

Numeryczna analiza wpływu kąta padania fali płaskiej na wartości natężenia pola elektrycznego w układach ze złożoną konstrukcją ściany

Streszczenie. Celem publikacji jest analiza wpływu kąta padania fali płaskiej na wartości natężenia pola elektrycznego. Przedmiotem analizy był odosobniony układ zawierający ścianę wykonaną z cegieł. Rozpatrzono trzy powszechnie stosowane rodzaje cegieł: pełną i dwa typy cegieł klinkierowych (z drażeniami). Dokonana analiza uwzględniała także różne wartości konduktywności materiału ceramicznego. Zaprezentowany został rozkład natężenia pola elektrycznego generowanego przez system komunikacji bezprzewodowej pracujący przy standardowej częstotliwości ($f=2,4$ GHz). Zastosowano numeryczną metodę różnic skończonych w dziedzinie czasu (FDTD). Omówiono wpływ ilości drażeń na rozkład pola w obszarze za ścianą. Uzyskane wyniki mogą być przydatne przy szacowaniu wartości współczynnika tłumienia dla materiałów niejednorodnych.

Abstract. The aim of this article is the analysis of the influence of the incidence angle of the plane wave on the values of the electric field intensity. The object of the analysis was separated system contained the wall made of typical bricks. It was taken into account in common using three kinds of bricks: fully brick model and two types of clinker bricks (with hollowing). Also the different values of the conductivity of ceramic material were analysed. It was presented the electric field intensity generated by a wireless communication system operating at the standard frequency ($f=2.4$ GHz). The finite-difference time-domain method (FDTD) was used. The influence of number of the hollowing inside the bricks on the maximum values of the electric field intensity was discussed. The obtained results allow for the estimation of the value of attenuation coefficient. (The numerical analysis of the influence the incidence angle of the plane wave on the values of the electric field intensity inside the models with the complex construction of a wall).

Słowa kluczowe: propagacja fal elektromagnetycznych, metoda różnic skończonych w dziedzinie czasu (FDTD), komunikacja bezprzewodowa, materiały budowlane.

Keywords: electromagnetic waves propagation, finite difference time domain method (FDTD), wireless communication, building materials.

doi:10.12915/pe.2014.12.05

Wstęp

Analityczne rozwiązanie zagadnienia ukośnego padania fali płaskiej i propagacji w jednorodnej lub wielo-warstwowej jednorodnej płycie o zadanej grubości, jest prezentowane w dostępnej literaturze. Wyznaczone w ten sposób współczynniki są stosowane w wybranych przypadkach przy obliczaniu rozkładu pola w układach dużej skali. Analityczna metoda [12] obliczeń zjawisk polowych ma jednak ograniczone zastosowanie w przypadku występowania lokalnych niejednorodności materiałowych. Zgodnie z prezentowaną w [1, 4], w zakresie częstotliwości komunikacji bezprzewodowej, cegły drażone wykazują cechy materiałów niejednorodnych, porowatych ze względu na długość fali elektromagnetycznej. Z tego względu w artykule rozpatrzono zjawiska elektromagnetyczne w układach z materiałami jednorodnymi i niejednorodnymi, przy ukośnym padaniu fali płaskiej.

Celem niniejszej pracy jest analiza wpływu konstrukcji ściany wykonanej z powszechnie stosowanych materiałów budowlanych (tj. cegła pełna oraz dwa rodzaje cegieł klinkierowych zawierających drażenia) na rozkład pola elektrycznego przy uwzględnieniu częstotliwości używanej w komunikacji bezprzewodowej $f=2,4$ GHz.

Na podstawie typowych modeli konstrukcji ścian, w pracy również poddano analizie wpływ zmienności konduktywności materiału ceramicznego na wartości natężenia pola elektrycznego. Dobór wartości parametrów modelowanego materiału ma duży wpływ na wyniki obliczeń, których celem jest m.in. ułatwienie zrozumienia zjawisk falowych czy wyznaczenie tłumienia danego materiału.

