/m]	Szer. obsz., gdzie $E > 1$ kV/m [m]	E na gr. pasa tech. [kV/m]	H na gr. pasa tech. [A/m]	H w odl. 60 m od osi linii [A/m]
Układ 1	2,28	11,3	$\pm 26,2$	0,55	6,9	3,7
Układ 2	1,60	8,6	$\pm 23,3$	0,49	5,8	3,2
Układ 3	2,21	10,6	$\pm 25,8$	0,54	6,3	3,3
Układ 4	1,22	6,6	-16,1 +21,1	0,38	4,0	2,1
Układ 5	0,85	6,4	-	0,37	2,6	1,0
Układ 6	1,22	6,6	-21,1 + 16,1	0,38	4,0	2,1

Konstrukcje słupów nadleśnych różnych serii są do siebie bardzo podobne. Różnice wynikają jedynie z różnych odległości zawieszenia przewodów od osi słupa. W każdym przypadku przewody rozmieszczone są jednak w układzie trójkątnym. W celu sprawdzenia czy układ faz będzie miał wpływ na rozkłady pola elektrycznego i magnetycznego, przeprowadzono obliczenia dla pary słupów nadleśnych serii SC34. Do obliczeń przyjęto analogiczne dane jak dla słupów o pionowym układzie przewodów z tym, że analizowano układy faz zgodnie z rysunkiem 2. Wyniki obliczeń dla sześciu różnych układów faz przedstawiono w tabeli 6.

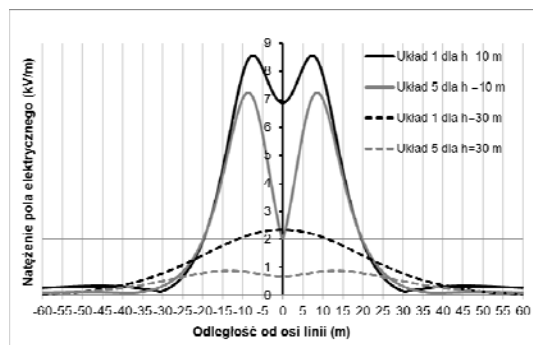
Tabela 6. Zestawienie obliczonych wartości natężenia pola elektrycznego i magnetycznego oraz szerokości obszaru, w którym $E > 1$ kV/m, dla pręseł złożonych z pary słupów przelotowych nadleśnych serii SC34, przy wysokości zawieszenia przewodów $h_{min} = 27$ m

Układ faz	E_{max} [kV/m]	H_{max} [A/m]	Szer. obsz., gdzie $E > 1$ kV/m [m]	E na gr. pasa tech. [kV/m]	H na gr. pasa tech. [A/m]	H w odl. 60 m od osi linii [A/m]
Układ 1	1,61	7,9	± 32	0,87	6,11	3,1
Układ 2	1,94	10,4	$\pm 28,2$	0,75	6,12	3,1
Układ 3	1,45	9,5	-32,2 +27,8	0,88 0,82	5,73 4,74	2,6 2,0
Układ 4	1,0	4,5	-	0,74	3,41	1,7
Układ 5	1,74	10,0	± 30	0,83	4,88	2,0
Układ 6	1,45	9,5	-27,8 +32,2	0,82 0,88	4,74 5,73	2,0 2,6

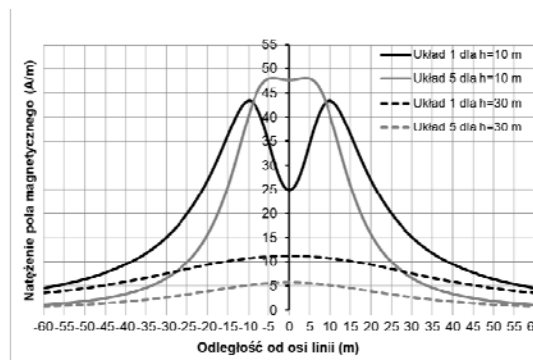
Analiza wyników obliczeń

Porównując rozkłady pola elektrycznego i magnetycznego wyznaczone w otoczeniu linii 400 kV zbudowanych na słupach różnych serii można stwierdzić, że są one do siebie bardzo zbliżone. Maksymalne wartości

