

# Numeryczna analiza wpływu kąta padania fali elektromagnetycznej względem ściany wykonanej z cegieł na jakość komunikacji bezprzewodowej wewnątrz inteligentnych budynków

Agnieszka Choroszucho, Adam Steckiewicz

## Wprowadzenie

Zauważalny jest wzrost zainteresowania budynkami inteligentnymi (m.in. domy mieszkalne, zakłady pracy, centra handlowe). Ulokowane w budynku czujniki komunikujące się z jednostką centralną bazują głównie na komunikacji bezprzewodowej. Oszczędności finansowe i energetyczne nie są jednak jedynymi potrzebami klientów. Badania wskazują, że ponad połowa potencjalnych użytkowników instalacji oczekuje od niej przede wszystkim zapewnienia komfortu pracy czy mieszkania, zaś co trzeci badany wskazuje na pragnienie zwiększenia poczucia bezpieczeństwa [3, 5]. Pomijając aspekty ekonomiczne, inteligentne budownictwo ma wymiar społeczny oraz wpisuje się w trend poprawy jakości życia i pracy.

Budownictwo inteligentne oparte na sieciach bezprzewodowych i stałym łączy z Internetem staje się standardem na zachodzie, lecz w ciągu ostatnich kilku lat zyskuje także na popularności w Polsce [3, 4]. Toteż równocześnie należy liczyć się nie tylko z zapotrzebowaniem zgłaszanym przez konstruktorów nowych obiektów, ale także z modernizacją istniejącej od wielu lat infrastruktury. Problemem staje się ocena niezawodności łącza bezprzewodowego wewnątrz inteligentnego budynku. Zarówno dawniej, jak i obecnie stosowane materiały na ściany i stropy mają niebagatelny wpływ na natężenie pola elektromagnetycznego. Tłumienie fali przez materiał przegrody może uniemożliwić komunikację. Propagacja fal EM jest silnie uzależniona od geometrii budulca (np. drążenia

**Streszczenie:** W artykule przedstawiono analizę wpływu kąta padania fali elektromagnetycznej generowanej przez komunikację bezprzewodową. Przedstawiono porównanie rozkładów pola elektrycznego w obszarach zawierających dwa rodzaje ścian jednowarstwowych. Zastosowano modele ścian wykonanych z pełnych cegieł oraz powszechnie stosowanych cegieł drążonych (klinkierowych). Przedstawiono wyniki chwilowych wartości pola uzyskanych podczas propagacji fali elektromagnetycznej, jak również rozkłady maksymalnych wartości pola otrzymanych w stanie ustalonym. Przy analizie numerycznej zastosowano metodę różnic skończonych w dziedzinie czasu (FDTD). Analiza dotyczyła częstotliwości stosowanej w sieciach bezprzewo-

wych (2,4 GHz oraz 5 GHz) montowanych w inteligentnych budynkach. Wyniki dowodzą, iż w tego typu przypadkach konieczne jest przeprowadzenie indywidualnych obliczeń dla poszczególnych wariantów, ponieważ zachodzące zjawiska polowe mają złożony i losowy przebieg. Celem tego typu analizy jest lepsze zrozumienie zachodzących zjawisk polowych wewnątrz złożonych materiałów budowlanych oraz możliwość lepszego modelowania uwzględniającego mobilne systemy komunikacji bezprzewodowej.

Słowa kluczowe: inteligentne budynki, materiały budowlane, propagacja fali elektromagnetycznej, metoda różnic skończonych w dziedzinie czasu (FDTD), komunikacja bezprzewodowa.

**Abstract:** The article presents an analysis of the effect of the angle of incidence of the electromagnetic waves generated by wireless communication systems. Presents a comparison of distributions of the electric field in areas containing two types of single-layer walls. Used models of walls made of solid bricks and the commonly used hollow bricks (clinker). Presents results obtained instantaneous values of the electromagnetic wave propagation as well as the schedule of the maximum value of the field obtained in the steady state. To the numerical analysis the finite-difference time-domain method (FDTD) was applied. Analysis related to the frequency used in

wireless networks (2.4 GHz and 5 GHz), installed in intelligent buildings. The results show that in such cases it is necessary to carry out individual calculations for different options because occurring phenomena field are complex and random process. The aim of this type of analysis is to better understand the phenomena occurring inside the complex field of building materials and the possibility of better modeling takes into account the mobile wireless communication systems.