Konstrukcja modelu

Przedmiotem analizy jest układ, na który składa się ściana wykonana z typowego, budowlanego materiału ceramicznego. Ze względu na konstrukcję ścian i strukturę materiałów analizie poddano zjawiska występujące przy propagacji fali elektromagnetycznej w układach z:

- materiałem jednorodnym w ujęciu makroskopowym, tj. cegła pełna;
- materiałem niejednorodnym, którego budowa wymaga uwzględnienia układu składników o zróżnicowanych właściwościach elektrycznych (cegła drażona).

Przyjęta klasyfikacja materiałów wynika z relacji wielkości elementów składowych materiałów w odniesieniu do długości propagującej fali elektromagnetycznej.

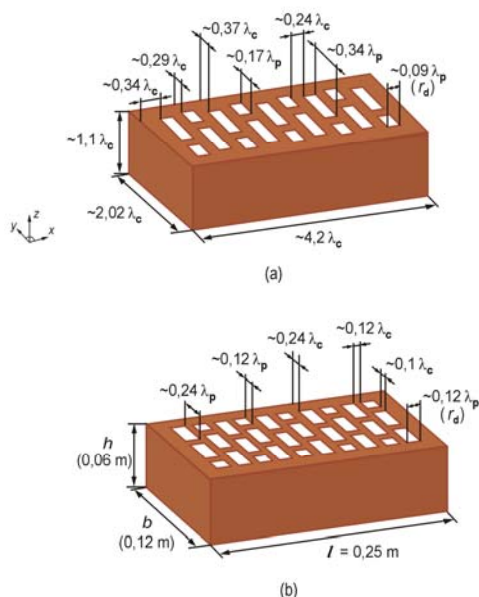
Uwzględnienie analitycznego rozwiązania problemu w modelu z ceglami klinkierowymi nie jest możliwe ze względu na złożoną wewnętrzną strukturę, na którą składa się specyficzny, powtarzalny układ materiałów o zróżnicowanych właściwościach elektrycznych. Ocena zjawisk zachodzących w tego typu przypadkach może być przeprowadzona z użyciem metod numerycznych (np. FDTD [2, 5], FDFD, FEM [3]).

Rozpatrywane modele ścian były tworzone w oparciu o dane dotyczące dwóch typów powszechnie stosowanych cegieł klinkierowych drażonych pionowo, których wymiary geometryczne zachowują proporcje 1:2:4 [4, 6] (rys. 1). Uwzględniono w konstrukcji modelu:

- cegły pełne;
- cegły z 18 drażeniami;
- cegły z 30 drażeniami.

Zmiana szerokości otworów (r_d) prowadzi do zmiany procentowego udziału dielektryka stratnego (tj. masy ceramicznej) w cegle. Na rys. 1 przedstawiono elektryczne odwzorowanie wymiarów analizowanych cegieł klinkierowych, przy założeniu, że względna przenikalność elektryczna materiału wynosi 4,44 zaś konduktywność $\sigma=0$ S/m. Wymiary elementów ceramicznych odniesiono do długości fali $\lambda_c=0,0593$ m przy $f=2,4$ GHz, gdzie przez λ_p oznaczono długość fali w powietrzu.

Dyskusji poddano modele ścian jednowarstwowych o grubości $b=0,12$ m. Ze względu na różne wartości parametrów elektrycznych cegieł [6, 7, 8, 11] oraz ich strukturę, rozpatrzono sześć wariantów (tabela 1).