natężenia pola elektrycznego i magnetycznego są nieco większe dla pręseł zbudowanych z pary słupów przelotowych niż mocnych. W przypadku pręseł zbudowanych z pary słupów mocnych rozszerza się obszar, w którym natężenie pola elektrycznego jest większe od 1 kV/m oraz zwiększają się wartości natężenia pola elektrycznego i magnetycznego na granicy pasa technologicznego. W przypadku zwiększenia wysokości zawieszenia przewodów linii (z 10 m do 30 m) widać wyraźne obniżenie maksymalnych wartości obu składowych pola, zwiększenie szerokości obszaru, w którym $E > 1$ kV/m oraz wzrost natężenia pola elektrycznego na granicy pasa technologicznego przy jednoczesnym spadku natężenia pola magnetycznego w odległościach 35 i 60 m od osi linii. Porównując wartości przedstawione w tabelach od 2 do 5 widać wyraźnie wpływ układu faz na rozkłady pola elektrycznego i magnetycznego w otoczeniu linii zbudowanych ze słupów o pionowym układzie przewodów. W przypadku symetrycznego rozmieszczenia faz po obu stronach słupa (układ 1) od 3 do 6 parametrów kryterialnych osiąga maksymalne wartości. Niezależnie od serii i typu słupów dla układu faz oznaczonego jako 5, od 4 do 6 parametrów kryterialnych przedstawionych w tabelach od 2 do 5 osiąga wartości minimalne. Na rysunkach 3-6 przedstawiono rozkłady pola elektrycznego i magnetycznego dla dwóch układów faz – 1 i 5 oraz dla dwóch różnych wysokości zawieszenia przewodów $h=10$ m i $h=30$ m.



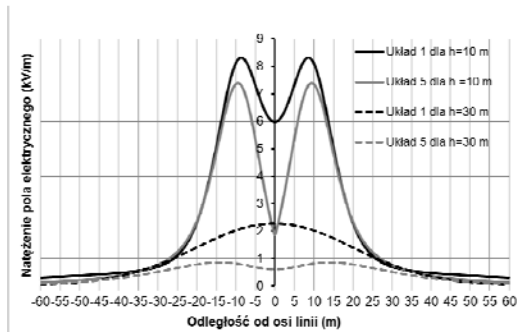
Rys.3. Rozkłady natężenia pola elektrycznego w otoczeniu pręseła linii 400 kV zbudowanego z pary słupów przelotowych P-P serii EK33 dla 2 różnych układów faz



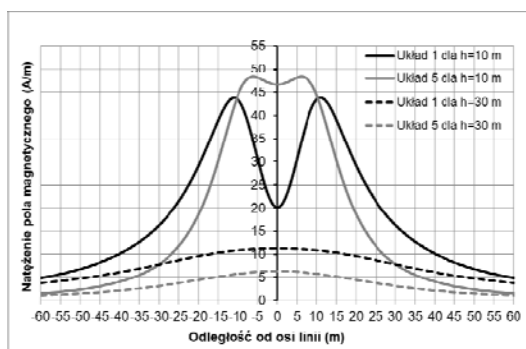
Rys.4. Rozkłady natężenia pola magnetycznego w otoczeniu pręseła linii 400 kV zbudowanego z pary słupów przelotowych P-P serii EK33 dla 2 różnych układów faz

W przypadku słupów nadleśnych o trójkątnym ułożeniu przewodów również możemy zauważyć istotny wpływ układu faz na rozkłady pola elektrycznego i magnetycznego w otoczeniu linii 400 kV zbudowanej na słupach typu PNL. Najbardziej niekorzystnym układem faz w przypadku słupów nadleśnych jest układ oznaczony na rysunku 2 jako układ 2. Dla tego układu otrzymujemy największe wartości maksymalne natężenia pola elektrycznego i magnetycznego oraz największe wartości pola

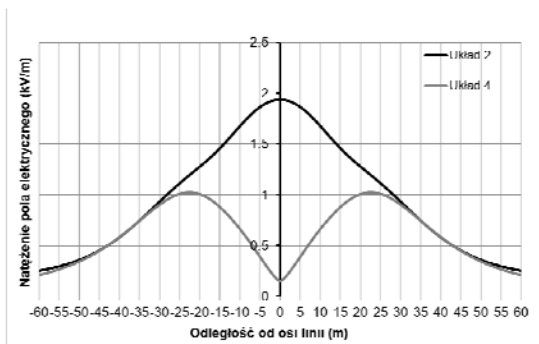
magnetycznego na granicy pasa technologicznego oraz w odległości 60 m od osi linii. Dla układu faz oznaczonego na rysunku 2 jako układ 4 wszystkie wielkości kryterialne w tabeli 6 osiągają najmniejsze wartości, czyli linia z układem faz nr 4 charakteryzuje się najmniejszym oddziaływaniem pola elektromagnetycznego na środowisko. Porównanie rozkładów pola elektrycznego i magnetycznego przy najbardziej niekorzystnym i korzystnym układzie faz przedstawiono na rysunkach 7 i 8.