Keywords: intelligent buildings, building materials, electromagnetic wave propagation, finite difference time domain method (FDTD), wireless communications systems.

w ceglach klinkierowych) i jego właściwości (przenikalność elektryczna i przewodność elektryczna) [6].

### Geometria oraz przyjęte założenia analizowanego modelu

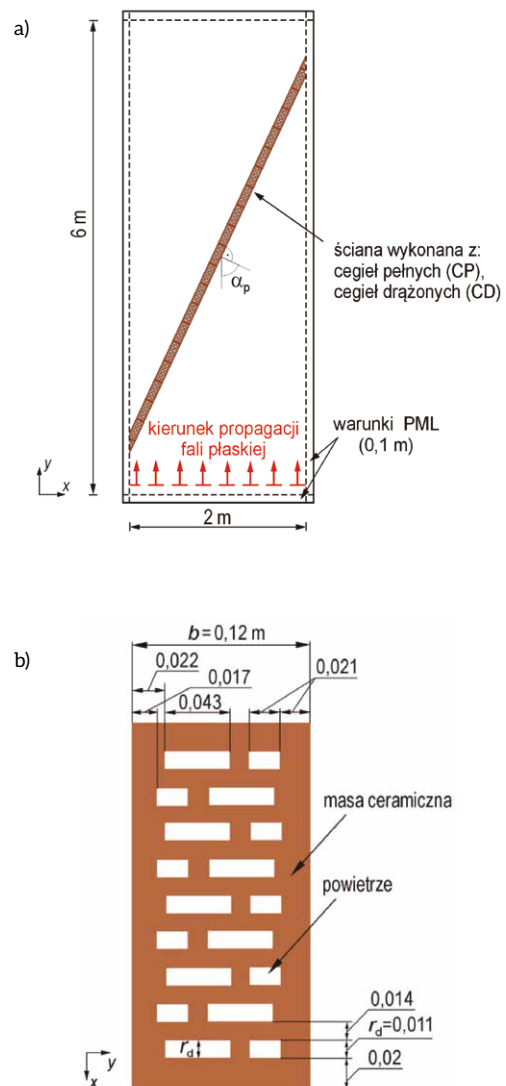
Tematem analizy był wpływ kąta padania fali elektromagnetycznej na wartości pola w obszarze za ścianą wykonaną z powszechnie stosowanych materiałów ceramicznych. Tego typu ściany klasyfikowane są do ścian jednowarstwowych, często działowych, które oddzielają pomieszczenia mieszkalne czy biurowe. Do analizy wpływu kąta padania fali ( $\alpha_p$ ) na wartości natężenia pola zastosowano modele ścian o grubości 0,12 m (rys. 1 a). Rozpatrzono dwa rodzaje konstrukcji: ściana wykonana z cegieł drążonych, których rozmiar drążenia ( $r_d$ ) wzdłuż osi  $Ox$  wynosił 11 mm (model CD) (rys. 1 b), oraz – przy takich samych warunkach i geometrii – ściana modelowana z cegieł pełnych (model CP).

Na potrzeby dalszej analizy numerycznej wymiary podane na rys. 1 b wyznaczono jako wartości uśrednione na podstawie przeprowadzonych pomiarów. Sposób określenia parametrów próby precyzuje norma [2, 7]. Wytyczne normy określają liczbę próbek wymaganych do badania każdej właściwości elementu murowego na 3 lub 10 sztuk. W pracy zdecydowano się na dokonanie własnego pomiaru na losowo dobranej próbce 50 sztuk cegieł. Zasadniczym powodem był brak unormowań dotyczących wymiarów drążenia wewnątrz cegieł. W normach opisane są dopuszczalne odchyłki zewnętrznych wymiarów cegieł, powstałe na skutek procesów formowania, suszenia czy wypalania materiałów ceramicznych [2, 7]. Oszacowanie względnego udziału drążenia elementów murowych określa się m.in. przez ważenie hydrostatyczne. Tak zdefiniowane próby stanowią podstawę do przyjęcia danej partii materiału. Ze względu na ocenę właściwości elektrycznych niezbędne jest uwzględnienie rozkładu i rozmiaru drążenia.

