

## Analiza zmian rozkładu pola elektromagnetycznego generowanego przez napowietrzne linie elektroenergetyczne spowodowanych oddziaływaniem wiatru

**Streszczenie.** Podczas projektowania przesyłowych linii elektroenergetycznych wykonuje się wiele szczegółowych analiz oddziaływania tych obiektów na środowisko. Do typowych zadań należy obliczeniowa identyfikacja rozkładu generowanego pola elektromagnetycznego w zakresie jego składowej elektrycznej oraz magnetycznej dla różnych warunków środowiskowych związanych z temperaturą powietrza oraz wpływem sadzi, która może wystąpić na przewodach linii elektroenergetycznej. Wraz ze wzrostem mocy obliczeniowej współczesnych komputerów ułatwione jest przeprowadzanie analiz dla wszelkich możliwych stanów pracy linii. W niniejszym artykule autorzy podjęli się oszacowania wpływu przemieszczeń przewodów linii wywołanych parciem wiatru na zmiany rozkładu generowanych pól elektromagnetycznych oraz określenie miejsc występowania lokalnych maksimum i minimum natężenia pola dla kilku wybranych konfiguracji przewodów..

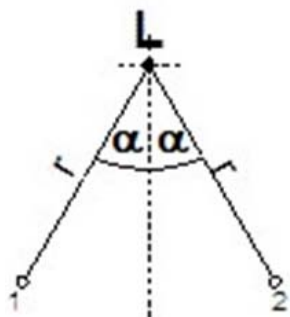
**Abstract.** When designing power transmission lines, many detailed analyzes of the environmental impact of these facilities are performed. Typical tasks include computational identification of the distribution of the generated electromagnetic field in terms of its electrical and magnetic components for various environmental conditions related to air temperature and the influence of ice or snow, that may occur on the power line wires. With the increase in computing power of modern computers, it is easier to carry out analyzes for all possible operating states of the line. In this paper, the authors check to estimate the impact of the wind and the associated so-called blowing the wires of powerlines to changes in the distribution of the generated electromagnetic fields and determining the location of local maximum and minimum of strength of EM fields for a few selected cases. (Analysis of changes in the distribution of the electromagnetic field generated by overhead power lines caused by the impact of wind).

**Słowa kluczowe:** linie elektroenergetyczne, pole elektromagnetyczne, symulacje cyfrowe, bezpieczeństwo środowiska.

**Keywords:** power lines, electromagnetic field, numerical simulations, environmental safety.

### Wstęp

Ubocznym efektem pracy obiektów elektroenergetycznych (m.in. przesyłowych linii napowietrznych) jest powstające wokół nich pole elektromagnetyczne. Natężenie tego pola maleje wraz z oddalaniem się od źródła, czyli od osi napowietrznej linii WN. Ze względu na wymogi środowiskowe, należy dążyć do ograniczenia emisji pól elektromagnetycznych [1]. Podczas projektowania linii napowietrznych należy poddać wnikliwej analizie wszelkie możliwe skrajne stany jej pracy, przez co możliwe jest określenie maksymalnych natężeń generowanych pól elektromagnetycznych, co pozwala na ocenę wpływu badanej linii elektroenergetycznej na środowisko [2]. O ile kryteria analizy związane z temperaturą są w przytoczonej normie [2] dość dobrze określone, to w przypadku parcia wiatru może dochodzić do przemieszczania się przewodów, które mogą w zależności od siły i kierunku wiatru przyjmować nieco inną konfigurację niż wynikałoby to z ich nominalnego rozmieszczenia na słupie [3]. Obszar, w którym może poruszać się każdy z pojedynczych przewodów przedstawiono na rysunku (Rys. 1).



Rys.1. Widok poprzeczny przewodu napowietrznej linii elektroenergetycznej wraz z zakresem w jakim odchyła się pod wpływem wiatru (pozycje 1-2)

Jak wiadomo, każdy z przewodów wchodzących w skład linii elektroenergetycznej wytwarza indywidualne pole

elektromagnetyczne, które w zależności od wzajemnej konfiguracji geometrycznej całego układu, zgodnie z zasadą superpozycji, wytwarza wypadkowe pole elektromagnetyczne, z jego komponentami w postaci składowej elektrycznej oraz składowej magnetycznej. Składowa elektryczna uzależniona jest głównie od poziomu napięcia linii, natomiast magnetyczna od wartości prądów płynących w przewodach roboczych [4].