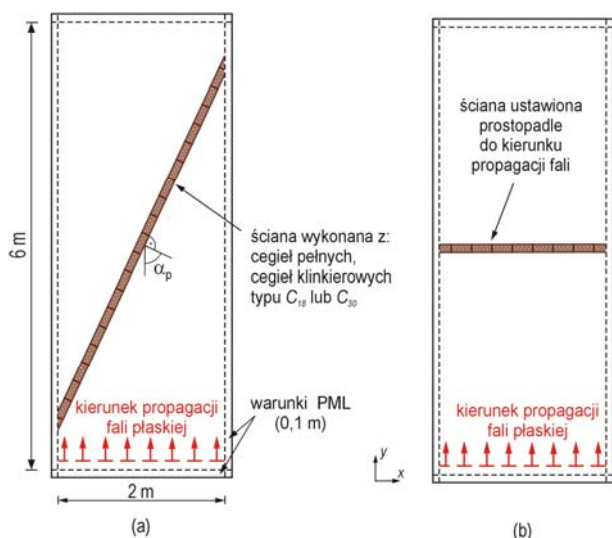


Rys.1. Elektryczne wymiary cegieł przy częstotliwości $f = 2,4$ GHz: (a) cegła C_{18} , (b) cegła C_{30}

Tabela 1. Oznaczenia modeli ścian oraz opis ich właściwości

Oznaczenie	Materiał budowlany	ϵ_r'	σ [S/m]
C_01	pełna cegła	4,44	0,01
C_02	pełna cegła	4,44	0,02
C18_01	cegła klinkierowa (typu C_{18}), z rozmiarem drążen $r_d = 0,011$ m	4,44	0,01
C18_02	cegła klinkierowa (typu C_{18}), z rozmiarem drążen $r_d = 0,011$ m	4,44	0,02
C30_01	cegła klinkierowa (typu C_{30}), z rozmiarem drążen $r_d = 0,015$ m	4,44	0,01
C30_02	cegła klinkierowa (typu C_{30}), z rozmiarem drążen $r_d = 0,015$ m	4,44	0,02

Do analizy wpływu kąta padania fali (α_p) na wartości natężenia pola przyjęto taką długość modelu, która zapewniała obserwację rozkładu pola elektrycznego przed oraz za ścianą. Wymiary oraz geometrię modelu przedstawiono na rys. 2.



Rys.2. Geometria modelu przy kącie padania fali: (a) 65° , (b) 0°

W rozpatrywanym zagadnieniu, na krawędziach modelu zastosowano warstwę PML [2, 9]. Absorpcję propagującej fali uzyskano przez przyjęcie warstwy o głębokości spełniającej kryteria przyjmowane przy deklarowaniu tego typu warunków [5]. Testy wykonane w układzie modelowym (propagacja fali w otwartej półprzestrzeni o właściwościach próżni) potwierdziły poprawność przyjętej szerokości warstwy, przy błędzie wyników nie przekraczającym 2%.

Wymuszenie pola w układzie stanowiła harmoniczna fala płaska spolaryzowana liniowo, propagująca w kierunku zgodnym z osią Oy ($\mathbf{k} = 1_y$)

$$(1) \quad \mathbf{E}(x, y, t) = E_z \bar{1}_z = \sin(\omega t) \cdot 1(t) \cdot \bar{1}_z$$

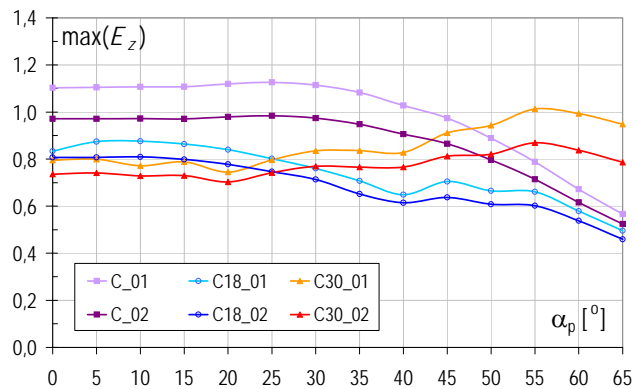
Obszar rozpatrywanych modeli podlegał dyskretyzacji przez wpisanie równomiernej siatki komórek Yee [2, 5, 9]. Maksymalny liniowy rozmiar siatki różnicowej w tworzonym dwuwymiarowym modelu wynosił $\Delta_x = \Delta_y = 1$ mm. Przy liczbie komórek Yee przypadających na długość fali w dielektryku wynoszącej 59 w istotnym stopniu zredukowano efekty schodkowe w konstrukcji modelu. W przyjętym modelu numerycznym, rozdzielczość siatki różnicowej gwarantowała spełnienie warunku Nyquista [9]. Potwierdzeniem tego są otrzymane wyniki obliczeń, w których nie zaobserwowano artefaktów w rozkładzie natężenia pola w obszarach o niejednorodnej strukturze materiałów.