W rozpatrywanym zagadnieniu na wszystkich krawędziach zastosowano absorpcyjną warstwę PML [1]. Źródłem pola była fala płaska propagująca w kierunku prostopadłym do ściany w sytuacji, gdy kąt padania fali  $\alpha_p = 0^\circ$ :

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

Obliczenia dotyczyły dwóch częstotliwości stosowanych w komunikacji bezprzewodowej (2,4 GHz oraz 5 GHz). Analizę rozkładów pola, jak również ilościową ocenę tłumienia fal wykonano w obszarze za ścianą, na podstawie obserwacji składowej pola  $\max(E_z)$  [1]. Do analizy zastosowano metodę różnic skończonych w dziedzinie częstotliwości (ang. *Finite Difference Time Domain*, FDTD) [1], wykorzystywaną przy obliczeniach pól elektromagnetycznych zmiennych w czasie i dotyczących wielkich częstotliwości oraz sygnałów szerokopasmowych [1]. Obszar rozpatrywanych modeli podlegał dyskretyzacji przez wpisanie równomiernej siatki komórek Yee, których rozmiar w rozpatrywanych modelach wynosił  $\Delta_x = \Delta_y = 1$  mm. Przy przyjęciu parametrów elektrycznych opisujących materiał cegieł (przenikalność elektryczna  $\epsilon_r = 4,44$  oraz konduktywność  $\sigma = 0,01$  S/m) minimalna liczba komórek Yee przypadających na długość fali wynosiła 59. Z tego powodu w istotnym stopniu

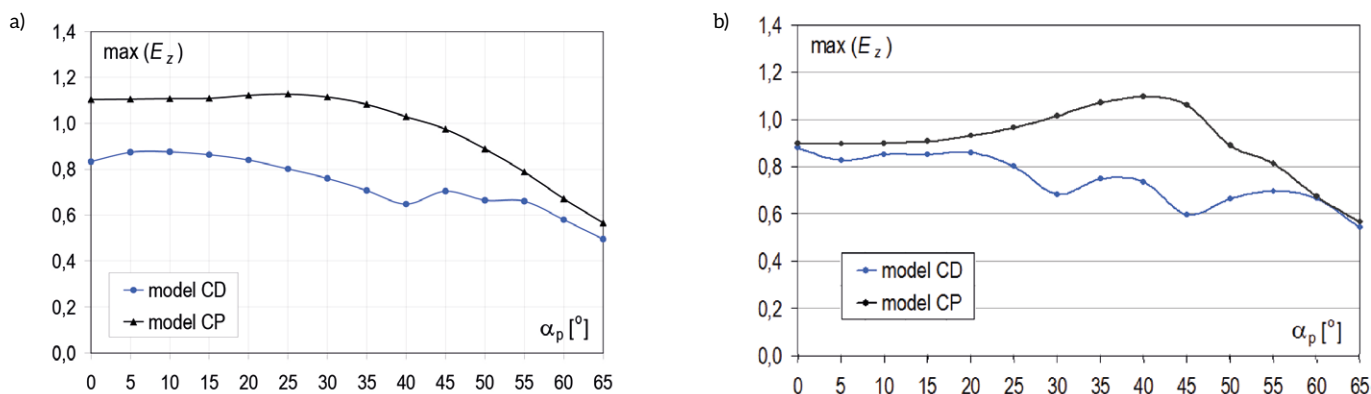


Rys. 1. Analizowany model (a) oraz wymiary cegły drążonej (b)