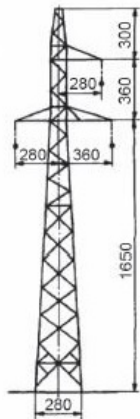
### Obliczeniowe metody wyznaczania rozkładu natężenia składowych pola elektromagnetycznego

Coraz częściej do wyznaczania rozkładu natężenia pola elektromagnetycznego stosuje się wyspecjalizowane oprogramowanie komputerowe, w którym wykorzystuje się mniej lub bardziej złożone algorytmy oparte o znane modele matematyczno-fizyczne opisujące zjawiska elektromagnetyzmu. Popularnym sposobem wyznaczenia składowej elektrycznej jest wykorzystanie tzw. metody odbić zwierciadlanych, w której każdemu z ładunków elektrycznych wchodzących w skład analizowanego układu przyporządkowuje się symetrycznie do płaszczyzny o potencjale zerowym, bliźniaczy pozorny ładunek o przeciwnym znaku. Następnie zgodnie z zasadą superpozycji dokonuje się wektorowego sumowania oddziaływań każdego z ładunków zarówno tych istniejących jak i pozornych. W ten sposób dla każdego punktu badanej przestrzeni istnieje możliwość wyznaczenia wartości natężenia pola elektrycznego. Do wyznaczenia natężenia pola magnetycznego zastosowano prawo Biota-Savarta, a następnie poszczególne składowe od każdego ze źródeł tzn. przewodów, w których płynie prąd elektryczny, zgodnie z zasadą superpozycji zostały uwzględnione do identyfikacji wypadkowego natężenia pola magnetycznego w każdym z badanych punktów przestrzeni otaczającej linię elektroenergetyczną.

### Analiza wpływu oddziaływania wiatru na rozkład pola generowanego przez napowietrzną linię 110 kV

Jednym z badanych przypadków było zbadanie wpływu parcia wiatru na przewody napowietrznej linii

elektroenergetycznej 110 kV zbudowanej w oparciu o typowe słupy przelotowe typu B2. Sylwetka słupa pokazana jest na rysunku (Rys. 2). Ze względu na konstrukcję słupa przewody robocze linii są rozmieszczone w sposób niesymetryczny względem osi słupa. A zatem można spodziewać się różnych rozkładów pola w zależności od kierunku z którego wieje wiatr. W artykule dokonano analizy dla obu przypadków oraz dla różnej siły oddziaływania powodującej odchylenie przewodów o następujące wartości kątowe  $\alpha$ :  $30^\circ$ ,  $45^\circ$  oraz  $60^\circ$ .

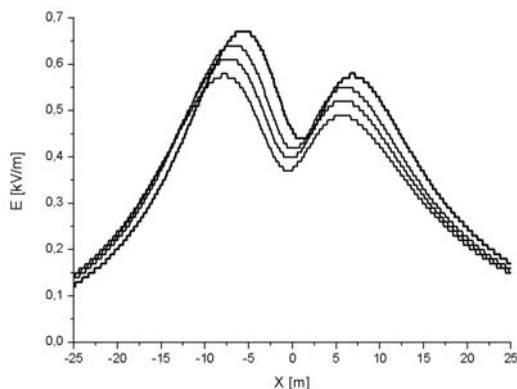


Rys.2. Sylwetka słupa przelotowego typu B2 linii napowietrznej 110 kV

W tabeli 1 zestawione zostały wartości natężenia składowej elektrycznej pola w charakterystycznych punktach oraz ich odległość liczona od osi linii napowietrznej.

Tabela 1. Maksymalne i minimalne natężenia pola elektrycznego wyznaczone na wysokości  $h=2\text{m}$  w przekroju poprzecznym pod linią 110 kV (B2) oraz miejsca ich występowania w zależności od kąta odchylenia przewodów

Odchylenie w lewo	Kąt odchylenia przewodów linii WN w związku z oddziaływaniem wiatru			
	110 kV / B2	$0^\circ$	$30^\circ$	$45^\circ$
$E_{\max 1}$ [kV/m]	0,671	0,643	0,612	0,575
$X_{E_{\max 1}}$ [m]	-5,60	-6,85	-7,30	-7,80
$E_{\min}$ [kV/m]	0,435	0,416	0,396	0,372
$X_{E_{\min}}$ [m]	1,05	0,15	-0,20	-0,50
$E_{\max 2}$ [kV/m]	0,575	0,550	0,522	0,489
$X_{E_{\max 2}}$ [m]	6,85	6,00	5,75	5,65



