

# Wpływ materiałów budowlanych na rozkład pola elektromagnetycznego wewnątrz pomieszczenia mieszkalnego zaprojektowanego w różnych technologiach budowlanych

Agnieszka Choroszucho, Bogusław Butryło

## Wstęp

Analiza propagacji fal w zakresie wielkich częstotliwości wiąże się z koniecznością badania zjawisk związanych z oddziaływaniem pola elektromagnetycznego i materiałów o różnych właściwościach. Stosowanie nowoczesnych systemów komunikacji bezprzewodowej, wymaga uwzględnienia efektów, które mogą pogarszać zakładaną jakość transmisji danych. Zjawiska takie, jak dyfrakcja czy interferencja są tematem licznych badań mających na celu jak najdokładniejsze określenie rozkładu natężenia pola w rozpatrywanych układach [1–5, 8–11]. Analiza pól występujących w systemach komunikacji bezprzewodowej wymaga również rozpatrzenia efektów związanych z wielokrotnymi odbiciami, ugięciami i tłumieniem fali w obiektach złożonych z różnych materiałów stosowanych w budownictwie. Wówczas należy uwzględnić zjawiska nakładania się fal od sąsiednich stacji bazowych, czasowe zmiany w tłumieniu czy zaniki sygnału. Część czynników ma charakter losowy, związany ze zmianą warunków propagacji fal. Jednak konstrukcja odpornych, pewnych sieci komunikacji bezprzewodowej wymusza, już na etapie projektowania systemu, uwzględnienie znanych czynników wpływających na rozkład pola (m.in. geometria i konstrukcja budynków, złożone struktury materiałowe występujące na drodze między nadajnikiem a stacją bazową). Wskazane problemy są szczególnie widoczne w przypadku telefonii komórkowej czy sieci bezprzewodowych o małym zasięgu WiFi, stosowanych wewnątrz budynków.

Celem badań jest ocena i porównanie rozkładu pola elektromagnetycznego (EM) wewnątrz pomieszczenia przy uwzględnieniu trzech rodzajów konstrukcji budowlanych. Analizowano pełną cegłę [15], żelbet (w technologii OWT-75) [12, 13] oraz gazobeton (budownictwo pasywne) [14]. W pracy przedstawiono wyniki dokładnej analizy wybranych przypadków praktycznych, modelowanych na podstawie projektów technicznych przykładowego pomieszczenia mieszkalnego. Uwzględniono również właściwości materiałowe konstrukcji.

## Opis analizowanego modelu

Obiektem analizy rozkładu pola elektromagnetycznego były trzy warianty pomieszczeń mieszkalnych o takich samych wymiarach  $2,6 \times 3,9 \times 0,405$  m odpowiednio wzdłuż osi  $Ox$ ,  $Oy$ ,  $Oz$  (rys. 1). Cechą różniącą te modele była konstrukcja ściany północnej, uwzględniająca:

- typową pełną cegłę, oznaczona symbolem w1 (rys. 1 a) [15];
- budownictwo pasywne przy zastosowaniu betonu komórkowego i styropianu (polistyren ekspandowany), w2 (rys. 1 b) [14];

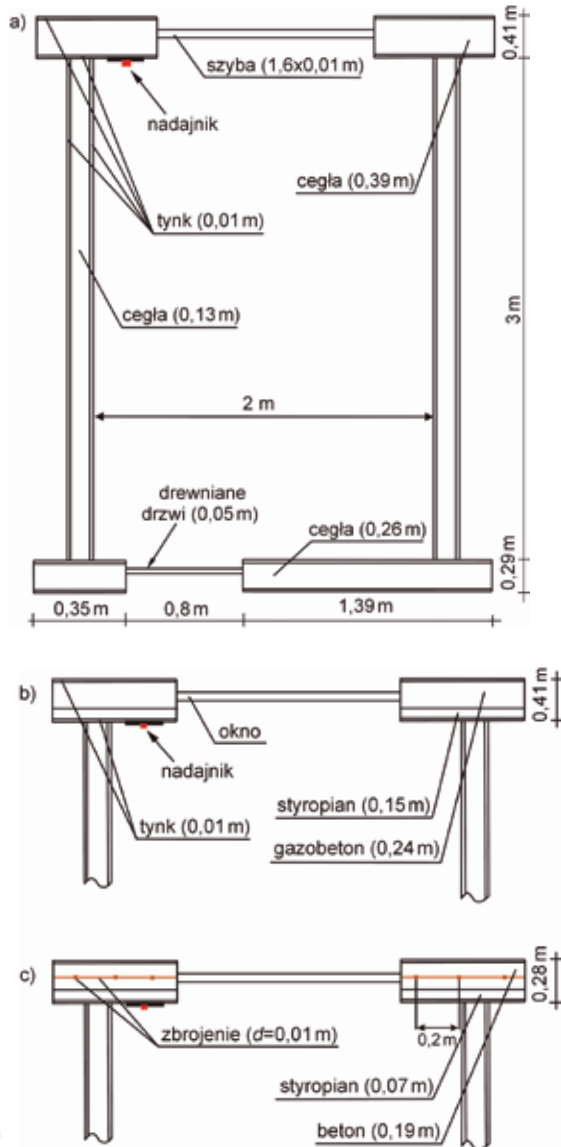
**Streszczenie:** W artykule został przedstawiony wpływ materiałów budowlanych na rozkład pola elektromagnetycznego wewnątrz pomieszczeń, uwzględniając trzy technologie budowlane przy wykorzystaniu cegieł, zbrojonego betonu oraz gazobetonu (budownictwo pasywne). Analiza otrzymanych wyników oraz zachodzących zjawisk umożliwi skuteczniejsze planowanie lokalizacji nadajników sieci bezprzewodowej, stosowanych m.in. w sieciach komórkowych, WiFi, WiMAX. Do analizy zastosowano metodę różnic skończonych z bezpośrednim całkowaniem równań Maxwella w dziedzinie czasu (FDTD). Celem badań jest optymalizacja lokalizacji nadajników, która może stanowić źródło wiedzy przy ocenie problemów związanych z zanikami sygnału.