Obliczenia rozkładu pola wykonano przy wykorzystaniu metody różnic skończonych w dziedzinie czasu (FDTD) [2, 5, 9].

Wyniki obliczeń

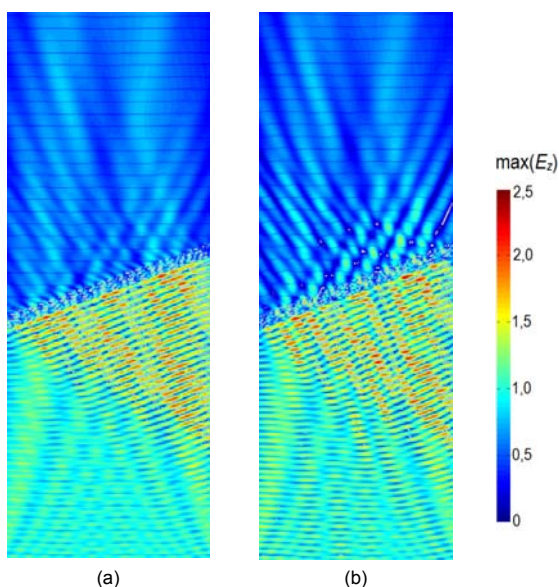
Na rysunku 3 przedstawiono maksymalne wartości natężenia pola uzyskane dla modeli ścian wykonanych przy uwzględnieniu trzech typów cegieł (pełnej oraz klinkierowych o typowych rozmiarach drążen: C_{18} , C_{30}). Charakterystyki przedstawiają wpływ kąta padania fali na wartość $\max(E_z)$ w obszarze za ścianą. Dwukrotne zwiększenie konduktywności powoduje zmniejszenie wartości natężenia pola z zachowaniem podobieństwa pomiędzy przebiegami charakterystyk w ramach tego samego wariantu konstrukcji ściany.

Z fizycznego punktu widzenia takie zjawisko wynika z warunków ciągłości pola, uzyskanych z rozpatrzenia równań Maxwella na granicy środowisk o różnych właściwościach elektrycznych oraz magnetycznych [10]. Składowa normalna do powierzchni nieciągłości materiałowej, skierowana do obszaru drugiego, częściowo ulega odbiciu zależnemu od parametrów elektrycznych danego ośrodka.



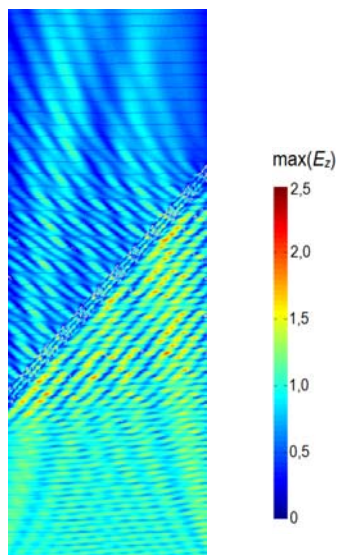
Rys.3. Charakterystyka zmian wartości maksymalnej natężenia pola w funkcji kąta padania fali przy częstotliwości 2,4 GHz

Niezależnie od kąta padania fali płaskiej stwierdzono, że propagacja fali elektromagnetycznej wewnątrz cegły ma złożony przebieg. Z tego powodu pojawiają się wielokrotne odbicia na granicy powietrze – masa ceramiczna. Liczba oraz wielkość drażeń występujących w cegle, jak również wartość kąta padania fali skutkuje zmianą obrazu natężenia pola elektrycznego w strefie za murem (rys. 4).