Rys.3. Rozkład natężenia składowej elektrycznej generowanej przez linię 110 kV (B2) na wysokości  $h=2\text{m}$  dla różnych stanów pracy przy odchyleniu przewodów linii WN w lewo od osi

Rozkład natężenia składowej elektrycznej pola elektromagnetycznego generowanego przez linię napowietrzną 110 kV przy odchyleniu jej przewodów w lewo spowodowanego oddziaływaniem wiatru przedstawiono na

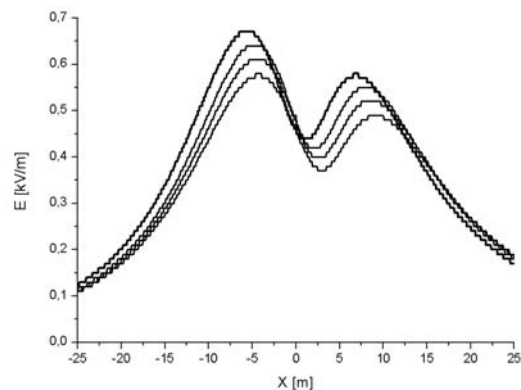
rysunku (Rys. 3). W zależności od poprzecznej siły oddziałującej na przewody, na potrzeby niniejszej publikacji, przyjęto, że kąt odchylenia wynosi odpowiednio:  $30^\circ$ ,  $45^\circ$  oraz  $60^\circ$ . Dla każdego z tych wariantów dokonano obliczeniowej identyfikacji natężenia składowej elektrycznej  $E$  wyrażonej w kV/m. Ponieważ wraz ze zwiększaniem kąta odchylenia przewodów rośnie ich odległość od poziomu gruntu, zatem dla większych kątów odchylenia natężenia składowej elektrycznej w przekroju poprzecznym linii WN osiągają niższe wartości.

Dla przypadku, gdy siła poprzeczna powoduje odchylenie przewodów w prawo, wartości składowej elektrycznej oraz współrzędne poziome ich występowania zestawiono w tabeli 2.

Tabela 2. Maksymalne i minimalne natężenia pola elektrycznego wyznaczone na wysokości  $h=2\text{m}$  w przekroju poprzecznym pod linią 110 kV (B2) oraz miejsca ich występowania w zależności od kąta odchylenia przewodów

Odchylenie w prawo	Kąt odchylenia przewodów linii WN w związku z oddziaływaniem wiatru			
	110 kV / B2	$0^\circ$	$30^\circ$	$45^\circ$
$E_{\max 1}$ [kV/m]	0,671	0,643	0,612	0,575
$X_{E_{\max 1}}$ [m]	-5,60	-4,75	-4,50	-4,30
$E_{\min}$ [kV/m]	0,435	0,416	0,396	0,372
$X_{E_{\min}}$ [m]	1,05	2,10	2,60	2,95
$E_{\max 2}$ [kV/m]	0,575	0,550	0,522	0,489
$X_{E_{\max 2}}$ [m]	6,85	8,00	8,55	9,10

Rysunek (Rys. 4) przedstawia krzywe natężenia pola elektrycznego dla poszczególnych odchylenia przewodów. Podobnie jak poprzednio, większym odchyleniom odpowiadają mniejsze natężenia pola.



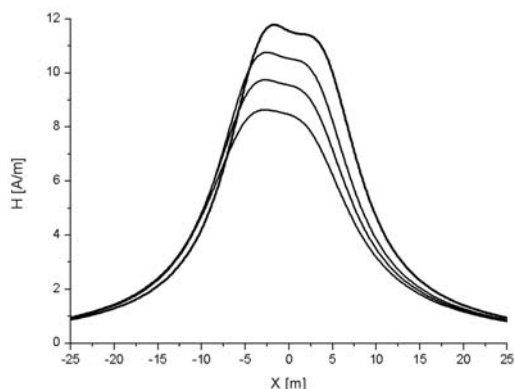
Rys.4. Rozkład natężenia składowej elektrycznej generowanej przez linię 110 kV (B2) na wysokości  $h=2\text{m}$  dla różnych stanów pracy przy odchyleniu przewodów linii WN w prawo od osi