**Słowa kluczowe:** komunikacja bezprzewodowa, materiały budowlane, propagacja fali elektromagnetycznej, metoda różnic skończonych (FDTD).

**Abstract:** The publication presents the influence of building materials on the distribution of the electromagnetic field inside the rooms made of different building technology. Three types of construction like bricks, passive building and prefabricated units were analyzed. The analysis of both the computational results and the propagation phenomena will make it possible to much better plan the localization of wireless transmitters used among in cellular telephony, WiFi and WiMAX. In this paper was used the finite-difference time-domain method (FDTD). The aim of the research is to optimize the transmitter placement process thus can be source of knowledge during the analysis problems connected with fading.

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

- wielką płytę OWT-75 wykonaną z betonu oraz zbrojenia krzyżowego o siatce  $0,2 \times 0,2$  m i średnicy pręta  $d = 0,01$  m wraz z warstwą styropianu (w3). Ze względu na wysokość analizowanego pomieszczenia zastosowano w każdej ze ścian po trzy pręty pionowe oraz dwa poziome (rys. 1 c) [12, 13]. Właściwości elektryczne zastosowanych materiałów budowlanych uzyskano z [1–5, 8–11]. W związku z celem badań skoncentrowanym na dokładnym odwzorowaniu konstrukcji pomieszczenia, jak i z ograniczeniami mocy obliczeniowej dostępnego komputera, wzdłuż osi  $Oz$  przyjęto wymiar  $0,405$  m.



Rys. 1. Wymiary i geometria pomieszczenia mieszkalnego:  
 a) model z cegły (w1);  
 b) budownictwo pasywne (w2);  
 c) konstrukcja z uwzględnieniem zbrojonego betonu (w3)

Nadajnik (AP) został umieszczony na północnej ścianie wewnątrz pomieszczenia. Wysokość zaczepienia nadajnika wynosiła 0,27 m w analizowanym wycinku pomieszczenia, co umożliwiło analizę propagacji fali na różnych wysokościach. Współrzędne lokalizacji AP wynosiły 0,39 m i 3,26 m, odpowiednio dla osi  $Ox$  i  $Oy$ . W układzie działało punktowe źródło pola elektromagnetycznego o przebiegu harmonicznym  $e(t)=E_0 \cdot \sin(2\pi f t) \cdot 1_z$  o częstotliwości  $f=1,8$  GHz, przy czym  $E_0=1$  V/mm.

czonych w dziedzinie czasu (ang. *Finite Difference Time Domain*) [3, 6, 7]. Umożliwia ona analizę procesów falowych występujących w stanach zarówno ustalonych, jak i nieustalonych przy propagacji fal elektromagnetycznych o złożonych przebiegach. Metoda FDTD oparta jest na równaniach Maxwella w postaci czasowej (1)–(2). Sprzężone równania pola elektromagnetycznego są jednocześnie rozwiązywane w dziedzinie czasu i przestrzeni:

$$\nabla \times \vec{E} = -\mu \frac{\partial \vec{H}}{\partial t} \quad (1)$$

$$\nabla \times \vec{H} = \sigma \vec{E} + \varepsilon \frac{\partial \vec{E}}{\partial t} \quad (2)$$

#### Opis numerycznego modelu

Do wyznaczenia rozkładu pola elektromagnetycznego w analizowanych układach wykorzystano metodę różnic skoń-

Przy zagadnieniach trójwymiarowych, w klasycznym sformułowaniu metody, stosuje się komórkę Yee. Zawiera ona sześć odpowiednio rozmieszczonych składowych wektorów natężenia pola: elektrycznego ( $E_x, E_y, E_z$ ) oraz magnetycznego ( $H_x, H_y, H_z$ ) (rys. 2). Wektory natężenia pola elektrycznego są zaczepione w środkach odpowiednich krawędzi, natomiast wektory natężenia pola magnetycznego – w środkowych punktach ścian bocznych. Każda składowa wektora natężenia pola elektrycznego jest otoczona wirującymi wokół niej odpowiednimi składowymi wektora natężenia pola magnetycznego. W przypadku składowych wektora natężenia pola magnetycznego zapis jest analogiczny.

Zastosowanie metody FDTD polega na podzieleniu całego analizowanego obszaru na odpowiednią liczbę komórek. Z każdą komórką związane są parametry charakteryzujące ośrodek, tj. przenikalność elektryczna ( $\epsilon$ ), przenikalność magnetyczna ( $\mu$ ) oraz przewodność ( $\sigma$ ) [3, 5, 6].