Rys.4. Porównanie wpływu ilości drażeń na $\max(E_z)$ otrzymane przy $\alpha_p = 25^\circ$ dla modeli: (a) C18_01, (b) C30_01

W odległości powyżej 2 m za ścianą, w przypadku $\alpha_p = 25^\circ$, niezależnie od wartości kondukcyjności stwierdzono jedynie 2% różnicę wielkości $\max(E_z)$. Jedynie w przypadku modelu wykonanego z cegieł typu C₃₀ wraz ze wzrostem kąta padania fali ($\alpha_p \geq 25^\circ$) wartości natężenia pola elektrycznego rosną (aż o 25%). Najwyższe wartości dla tego modelu uzyskano przy $\alpha_p = 55^\circ$ (rys. 5).



Rys.5. Obwiednie wartości składowej E_z uzyskane dla modelu C30_01, przy $\alpha_p = 55^\circ$

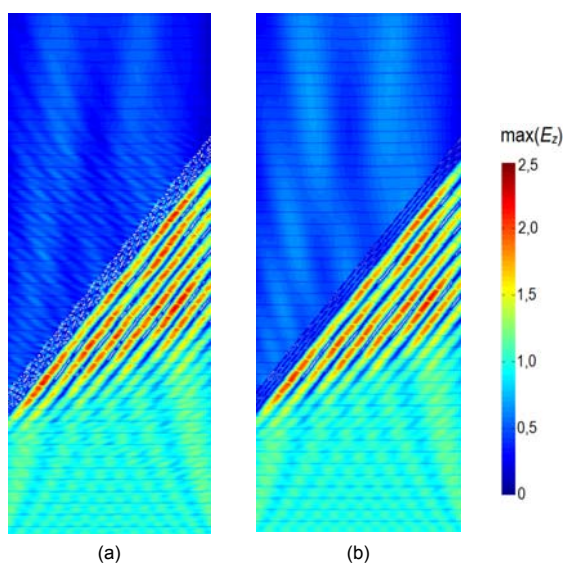
Zjawiska fizyczne zachodzące przy przechodzeniu fali przez kolejne obszary powietrza i masy ceramicznej znajdują odzwierciedlenie w wartościach maksymalnych składowej E_z . Wskazany efekt jest szczególnie widoczny przy ocenie zjawisk występujących za murem wykonanym z

cegieł typu C₃₀. Efekty odbić fali od ściany powodują powstawanie chwilowych minimów i maksimów, których ilość jest uzależniona od kąta padania fali (rys. 4-5).

Rozpatrując ścianę modelowaną przy użyciu cegieł pełnych wraz ze wzrostem kąta padania fali ($\alpha_p \geq 25^\circ$) zauważono spadek maksymalnych wartości natężenia pola. Różnica w wartościach $\max(E_z)$ pomiędzy wariantem ściany ustawionej prostopadle do kierunku propagacji fali a przypadkiem dla $\alpha_p \geq 65^\circ$ wynosi aż 46%.

Natomiast przy wartości kąta $\alpha_p = 60^\circ$ maksymalne wartości natężenia pola elektrycznego między modelem z cegieł pełnych a z cegieł typu C₁₈ różnią się co najwyżej o 12%. Natomiast dla modelu C30_01 różnica sięga 70% (rys. 3).

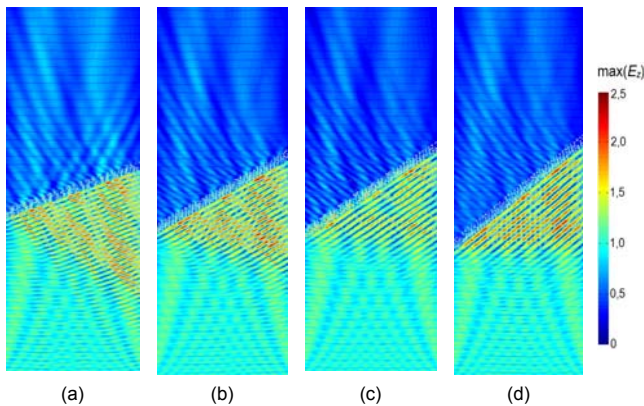
Na rys.6 przedstawiono przykładowe porównanie rozkładów $\max(E_z)$ przy $\alpha_p = 60^\circ$. Jak wynika z rysunku maksymalne wartości natężenia pola pomiędzy modelem C_01 a C18_01 różnią się o 14%. Wskazany efekt wynika ze złożonej struktury cegły powodującej występowanie interferencji, czego skutkiem są chwilowe minima i maksima w obszarze za ścianą.