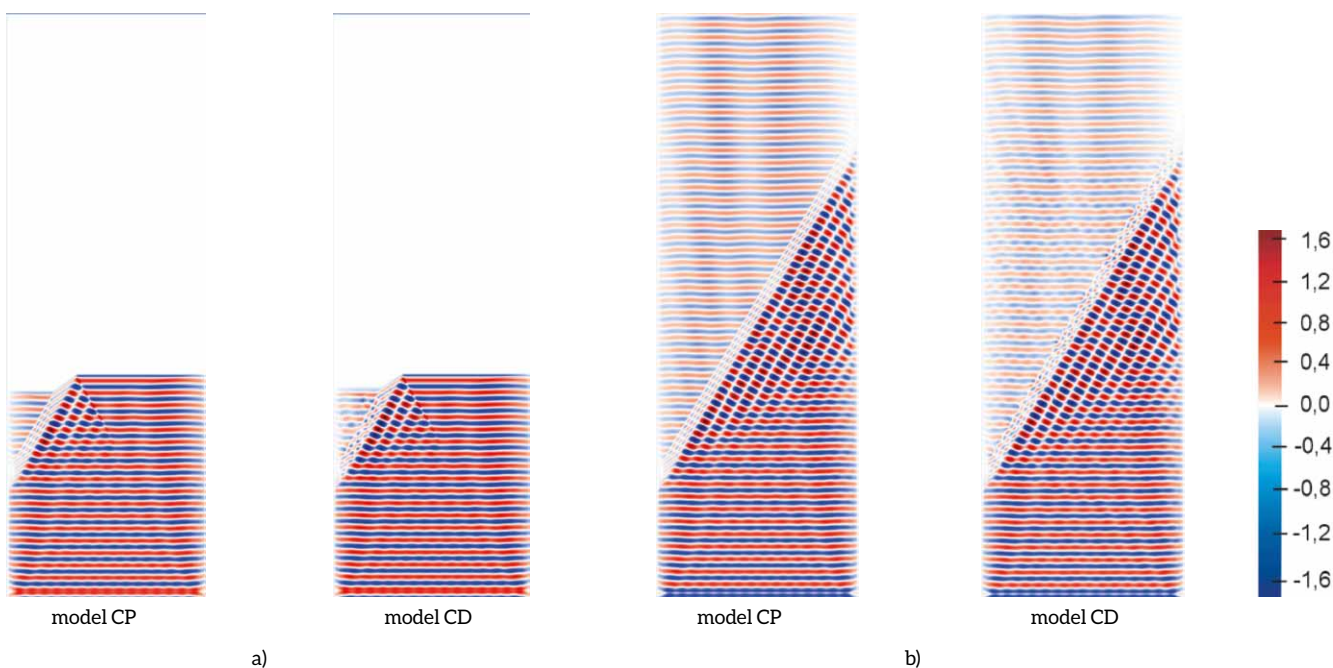
zredukowano również efekty schodkowe w konstrukcji modelu. Potwierdzeniem tego są otrzymane wyniki obliczeń, w których nie obserwuje się artefaktów w rozkładzie natężenia pola w obszarach o niejednorodnej strukturze materiałów, takich jak np. ściana wykonana z cegieł drążonych.

### Przykładowe wyniki obliczeń

Na rysunku 2 przedstawiono maksymalne wartości natężenia pola uzyskane dla modeli ścian wykonanych z cegieł pełnych (CP) oraz cegieł drążonych (CD). Charakterystyki przedstawiają wpływ kąta padania fali na wartość  $\max(E_z)$  w obszarze za ścianą, otrzymaną przy  $f = 2,4$  GHz (rys. 2 a) oraz przy  $f = 5$  GHz (rys. 2 b). W obu przypadkach, mimo iż cegły drążone zawierają powietrze, obliczenia wykazały, że za ścianą wykonaną z cegieł pełnych wartości natężenia pola są wyższe, czyli lepsza jest jakość transmitowanego sygnału. Drążenia wpływają na lokalne obniżenie wartości pola, które przy częstotliwości



**Rys. 2.** Charakterystyka zmian wartości maksymalnej natężenia pola w funkcji kąta padania fali przy częstotliwości: (a) 2,4 GHz oraz (b) 5 GHz