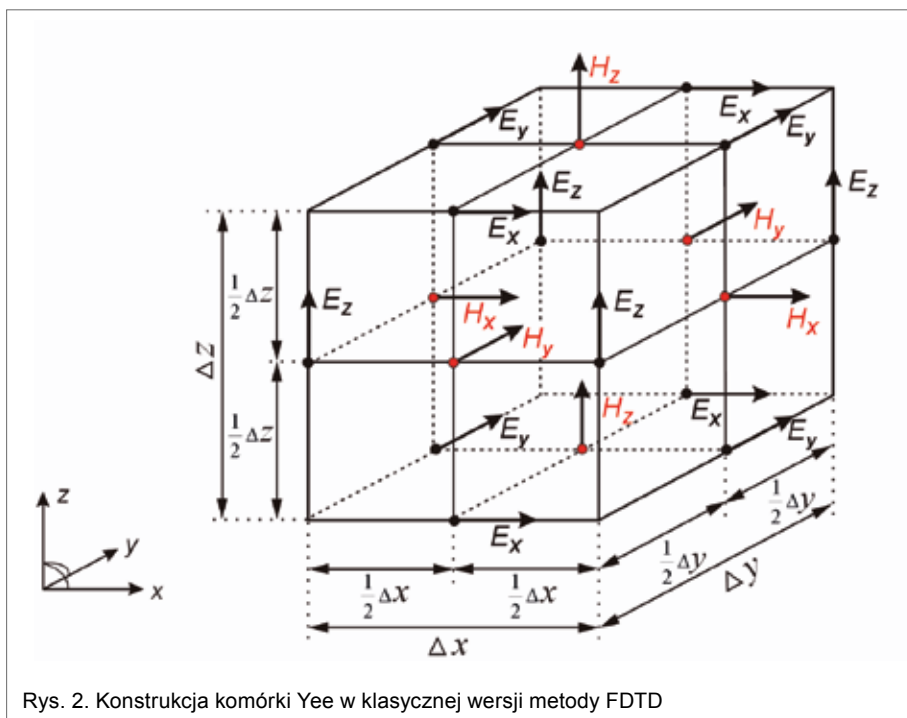
Metoda FDTD opiera się na przekształceniu równań Maxwella do postaci różnicowej. Rozkład pola w analizowanym obszarze jest obliczany przez zastosowanie metod bezpośredniego różniczkowania w czasie i przestrzeni. Stąd np. składową  $E_x$  określa się na podstawie zależności (w układzie współrzędnych prostokątnych):

$$\frac{\partial E_x}{\partial t} = \frac{1}{\epsilon} \left( \frac{\partial H_z}{\partial y} - \frac{\partial H_y}{\partial z} \right) \quad (3)$$

Schemat różnicowy w obszarze jest realizowany przez właściwe rozmieszczenie składowych wektorów natężenia pola elektrycznego  $\mathbf{E}$  oraz magnetycznego  $\mathbf{H}$  w ramach każdej komórki Yee.

W wyniku aproksymacji pochodnych cząstkowych otrzymuje się równania Maxwella w postaci różnicowej. Przykładowo równanie (3) przyjmuje następującą postać:

$$\frac{E_x|_{i,j+1/2,k+1/2}^{n+1/2} - E_x|_{i,j+1/2,k+1/2}^{n-1/2}}{\Delta t} = \frac{1}{\epsilon} \left( \frac{H_z|_{i,j+1,k+1/2}^n - H_z|_{i,j,k+1/2}^n}{\Delta y} - \frac{H_y|_{i,j+1/2,k+1}^n - H_y|_{i,j+1/2,k}^n}{\Delta z} \right) \quad (4)$$



Rys. 2. Konstrukcja komórki Yee w klasycznej wersji metody FDTD

która po przekształceniu pozwala wyznaczyć wartość składowej wzdłuż osi  $Ox$  natężenia pola elektrycznego w punkcie obserwacji ( $i, j+1/2, k+1/2$ ) w czasie ( $n+1/2$ ) na podstawie znajomości składowych pola elektromagnetycznego w poprzedzających chwilach  $t$ , w odpowiednich punktach przestrzeni [6, 7].

Całkowanie równań Maxwella w dziedzinie czasu oparte jest na zastosowaniu schematu dwukrokowego. Wyznaczenie składowych wektorów natężenia pola elektrycznego  $E_x, E_y, E_z$  jest możliwe dzięki wcześniejszemu obliczeniu składowych wektorów natężenia pola magnetycznego  $H_x, H_y, H_z$  w poprzednim kroku czasowym algorytmu. Wykorzystując obliczone już wartości  $H_x, H_y, H_z$ , wyznacza się następane wartości składowych wektorów natężenia pola elektrycznego  $E_x, E_y, E_z$ . Opisany ciąg następujących po sobie kroków został nazwany procesem przeskoku w czasie (ang. *leap-frog*).