Podobnie jak w przypadku składowej elektrycznej, autorzy postanowili przyjrzeć się wpływowi oddziaływania wiatru i związanego z nim odchylenia przewodów na rozkład składowej magnetycznej, zarówno dla oddziaływań powodujących wychylenie przewodów w lewo jak i w prawo. Tu również ze względu na brak symetrii słupa typu B2 uzyskano inne wyniki dla każdego z badanych przypadków. W tabelach 3 oraz 4 zestawione zostały natężenia składowej magnetycznej  $H$  wyrażonej w A/m odpowiednio dla odchylenia przewodów o kąt  $30^\circ$ ,  $45^\circ$  oraz  $60^\circ$  zarówno w lewo jak i w prawo. Odpowiadające im graficzne wyniki identyfikacji obliczeniowej widoczne są na rysunkach (Rys. 5 oraz Rys. 6).

Tu również, podobnie jak w przypadku analizy wykonanej dla składowej elektrycznej natężenia składowej magnetycznej spadają wraz ze wzrostem kąta odchylenia przewodów linii WN

Tabela 3. Maksymalne i minimalne natężenia pola magnetycznego wyznaczone na wysokości  $h=2\text{m}$  w przekroju poprzecznym pod linią 110 kV (B2) oraz miejsca ich występowania w zależności od kąta odchylenia przewodów

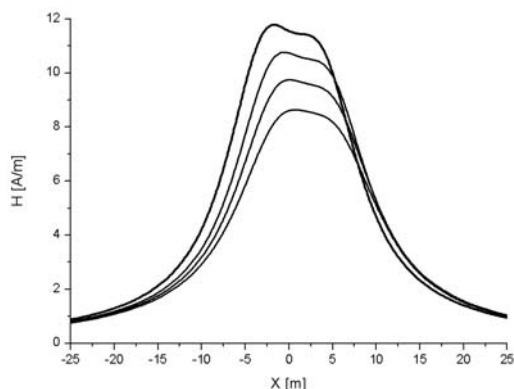
Odchylenie w lewo		Kąt odchylenia przewodów linii WN w związku z oddziaływaniem wiatru			
110 kV / B2		$0^\circ$	$30^\circ$	$45^\circ$	$60^\circ$
$H_{\text{max}1}$	[A/m]	11,78	10,77	9,74	8,64
$X_{H\text{max}1}$	[m]	-1,70	-2,50	-2,70	-2,80



Rys.5. Rozkład natężenia składowej magnetycznej generowanej przez linię 110 kV (B2) na wysokości  $h=2\text{m}$  dla różnych stanów pracy przy odchyleniu przewodów linii WN w lewo od osi

Tabela 4. Maksymalne i minimalne natężenia pola magnetycznego wyznaczone na wysokości  $h=2\text{m}$  w przekroju poprzecznym pod linią 110 kV (B2) oraz miejsca ich występowania w zależności od kąta odchylenia przewodów

Odchylenie w prawo		Kąt odchylenia przewodów linii WN w związku z oddziaływaniem wiatru			
110 kV / B2		$0^\circ$	$30^\circ$	$45^\circ$	$60^\circ$
$H_{\text{max}1}$	[A/m]	11,78	10,77	9,74	8,64
$X_{H\text{max}1}$	[m]	-1,70	-0,50	+0,10	+0,70

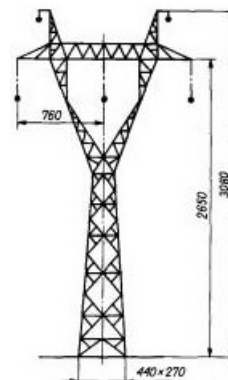


Rys.6. Rozkład natężenia składowej magnetycznej generowanej przez linię 110 kV (B2) na wysokości  $h=2\text{m}$  dla różnych stanów pracy przy odchyleniu przewodów linii WN w prawo od osi

### Analiza wpływu oddziaływania wiatru na rozkład pola generowanego przez napowietrzną linię 220 kV

Następnym przypadkiem poddanym obliczeniowej identyfikacji generowanego rozkładu pola elektromagnetycznego była linia napowietrzna o napięciu 220 kV zbudowana na słupach przelotowych typu H52 (Rys. 7). Ze względu na symetrię tego słupa kierunek oddziaływania wiatru i związanego z nim odchylenia przewodów nie powinien mieć znaczenia dla uzyskiwanych wartości natężenia składowej elektrycznej oraz magnetycznej jak również ich bezwzględnej odległości