**Rys. 3.** Chwilowy rozkład składowej  $E_z$  w analizowanym obszarze przy  $f = 2,4$  GHz dla obu modeli zarejestrowany w kroku iteracyjnym: (a) 2640 oraz (b) 8280

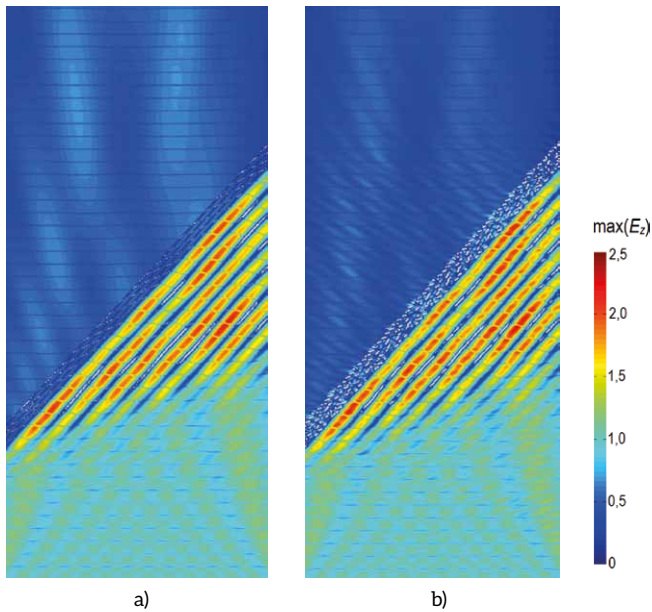
2,4 GHz jest widoczne dla  $\alpha_p = 40^\circ$ . Natomiast przy ponaddwukrotnym zwiększeniu częstotliwości (5 GHz) widoczne są dwa zmniejszenia wartości pola: dla  $\alpha_p = 30^\circ$  oraz  $\alpha_p = 45^\circ$ .

Rysunek 3 obrazuje przykładowe wyniki chwilowego rozkładu pola elektrycznego dla różnych chwil czasowych (w miarę postępu propagującej fali elektromagnetycznej). Rysunki dotyczą sytuacji, gdy  $\alpha_p = 60^\circ$ . Przy analizie ściany wykonanej z niejednorodnego materiału ceramicznego (model CD) stwierdzono, że propagacja fali elektromagnetycznej wewnątrz cegły ma złożony przebieg. Pojawiają się wielokrotne odbicia na granicy powietrze – masa ceramiczna. Liczba i wielkość drążeń występujących w cegle oraz wartość kąta padania fali skutkuje

zmianą obrazu natężenia pola elektrycznego w strefie za murem (rys. 3, 4).

W obszarze za ścianą zauważalne jest zmniejszenie wartości natężenia pola elektrycznego wynikające ze stratności masy ceramicznej ( $\sigma = 0,01$  S/m). Lokalna zmiana prędkości fali przy przechodzeniu przez kolejne obszary powietrza i masy ceramicznej znajduje odzwierciedlenie w rozkładach pola i występowaniu interferencji. Ze względu na dużą liczbę drążeń i powierzchni granicznych wskazany efekt jest szczególnie widoczny przy ocenie zjawisk występujących za murem wykonanym z cegły drążonej. Zakres zmian pola przyjmuje w tym przypadku wyższe wartości.





Rys. 4. Maksymalny rozkład składowej  $E_z$  w analizowanym obszarze przy  $f = 2,4$  GHz, przy  $\alpha_p = 60^\circ$ : (a) model CP, (b) model CD

Na rysunku 4 przedstawiono maksymalne wartości natężenia pola uzyskane w stanie ustalonym.

Efekty odbić fali od ściany, powodujące powstawanie chwilowych minimów i maksimów, są szczególnie widoczne w odległości 0,4 m przed murem. Analizowane różnice w wartościach pola można wytłumaczyć w ujęciu makroskopowym przez uwzględnienie udziału masy ceramicznej w objętości cegły, wyznaczonej na podstawie zależności:

$$V_{\%mc} = \frac{V_c - V_d}{V_c} \cdot 100\% \quad (2)$$

gdzie przez  $V_d$  oznaczono objętość wszystkich drążów w danej cegle, zaś  $V_c$  odpowiada objętości cegły. Wartość współczynnika  $V_{\%mc}$  w przypadku cegły z drążeniami wynosi 78,88%. Większa wartość  $V_{\%mc}$  powoduje mniejsze zniekształcenie czoła fali w obszarze za ścianą. Wynika to z większej wypadkowej jednorodności materiału. Natomiast na skutek tłumienia wpływa to negatywnie na maksymalne wartości pola.