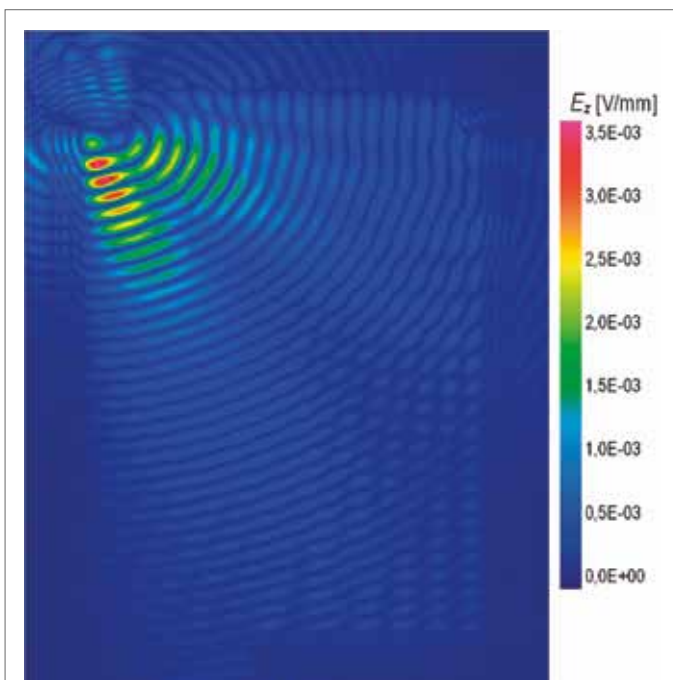
W analizowanych przypadkach długość fali wynosiła  $\lambda = 0,17$  m. Ważnym

elementem wpływającym na wyniki obliczeń jest stabilność numeryczna wykorzystywanej metody. Decydował o tym warunek Courant-Friedrichs-Lewy (CFL), opisujący zależność pomiędzy najmniejszą wartością kroku czasowego  $\Delta t$  a największym rozmiarem komórki Yee [6–7]. W czasie przeprowadzanych obliczeń opisany warunek był spełniony m.in. przez przyjęcie prostopadłościenną komórkę Yee o wymiarach  $\Delta x \times \Delta y \times \Delta z \leq \lambda / 10$  ( $0,01 \times 0,01 \times 0,015$  m). Na granicy obszaru zostały przyjęte warunki absorpcyjne Mura pierwszego rzędu [7]. Wszystkie analizowane modele były złożone z 2 737 800 komórek Yee.

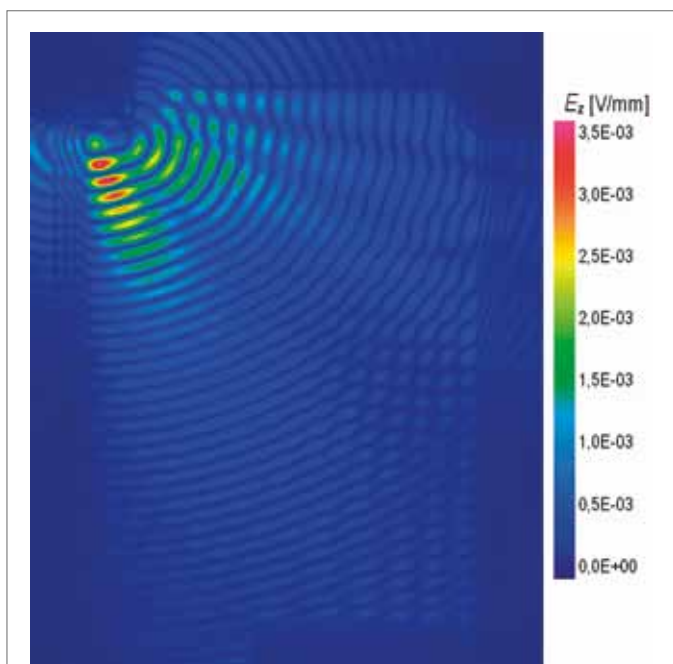
### Analiza i dyskusja wyników

Rozkład pola dla wszystkich rozpatrywanych wariantów konstrukcji wykonano w płaszczyźnie  $XY$ . Zaprezentowane wyniki uzyskano dla stanu ustalonego.

Rysunki 3–5 przedstawiają wartości maksymalne składowej  $E_z$  na wysokości 0,18 m poniżej zaczepienia źródła pola. Widoczne są nieznaczne różnice w wartościach natężenia pola elektrycznego. Najwyższe wartości pola oczywiście są widoczne w okolicy umiejscowienia źródła pola. Najbardziej równomierny rozkład pola, wewnątrz całego pomieszczenia, można zauważyć w modelach ze ścianą północną wykonaną z jednorodnego materiału ( $w_1, w_2$ ). Natomiast w przypadku konstrukcji ze zbrojeniem