Rys.6. Maksymalny rozkład składowej E_z w analizowanym obszarze, przy $\alpha_p = 60^\circ$ dla modeli: (a) C18_01, (b) C_01

Na rys.7 zaprezentowano przykładowy rozkład maksymalnych wartości składowej E_z , przy kątach padania $\alpha_p \in \{25^\circ, 35^\circ, 40^\circ, 45^\circ\}$, uzyskanych dla modelu C18_01. W przypadku $\alpha_p = 40^\circ$ (rys. 7c) wartości natężenia pola zarówno za, jak też przed ścianą są wyraźnie niższe niż w pozostałych wariantach, czego potwierdzeniem są charakterystyki przedstawione na rysunku 3. Różnica w wartościach $\max(E_z)$ wynosi co najwyżej 8% (rys. 7b,c,d). Natomiast najwyższe wartości stwierdzono dla $\alpha_p = 25^\circ$ (rys. 7a). Wskazany efekt wynika z niewielkiego kąta padania fali, co zwiększa długość drogi, jaką pokonuje fala elektromagnetyczna przechodząc przez drażenia w cegłach.

Dodatkowym powodem jest fakt, iż wraz ze wzrostem kąta padania fali wydłuża się „rzeczywista” droga przejścia fali przez materiał porowaty, jakim jest cegła. Zatem zwiększa się efektywne tłumienie w materiale ceramicznym, przy równoczesnym stopniowym wzroście liczby powierzchni granicznych materiał ceramiczny – powietrze. Ulega więc zwiększeniu również liczba cząstkowych odbić wewnątrz ściany.



Rys.7. Maksymalny rozkład wartości natężenia pola dla C18_01: (a) $\alpha_p = 25^\circ$, (b) $\alpha_p = 35^\circ$, (c) $\alpha_p = 40^\circ$, (d) $\alpha_p = 45^\circ$

Podsumowanie

W artykule przedstawiono analizę wpływu kąta padania fali płaskiej w układzie ze ścianą wykonaną z materiału jednorodnego oraz złożonego na wartości natężenia pola elektrycznego. Uwzględniono także zależność pomiędzy ilością drążów w ceglach a rozkładem natężenia pola. Analiza rozpatrywanych modeli wykazała, że:

- zwiększenie konduktywności analizowanych materiałów powoduje jedynie obniżenie wartości $\max(E_z)$ przy jednoczesnym zachowaniu zbliżonego kształtu przebiegu charakterystyk;
- zmienność ilości i wielkości drążów oraz kąta padania fali płaskiej skutkuje licznymi interferencjami na granicy powietrze – masa ceramiczna, co zmienia obraz natężenia pola szczególnie w obszarze za rozpatrywanymi konstrukcjami ścian;
- wzrost α_p powoduje obniżenie wartości natężenia pola o maksymalnie 40% względem modelu z prostym układem ściany do kierunku propagacji fali EM;
- przy $\alpha_p = 25^\circ$ dla obu typów cegieł klinkierowych wartości $\max(E_z)$ różnią się co najwyżej 2%, gdyż przy takim kącie padania fali płaskiej zachodzi najmniej odbić wewnątrz drążów;
- najwyższą wartość natężenia pola uzyskano dla modelu C30_01 przy $\alpha_p = 55^\circ$;
- przy $\alpha_p = 65^\circ$ różnica pomiędzy wartościami $\max(E_z)$ dla obu modeli cegieł (pełna i C18) wynosi co najwyżej 12%.