## Podsumowanie

Prezentowane wyniki analizy numerycznej miały na celu określenie wpływu konstrukcji ścian z niejednorodnym rozkładem masy ceramicznej na rozkład pola elektromagnetycznego. Otrzymane rezultaty wskazują, że zmiana kąta propagującej fali oraz złożoność masy ceramicznej (uwzględniającej bądź też nie drążenia) ma duże znaczenie na rozkład pola. Każdy przypadek musi być indywidualnie rozpatrywany. Obserwowane zmiany wartości natężenia pola istotnie zależą od efektów polowych, wielokrotnych odbić na granicy masa ceramiczna – powietrze i wielkości drążów w stosunku do długości fali elektromagne-

tycznej. Tego typu zjawiska mogą być analizowane ilościowo poprzez obliczenia numeryczne.

Porowatość ośrodka w ujęciu elektromagnetycznym skutkuje tym, iż fale doznają wielokrotnych odbić i ugięć przy względnie małym tłumieniu. Opisane wykresy i ich graficzna prezentacja świadczą o złożonych zjawiskach falowych, jakie występują podczas propagacji fali przez materiał elektrycznie porowaty. W przypadku makroskopowej analizy budynków niezbędna jest homogenizacja i uproszczenie konstrukcji oraz ujednorodnienie właściwości materiałów. Takie podejście jest narzucone przez ograniczenia wynikające z możliwości obliczeniowych komputerów przy numerycznym modelowaniu złożonych konstrukcji. Otrzymane wartości pozwalają określić współczynnik tłumienia dla różnych wariantów ścian. Znajomość zastępczej wartości przenikalności elektrycznej oraz konduktywności może być przydatna przy stosowaniu innych metod wyznaczania rozkładu pola. W ten sposób możliwe jest względne zwiększenie rozdzielczości siatki i częściowa eliminacja ograniczeń związanych z rozmiarem siatki dyskretyzującej oraz wielkością przetwarzanego numerycznie zagadnienia.

Badania zostały zrealizowane w ramach pracy S/WE/1/13 i finansowane ze środków na naukę MNiSW

## Literatura

- [1] TAFLOVE A., HAGNESS S.C.: *Computational Electrodynamics: The finite – difference time – domain method*. Boston, Artech House, 2005.
- [2] PN-EN 772-16:2001/A1:2005 Metody badań elementów murowych. Część 16: Określenie wymiarów.
- [3] ŻELKOWSKI M.: *Dom bezpieczny i inteligentny. Instalacje inteligentne*. „Budujemy Dom” 3/2008.
- [4] LEBIODA J.: *Inteligentna przyszłość budownictwa*. Forbes, 2015.
- [5] TADEUSIEWICZ R.: *Inteligentny budynek i możliwości jej weryfikacji*. „Napędy i Sterowanie” 12/2014.
- [6] CHOROSZUCHO A., BUTRYŁO B.: *Wpływ struktury cegieł klinkierowych oraz ich konduktywności na wartości pola elektrycznego*. „Napędy i Sterowanie” 6/2014.
- [7] PN-EN 772-3:2000 Metody badań elementów murowych – Określenie objętości netto i udziału procentowego drążów elementów murowych ceramicznych przez ważenie hydrostatyczne.

dr inż. Agnieszka Choroszucho, mgr inż. Adam Steckiewicz  
– Politechnika Białostocka, Wydział Elektryczny, Katedra  
Elektrotechniki Teoretycznej i Metrologii,  
e-mail: a.choroszucho@pb.edu.pl,  
e-mail: a.steckiewicz@doktoranci.pb.edu.pl

artykuł recenzowany