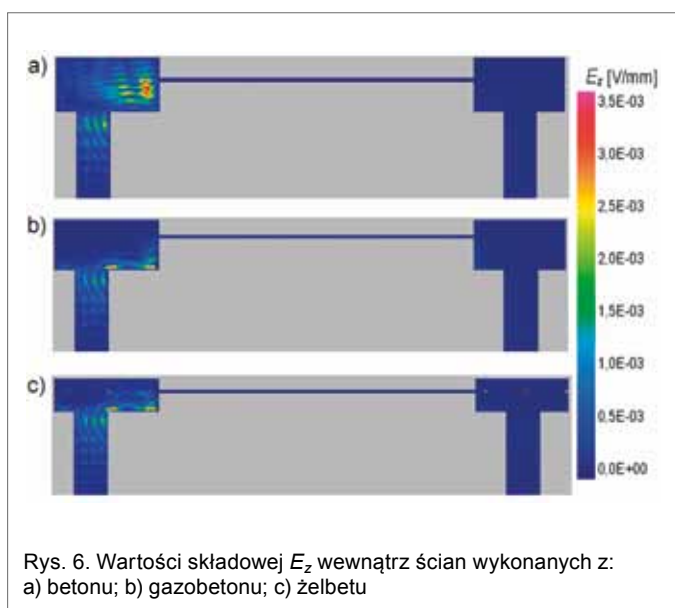
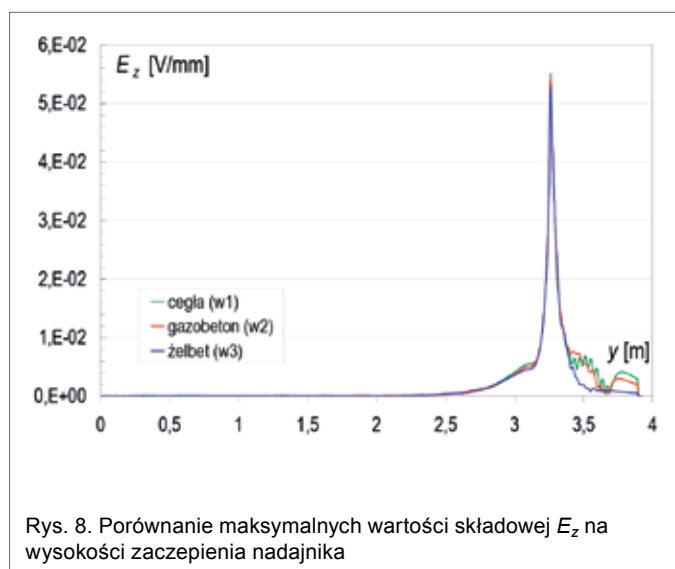
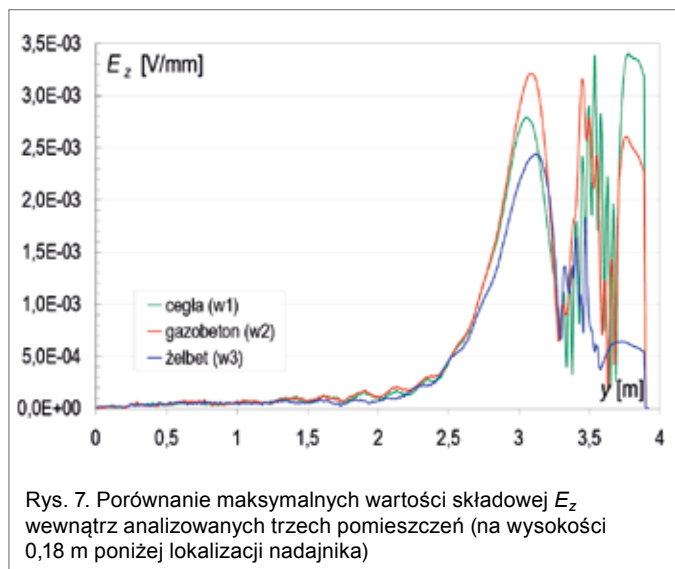
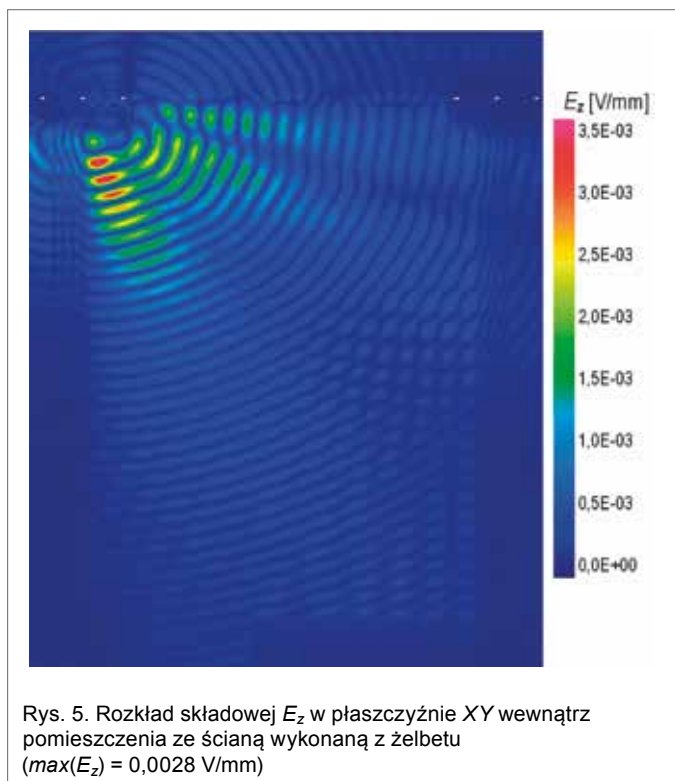
Rys. 3. Dwuwymiarowy rozkład składowej  $E_z$  wewnątrz modelu wykonanego tylko z cegły ( $\max(E_z) = 0,003 \text{ V/mm}$ )



Rys. 4. Rozkład składowej  $E_z$  wewnątrz pomieszczenia z wykorzystaniem technologii budownictwa pasywnego ( $\max(E_z) = 0,0032 \text{ V/mm}$ )

widoczne są liczne minima i maksima oraz załamania fali w bliskiej strefie żelbetu, zwłaszcza w pobliżu źródła pola (rys. 5). Dodatkowo zbrojenie w konstrukcji ścian wpływa na selektywny wzrost wartości pola w wybranych obszarach, głównie przy oknie. W tej części obszaru analizy, w modelu ze zbrojeniem (w3) maksymalne wartości natężenia pola elektrycznego miejscami są nawet o 20% wyższe niż w modelu w1. Natomiast konstrukcja ściany wykonana w technologii budownictwa pasyw-





nego lokalnie wpływa na obniżenie wartości pola (przy oknie) o ok. 7% względem modelu w3. Powodem lokalnego wzrostu wartości natężenia pola elektrycznego w modelu zawierającym żelbetową ścianę są zjawiska falowe na granicy ośrodków oraz interferencje powstałych fal.