Jak wynika z przeprowadzonej analizy, kąt padania fali płaskiej oraz konstrukcja ściany wykonanej z niejednorodnego materiału mają duży wpływ na uzyskane wartości natężenia pola elektrycznego. Stanowi to ważny aspekt z uwagi na właściwą interpretację zjawisk falowych zachodzących w konstrukcjach zawierających złożone oraz niejednorodne materiały budowlane.

Każdy materiał budowlany charakteryzuje się zmiennością parametrów elektrycznych wynikającą m.in. z czynników atmosferycznych, które są często pomijane przy analizie tego typu zagadnień. Celem autorów jest dalsza szczegółowa analiza powszechnie stosowanych materiałów budowlanych uwzględniająca wyżej wspomniany problem,

zwłaszcza dla zagadnień związanych z nasiąkliwością materiałów budowlanych.

Przy rozpatrywaniu układów dużej skali dodatkowym utrudnieniem jest dokładne odwzorowanie wszystkich drążów w ceglach tworzących konstrukcję budynku. Z tego powodu konieczne jest wyznaczenie parametrów zastępczych dla tego typu złożonych materiałów. Przedstawione w niniejszym artykule wyniki mogą stanowić pomoc przy wyznaczeniu takich parametrów zastępczych pozwalających na zastąpienie materiału niejednorodnego (cegły drążone) modelem wykonanym z jednorodnej warstwy.

LITERATURA

- [1] Choroszucho A., Butryło B., The numerical analysis of the influence conductivity of clinker bricks and the size of their hollows on the distribution of the electromagnetic field, *Przegląd Elektrotechniczny*, 88 (2012), nr 11a, 351-354
- [2] Taflov A., Hagness S. C., Computational electrodynamics, The Finite-Difference Time-Domain Method. Boston, Artech House, (2005)
- [3] Butryło B., Równoległe obliczenia pola elektromagnetycznego w układach z materiałami dyspersyjnymi, *Oficyna Wydawnicza Politechniki Białostockiej*, (2012)
- [4] Choroszucho A., Butryło B., Local attenuation of electromagnetic field generated by wireless communication system inside the building, *Przegląd Elektrotechniczny*, 87 (2011), nr 2, 123-126
- [5] Oskooi A. F., Roundyb D., Ibanescua M., Bermelc P., Joannopoulou J. D., Johnson S. G., MEEP: A flexible free-software package for electromagnetic simulations by the FDTD method, *Computer Physics Communications*, 181 (2010), 687-702
- [6] PN-EN 771-1:2006 Wymagania dotyczące elementów murowych. Część 1: Elementy murowe ceramiczne
- [7] Landron O., Feuerstein M. J., Rappaport T. S., A comparison of theoretical and empirical reflection coefficients for typical exterior wall surfaces in a mobile radio environment, *IEEE Trans. Antennas Propagat.*, vol. 44 (1996), 341-351
- [8] Tan S. Y., Tan M. Y., Tan H. S., Multipath delay measurements and modeling for interfloor wireless communications, *IEEE Transactions on Vehicular Technology*, vol. 49 (2000), no. 4, 1334-1341
- [9] Sadiku M. N. O., Numerical techniques in electromagnetics. CRS Press LLC. 2nd edition, (2001)
- [10] Piątek Z., Jabłoński P., Podstawy teorii pola elektromagnetycznego, WNT, Warszawa, (2010)
- [11] Hasted J. B., Shah M. A., Microwave absorption by water in building materials. *British Journal of Applied Physics*, 15 (1964), 825-836
- [12] Orfanidis S. J., Electromagnetic waves and antennas, Rutgers University, (2010), www.ece.rutgers.edu/~orfanid/ewa

Autorzy:

dr inż. Agnieszka Choroszucho,
E-mail: a.choroszucho@pb.edu.pl,
dr hab. inż. Bogusław Butryło,
E-mail: b.butrylo@pb.edu.pl
Politechnika Białostocka, Wydział Elektryczny,
Katedra Elektrotechniki Teoretycznej i Metrologii,
ul. Wiejska 45D, 15-351 Białystok.