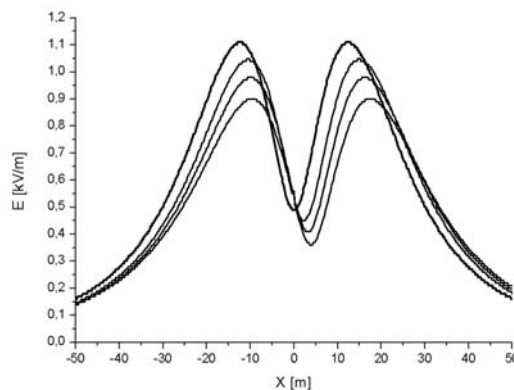
liczonej od osi linii napowietrznej. Z tego powodu autorzy wykonali jedynie symulację dla jednego kierunku oddziaływania siły porzecznej wychodząc z założenia, że przeciwny kierunek oddziaływania będzie stanowił lustrzane odbicie wcześniej opisanego przypadku.



Rys.7. Sylwetka słupa przelotowego typu H52 linii napowietrznej 220 kV

Tabela 5. Maksymalne i minimalne natężenia pola elektrycznego wyznaczone na wysokości  $h=2\text{m}$  w przekroju poprzecznym pod linią 220 kV (H52) oraz miejsca ich występowania w zależności od kąta odchylenia przewodów

		Kąt odchylenia przewodów linii WN w związku z oddziaływaniem wiatru			
220 kV / H52		$0^\circ$	$30^\circ$	$45^\circ$	$60^\circ$
$E_{\text{max}1}$	[kV/m]	1,107	1,045	0,978	0,899
$X_{E\text{max}1}$	[m]	-12,45	-10,45	-9,90	-9,65
$E_{\text{min}}$	[kV/m]	0,489	0,450	0,408	0,361
$X_{E\text{min}}$	[m]	0,00	2,25	3,15	3,90
$E_{\text{max}2}$	[kV/m]	1,107	1,045	0,978	0,899
$X_{E\text{max}2}$	[m]	12,45	14,95	16,25	17,45



Rys.8. Rozkład natężenia składowej elektrycznej generowanej przez linię 220 kV (H52) na wysokości  $h=2\text{m}$  dla różnych stanów pracy

W tabeli 5 zestawiono wyniki liczbowe dla lokalnych maksimumów i minimumów składowej elektrycznej oraz ich lokalizację w odniesieniu do osi linii, natomiast na rysunku (Rys. 8) zestawiono krzywe rozkładu składowej elektrycznej w przekroju poprzecznym linii napowietrznej 220 kV.

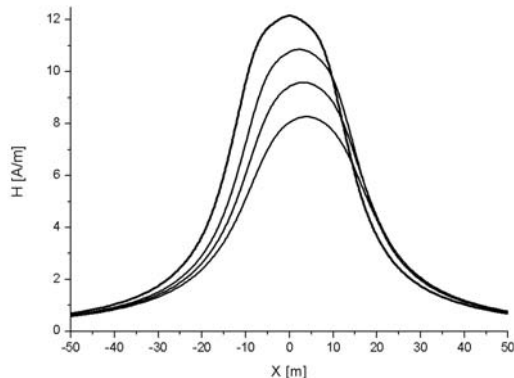
Dla składowej magnetycznej analogiczna reprezentacja wyników zawarta została w tabeli 6 oraz na rysunku (Rys. 9).

Z przedstawionych rozważań wynika wniosek, że oddziaływanie siły poziomej parcia wiatru zlokalizowanej w przekroju poprzecznym przęsła linii napowietrznej może oddziaływać na jej przewody, a przez to, zmieniać podstawową geometrię rozmieszczenia przewodów linii i prowadzić tym samym do generowania odkształconych pól

elektromagnetycznych ze szczególnym uwzględnieniem składowej elektrycznej oraz magnetycznej. Dla słupów o niesymetrycznym rozmieszczeniu przewodów należy wykonać analizę dla każdego przypadku, ponieważ te zdeformowane pola będą również niesymetryczne.