Rys.5. Rozkłady natężenia pola elektrycznego w otoczeniu przęsła linii 400 kV zbudowanego z pary słupów przelotowych P-P serii SC34 dla 2 różnych układów faz



Rys.6. Rozkłady natężenia pola magnetycznego w otoczeniu przęsła linii 400 kV zbudowanego z pary słupów przelotowych P-P serii SC34 dla 2 różnych układów faz



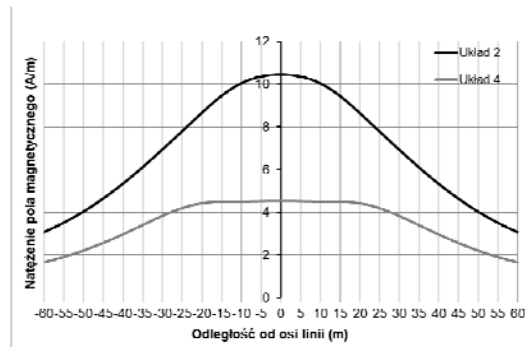
Rys.7. Rozkłady natężenia pola elektrycznego w otoczeniu przęsła linii 400 kV zbudowanego z pary słupów przelotowych nadleśnych PNL-PNL serii SC34 dla 2 różnych układów faz

Wnioski

Rozkłady pola elektrycznego i magnetycznego w otoczeniu nowych linii napowietrznych o napięciu 400 kV budowanych z użyciem słupów kratowych różnych serii i typów są do siebie bardzo zbliżone. Rozmieszczenie geometryczne przewodów (wiązek) na słupach o pionowych układzie przewodów nie wpływa znacząco na oddziaływanie pola elektromagnetycznego wytwarzanego w otoczeniu takich linii.

Układ faz w dwutorowych liniach napowietrznych o napięciu 400 kV ma znaczący wpływ na rozkłady pola elektrycznego i magnetycznego w ich otoczeniu. Biorąc pod uwagę kilka wartości kryterialnych – maksymalne wartości

natężenia pola elektrycznego i magnetycznego, szerokość obszaru, w którym $E > 1$ kV, wartości natężenia pola elektrycznego i magnetycznego na granicy pasa technologicznego linii można wyróżnić układ faz najbardziej niekorzystny i korzystny pod względem oddziaływania pola elektromagnetycznego.



Rys.8. Rozkłady natężenia pola magnetycznego w otoczeniu przęsła linii 400 kV zbudowanego z pary słupów przelotowych nadleśnych PNL-PNL serii SC34 dla 2 różnych układów faz

W przypadku słupów o pionowym układzie przewodów największe oddziaływanie pola elektrycznego i magnetycznego występuje w przypadku symetrycznego rozmieszczenia faz po obu stronach słupa (układ 1 z rys.1). Najmniejsze wartości wytwarzanego pola elektromagnetycznego występują w przypadku układu 5 z rysunku 1.

W przypadku słupów nadleśnych o trójkątnym układzie przewodów największe wartości natężenia pola elektrycznego i magnetycznego występują dla układu 2 faz z rysunku 2, najmniejsze natomiast dla układu 4 faz z rysunku 2.

Autor: dr inż. Marek Jaworski, Politechnika Wroclawska, Katedra Energoelektryki, Wyb. Wyspiańskiego 27, 50-370 Wrocław, e-mail: marek.jaworski@pwr.edu.pl

LITERATURA

- [1] Energetyka, dystrybucja, przesył, raport PTPiREE 2023
- [2] Plan rozwoju w zakresie zaspokojenia obecnego i przyszłego zapotrzebowania na energię elektryczną na lata 2023-2032, Polskie Sieci Elektroenergetyczne, listopad 2022
- [3] PN-EN 50341-1-2013 Elektroenergetyczne linie napowietrzne prądu przemiennego powyżej 45 kV. Część 1: Wymagania ogólne – Specyfikacje wspólne
- [4] PN-EN 50341-2-22:2022-06 Elektroenergetyczne linie napowietrzne prądu przemiennego powyżej 1 kV. Część 2-22: Krajowe Warunki Normatywne (NNA) dla Polski
- [5] Standardowe Specyfikacje Techniczne. Linia napowietrzna 400 kV. Polskie Sieci Elektroenergetyczne, Konstancin-Jeziorna, grudzień 2022 r
- [6] Ustawa z dnia 27 kwietnia 2001 r. Prawo ochrony środowiska. Tekst jednolity: Dz. U. z 2019 r. poz. 1396 z późn. zmianami
- [7] Rozporządzenie Ministra Zdrowia z dnia 17 grudnia 2019 r. w sprawie dopuszczalnych poziomów pól elektromagnetycznych w środowisku. Dz.U. z 2019 r. poz. 2448
- [8] Rozporządzenie Ministra Środowiska z dnia 14 czerwca 2007 r. w sprawie dopuszczalnych poziomów hałasu w środowisku. Dz. U. z 2014 r., poz.112
- [9] Jaworski M., Skumulowane oddziaływanie pola elektromagnetycznego w otoczeniu linii napowietrznych. Przegląd Elektrotechniczny Nr 12/2022
- [10] Wróblewski Z., Habrych M., Wpływ wzajemnego usytuowania przewodów fazowych w wielotorowych liniach WN na rozkład pola elektromagnetycznego. Przegląd Elektrotechniczny Nr 06/2005
- [11] Helong L., Xueming W., Jinquan Z., Zhibin Z., The optimal phase sequence arrangement of multicircuit transmission lines on the same tower. 13th International Conference on Natural Computation, Fuzzy Systems and Knowledge Discovery, 29-31 July 2017