Analiza wykazała, że zmiana konstrukcji północnych ścian, umiejscowionych przy oknie, praktycznie nie wpływa na wartości pola wewnątrz analizowanego pomieszczenia (rys. 3–5). Już w odległości 2 m od źródła pola maksymalne wartości natężenia pola elektrycznego są zbliżone we wszystkich modelach ( $\max(E_z) = 0,00012 \text{ V/mm}$ ) (rys. 7). Właściwości elektryczne materiałów, jak i konstrukcja analizowanej ściany skutkują zmiennym rozkładem pola jedynie w obszarze przy nadajniku,

a zwłaszcza przy oknie (lokalna różnica pola wynosi ok. 20%). Powodem tego typu zjawisk są wielokrotne odbicia zarówno od prętów zbrojenia, jak i wewnątrz struktury betonu o dziesięciokrotnie wyższej przewodności w porównaniu do cegły ( $\sigma = 0,01 \text{ S/m}$ ).

Maksymalny rozkład natężenia pola elektrycznego wewnątrz konstrukcji analizowanej ściany na wysokości 0,18 m poniżej zaczepienia źródła pola został przedstawiony na rys. 6. W przypadku ściany zawierającej zamontowany nadajnik i wykonanej z jednego materiału (cegła) zaobserwowano wyższe wartości pola wnikającego w strukturę dielektryka ( $\max(E_z) = 0,003 \text{ V/mm}$ ). Natomiast modele ze ścianami modelowanymi z dwóch materiałów budowlanych (w2 – gazobe-

ton i styropian oraz w3 – żelbet i styropian) charakteryzują się niższymi wartościami składowej  $E_z$  o ok. 30% względem konstrukcji w1. Spowodowane jest to zachodzącymi zjawiskami falowymi powstałymi na granicy tych dwóch ośrodków różniących się zarówno przenikalnością elektryczną, jak i przewodnością [1–5, 8–11]. Różnice wynikają z wystąpienia wielokrotnych odbić, ale przede wszystkim tłumienie obu materiałów i droga, jaką pokonuje fala EM, wpływają na tak znaczące obniżenie wartości pola wewnątrz dwuwarstwowych ścian.

Na rys. 7 przedstawiono porównanie maksymalnych wartości składowej  $E_z$  względem odległości wzdłuż osi  $Oy$  dla prostej  $x = 0,37$  m (położenie nadajnika) na wysokości 0,18 m poniżej lokalizacji źródła pola. Największe zmiany zachodzą wewnątrz analizowanej ściany (zmiana długości fali) oraz w bliskiej strefie tej ściany – rozkład natężenia pola elektrycznego w tych częściach obszaru analizy nie jest równomierny, co zostało już wcześniej wyjaśnione.

Przy źródle pola EM model ze ścianą wykonaną z gazobetonu osiąga najwyższą wartość  $\max(E_z) = 0,0033$  V/mm. Ale już od odległości 0,3 m do 0,5 m od nadajnika charakterystyki dla modeli w1 i w2 są zbieżne. Natomiast analiza wykazała, że dla obszaru  $y \in \langle 1,7; 2,4 \rangle$  m najwyższe wartości zanotowano wewnątrz pomieszczenia wykonanego z cegieł ( $\max(E_z) = 0,0003$  V/mm). Jednorodność zastosowanego materiału, jak i liczne zjawiska falowe powodują zwiększenie wartości pola po przejściu przez ścianę, gdzie w modelu w1  $\max(E_z) = 0,0034$  V/mm, a tylko  $\max(E_z) = 0,00065$  V/mm dla konstrukcji wykonanej z żelbetu (w3). W przypadku modelu uwzględniającego budownictwo wielkopłytowe właściwości elektryczne materiału, a zwłaszcza zbrojenie znacznie zniekształcają i zmniejszają długość fali, powodując tłumienie sygnału i powstawanie licznych minimów i maksimów.

Na rys. 8 zostało przedstawione porównanie maksymalnych wartości natężenia pola elektrycznego wzdłuż osi  $Oy$  (dla prostej  $x = 0,37$  m oraz na wysokości zaczepienia nadajnika). Źródło pola znajdowało się w punkcie (0,39 m, 3,26 m). W przypadku modelu wykonanego z cegły (w1) oraz gazobetonu (w2) zauważalne jest zmniejszenie długości fali wewnątrz ściany z umiejscowionym nadajnikiem. Charaktery-