Tabela 6. Maksymalne i minimalne natężenia pola magnetycznego wyznaczone na wysokości  $h=2\text{m}$  w przekroju poprzecznym pod linią 110 kV (B2) oraz miejsca ich występowania w zależności od kąta odchylenia przewodów

		Kąt odchylenia przewodów linii WN w związku z oddziaływaniem wiatru			
220 kV / H52		$0^\circ$	$30^\circ$	$45^\circ$	$60^\circ$
$H_{\max}$	[A/m]	12,15	10,87	9,59	8,27
$X_{H_{\max}}$	[m]	0,00	+2,20	+3,10	+3,90



Rys.9. Rozkład natężenia składowej magnetycznej generowanej przez linię 220 kV (H52) na wysokości  $h=2\text{m}$  dla różnych stanów pracy

### Podsumowanie

Na terenach o wysokim poziomie urbanizacji i znacznym zagęszczeniem budynków dąży się do tego, aby obszar przeznaczony na lokalizację napowietrznej linii elektroenergetycznej pozostawał pod jak najmniejszym wpływem oddziaływań elektromagnetycznych związanych z przesyłem energii elektrycznej. Jak można się spodziewać, linie elektroenergetyczne zbudowane w oparciu o słupy o symetrycznej sylwetce (jak np. H52 dla linii 220 kV), pod wpływem wiatru generują pola o minimach odsuniętych od osi linii, bez większego odkształcenia w stosunku do pól występujących przy bezwietrznej pogodzie. Linie

elektroenergetyczne wykonane na słupach o niesymetrycznej sylwetce (jak np. B2 dla linii 110 kV) generują pola o zmieniającym się kształcie oraz rozsuniętych względem siebie lokalnych maksimach. Warto zatem przy okazji przeprowadzania obliczeniowej identyfikacji wypadkowego rozkładu natężenia pola elektrycznego oraz magnetycznego dla różnych wartości temperatur przeanalizować również rozkład pola spowodowany oddziaływaniem wiatru o różnej sile jak również kierunku jego oddziaływania. W przypadku występowania znacznych natężeń pola, głównie w zakresie składowej elektrycznej w pobliżu budynków mieszkalnych oraz gospodarskich, dla jego ograniczenia, można stosować specjalne, dedykowane konstrukcje ekranujące, wykonane w formie odpowiednio rozmieszczonych w przestrzeni elementów przewodzących. Interesujące rozwiązanie mogą stanowić np. cienkowarstwowe struktury powstające bezpośrednio na elastycznych materiałach polimerowych w procesie osadzania próżniowego PVD lub kształtowania laserowego dzięki czemu powstają na materiale przewodzące ścieżki o odpowiednio zaprojektowanej strukturze i o niewielkiej szerokości [6].

**Autorzy:** dr inż. Jacek Gumieła, Politechnika Wrocławska, Instytut Energoelektryki, ul. Wybrzeże Wyspiańskiego 27, 50-377 Wrocław, E-mail: jacek.gumieła@pwr.edu.pl; mgr inż. Andrzej Kocielski, E-mail: andrzej.kocielski@proton.me; dr hab. Dariusz Sztáfrowski, Instytut Energoelektryki, ul. Wybrzeże Wyspiańskiego 27, 50-377 Wrocław, E-mail: dariusz.sztarfrowski@pwr.edu.pl.

### LITERATURA

- [1] Rozporządzenie Ministra Zdrowia z dnia 17 grudnia 2019 r. w sprawie dopuszczalnych poziomów pól elektromagnetycznych w środowisku (Dz.U. 2019 poz. 2448)
- [2] PN-EN 50341-1:2013-03: Elektroenergetyczne linie napowietrzne prądu przemiennego powyżej 1 kV, Część 1: Wymagania ogólne, Specyfikacje wspólne, 2013
- [3] <https://www.elektro.info.pl>
- [4] Szuba M. i inni: Linie i stacje elektroenergetyczne w środowisku człowieka, Informator, Wydanie 4, Biuro Konsultingowo-Inżynierskie "EKO MARK", Wrocław, 2008
- [5] Sadiku M. N.O.: Numerical Techniques in Electromagnetics, Second Edition, CRC Press, 2001
- [6] Korzeniewska E., Walczak M., Rymaszewski J.: Elements of elastic electronics created on textile substrate, 2017 MIXDES - 24th International Conference "Mixed Design of Integrated Circuits and Systems, 2017