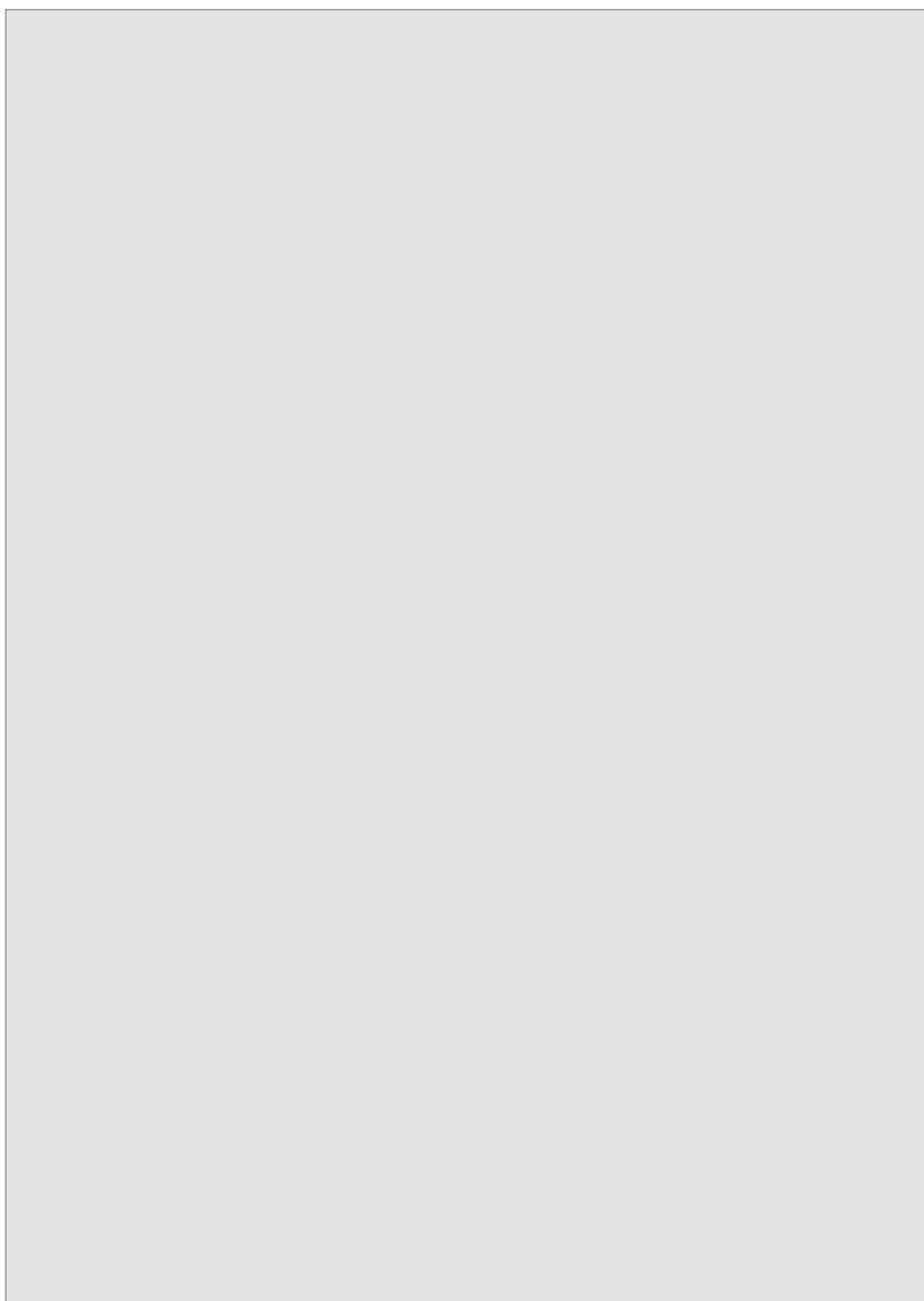
styki przedstawione na rys. 8 mają analogiczną tendencję, jak te zaprezentowane na rys. 7. Dla obszaru  $y \in \langle 2,7; 3,2 \rangle$  m podobnie najwyższe wartości zaobserwowano dla pomieszczenia wykonanego z cegieł ( $\max(E_z) = 0,005$  V/mm).

Najmniej pożądane wartości natężenia pola elektrycznego są widoczne po przejściu fali przez ścianę wykonaną z żelbetu ( $\max(E_z) = 0,0007$  V/mm). Tak gwałtowne zanikanie sygnału spowodowane jest niejednorodnością ośrodka złożonego dodatkowo z metalowych prętów wpływających na powstawanie licznych odbić wewnątrz konstrukcji ściany.

### Wnioski końcowe

Zastosowanie metody FDTD pozwala na szczegółową analizę procesów falowych występujących w stanach zarówno ustalonych, jak i nieustalonych przy propagacji fal elektromagnetycz-

reklama



nych o złożonych przebiegach. Przy wykorzystaniu tej metody większość publikacji dotyczy analizy tylko samych ścian wykonanych z różnych materiałów budowlanych, z uwzględnieniem zmienności częstotliwości i parametrów elektrycznych opisujących ośrodki. Jednak należy zwrócić szczególną uwagę na zachodzące zjawiska falowe wewnątrz pomieszczeń, gdzie wykorzystywane są sieci bezprzewodowe. Analiza tego typu zagadnień wykonywana jest przy użyciu metody *ray-tracing* (RT), ale dotyczy rozległych obszarów i najczęściej przy założeniu stałych parametrów elektrycznych materiałów budowlanych, niezależnie od konstrukcji budynków.

Prezentowane w tym artykule zagadnienia dotyczą analizy pojedynczego pomieszczenia i obrazowo odzwierciedlają zachodzące zjawiska falowe. Otrzymane wyniki dowodzą, że różna konstrukcja ściany północnej zawierającej okno (wykonana zarówno z cegły czy betonu, jak i żelbetu) ma niewielki wpływ na rozkład pola wewnątrz całego analizowanego pomieszczenia. Zmiany w wartościach natężenia pola elektrycznego, wynikające z odmiennej struktury ściany, widoczne są jedynie w odległości do 1,7 m od źródła pola. Wówczas wartości pola dla modeli bez zbrojenia (z cegły czy gazobetonu) są miejscami dwukrotnie wyższe niż w przypadku konstrukcji wykonanej z żelbetu.

W bliskiej strefie ściany (do 0,4 m), na wysokości 0,18 m poniżej lokalizacji nadajnika, analiza wykazała, że pomieszczenie zaprojektowane wg budownictwa pasywnego charakteryzuje się najwyższymi wartościami natężenia pola elektrycznego ( $\max(E_z) = 0,0033$  V/mm). Jest to wartość o ok. 30% wyższa niż w modelu zawierającym żelbetową ścianę. Powodem wystąpienia takiej różnicy są liczne odbicia wewnątrz ściany, ale przede wszystkim tłumienie materiału, które w porównaniu do modelu z cegły skutkuje aż 80% obniżeniem wartości pola dla konstrukcji żelbetowej.

Analiza również wykazała, że propagująca przez ścianę dwuwarstwową (tj. gazobeton i styropian oraz żelbet i styropian) fala EM powoduje wewnątrz niej niższe wartości pola o ok. 30% niż w przypadku ściany jednowarstwowej wykonanej z cegły. Natomiast po przejściu fali przez ścianę wykonaną z żelbetu zaobserwowano gwałtowne zmniejszenie wartości pola o ok. 80% względem modelu zawierającego ścianę z cegły.

Dalsze badania będą dotyczyć analizy rozkładu pola wewnątrz pomieszczeń różniących się konstrukcją nie tylko jednej ściany oraz przy uwzględnieniu zmienności przewodności materiałów budowlanych. Analizie zostanie poddany również wpływ konstrukcji pomieszczenia na rozkład pola elektromagnetycznego, ale przy jednoczesnym uwzględnieniu stropów i ich wpływu na zachodzące zjawiska falowe. Analiza propagacji fal EM w tego typu pomieszczeniach pozwoli na lepsze planowanie rozmieszczenia sieci bezprzewodowych w celu uniknięcia chwilowych zaników sygnału.

## Literatura

- [1] CUINAS I., SANCHEZ M.G.: *Permittivity and Conductivity Measurements of Building Materials at 5,8 GHz and 41,5 GHz*. Wireless Personal Communications, 20/2002, p. 93–100.
- [2] STAVROU S., SAUNDERS S.R.: *Review of constitutive parameters of building material*. The Institute of Electrical Engineers, Printed and Published by The IEEE, 2002, p. 211–215.
- [3] CHOROSZUCHO A., BUTRYŁO B.: *Local attenuation of electromagnetic field generated by wireless communication system inside the building*. Przegląd Elektrotechniczny, 87(7)/2011, p. 123–126.
- [4] WEIPING Q., SHENGGAO D., YERONG Z.: *FDTD Calculation of the Effects of Reinforced Concrete Wall on Short Path Propagation of UWB Pulse*. IEEE Microwave Conference Proceedings, 2005. APMC 2005. Asia-Pacific Conference Proceedings, 2005.
- [5] ANTONINI G., ORLANDI A., D'ELIA S.: *Shielding Effects of Reinforced Concrete Structures to Electromagnetic Fields due to GSM and UMTS Systems*. IEEE Transactions on Magnetic, 39(3)/2003, p. 1582–1585.
- [6] TAFLOVE A., HAGNESS S.C.: *Computational electrodynamics: the finite-difference time-domain method*. Boston, Artech House, 2005.
- [7] YEE K.S.: *Numerical solution of initial boundary value problems Maxwell's equations in isotropic media*. IEEE Transactions on Antennas and Propagation, 14/1966, p. 302–307.
- [8] LANDRON O., FEUERSTEIN M.J., RAPPAPORT S.: *A Comparison of Theoretical and Empirical Reflection Coefficients for Typical Exterior Wall Surfaces in a Mobile Radio Environment*. IEEE Transactions on Antennas and Propagation, 44(3)/1996, p. 341–351.
- [9] LOVELL M.C., AVERY A.J., VERNON M.E.: *Physical properties of materials*. Van Nostrand Reinhold, New York, 1976, p. 153–185.
- [10] TAN S.Y., TAN Y., TAN H.S.: *Multipath delay measurements and modeling for interfloor wireless communications*. IEEE Transactions on Vehicular Technology, 49(4)/2000, p. 1334–1341.
- [11] DALKE R.A., HOLLOWAY CH.L., MCKENNA P., JOHANSSON M., ALI A.S.: *Effects of reinforced concrete structures on RF communications*. IEEE Trans. Electromagnetic Compatibility, 42(4)/2000, 486–496.
- [12] DREWNOWSKI S.: *Rozumieć konstrukcje. Zasady zbrojenia betonu*. Wydawnictwo Politechniki Częstochowskiej, Częstochowa, 2002.
- [13] PN-EN 206-1:2003 Beton – Część 1. Wymagania, właściwości, produkcja i zgodność.
- [14] PN-EN 771-4:2004 Wymagania dotyczące elementów murowych. Część 4: Elementy murowe z autoklawizowanego betonu komórkowego.
- [15] PN-EN 771-1:2006 Wymagania dotyczące elementów murowych. Część 1: Elementy murowe ceramiczne.

Agnieszka Choroszucho, Bogusław Butryło –  
Politechnika Białostocka, Wydział Elektryczny,  
Katedra Elektrotechniki Teoretycznej i Metrologii,  
e-mail: a.choroszucho@pb.edu.pl, b.butrylo@pb.edu.pl

artykuł recenzowany