Wpływ materiałów budowlanych oraz ich konduktywności na wartości natężenia pola elektrycznego

Agnieszka Choroszucho, Gabriela Druć, Damian Orzechowski

Wprowadzenie

Zastosowanie fal elektromagnetycznych m.in. w radiolokacji, radiokomunikacji oraz łączności satelitarnej powoduje, iż liczba nadajników wzrasta wykładniczo. Przy wyższych częstotliwościach rozwój jest bardziej dynamiczny w związku z wprowadzeniem łączności bezprzewodowej. 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. Analiza pól występujących w systemach komunikacji bezprzewodowej wymaga również rozpatrzenia efektów związanych z wielokrotnymi odbiciami, ugięciami i tłumieniem fali na obszarach o zróżnicowanej zabudowie. W budownictwie występują złożone układy, zawierające struktury periodyczne oraz elementy nietypowe, o szczególnych właściwościach materiałowych i nietypowej geometrii. Wówczas należy uwzględnić odporność bezprzewodowego kanału transmisyjnego na zakłócenia, zjawiska nakładania się fal od sąsiednich stacji bazowych, opóźnienia sygnałów, czasowe zmiany w tłumieniu i zaniki sygnału [2, 7]. 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 sieci bezprzewodowych o małym zasięgu (Wi-Fi), stosowanych w budynkach. Uwzględnienie konstrukcji nowych, jak też już istniejących budynków ma znaczenie przy projektowaniu rozmieszczenia stacji.

Celem badań jest ocena rozkładu natężenia pola elektrycznego po przejściu płaskiej fali elektromagnetycznej przez ścianę wykonaną z różnych materiałów (trzy rodzaje cegieł, beton i beton komórkowy). Otrzymane wnioski w przyszłości pozwolą rozwiązywać problemy związane z zanikami sygnału oraz dokonywać optymalnego projektowania lokalizacji źródeł pola w złożonych konstrukcjach zawierających zbrojenie. W pracy przedstawiono analizę właściwości materiałowych stosowanych w konstrukcjach budowlanych pomieszczeń mieszkalnych.

Streszczenie: W artykule przedstawiono wpływ powszechnie stosowanych materiałów budowlanych na wartości natężenia pola. Analiza dotyczyła obszaru zawierającego ścianę jedno- lub dwuwarstwową wykonaną z: pełnej cegły, betonu, gazobetonu oraz dwóch rodzajów cegieł klinkierowych (z drążeniami). W badaniach uwzględniono grubość ściany, konduktywność materiałów oraz złożoność cegieł klinkierowych. Głównie analizowano wpływ zmiany parametru elektrycznego materiału ceramicznego, tj. konduktywności, na wartości pola elektrycznego. Do analizy zastosowano metodę różnic skończonych z bezpośrednim całkowaniem równań Maxwella w dziedzinie czasu (FDTD). Celem badań było lepsze zrozumienie zachodzących zjawisk polowych wewnątrz jednorodnych i złożonych materiałów budowlanych. Wyniki analizy mogą stanowić źródło wiedzy przy ocenie problemów związanych z zanikami sygnału i pozwolą na lepsze planowanie lokalizacji nadajników sieci bezprzewodowych stosowanych m.in. w sieciach komórkowych, Wi-Fi, WiMAX.

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

THE INFLUENCE OF THE BUILDING MATERIALS AND THEIR CONDUCTIVITY ON THE VALUES OF ELECTRIC FIELD STRENGHT

Abstract: *The article presents the influence of commonly used building materials on field intensity values. The analysis concerned an area containing a single or double-layer wall made of: full brick, concrete, aerated concrete and two types of clinker bricks (with hollows). The research included wall thickness, material conductivity and complexity of clinker bricks. The impact of changing the electrical parameter of the ceramic material, i.e. conductivity, on the electric field values was mainly analysed. The Finite Difference Time Domain Method with direct integration of Maxwell's equations in time domain (FDTD) was used for the analysis. The aim of the research was to better understand the occurring field phenomena inside homogeneous and complex building materials. The results of the analysis can be a source of knowledge when assessing problems related to signal loss and allow for better planning of the location of wireless network transmitters used, among others in cellular networks, Wi-Fi, WiMAX.*

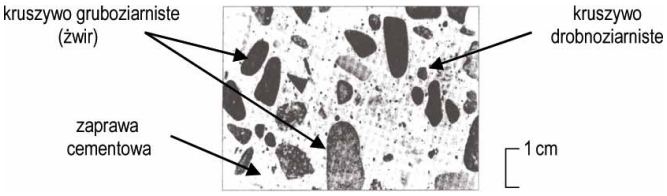
Keywords: wireless communications, building materials, electromagnetic wave propagation, finite difference time domain method

Opis analizowanych materiałów budowlanych

Beton jest głównym materiałem budowlanym. Powstaje w wyniku wiązania i stwardnienia mieszanki złożonej ze spoiwa (cementu), wypełniacza (kruszywo) i wody oraz nadających pożądane cechy, ewentualnych dodatków (do 20% w stosunku do masy spoiwa) i domieszek (do 5% w stosunku do masy spoiwa) [7]. Kruszywa mogą być naturalne (np. piasek, żwir, granit) lub sztuczne (np. keramzyt). Ze względu na rozmiar ziaren rozróżnia się: kruszywa drobne o frakcjach do 4 mm, grube ⟨4, 36⟩ mm oraz bardzo grube ⟨63, 250⟩ mm. W betonie każde ziarno kruszywa powinno być ściśle otoczone zaprawą cementową wypełniającą wolne przestrzenie pomiędzy ziarnami (rys. 1).

Skład mieszanki dobierany jest w taki sposób, aby otrzymać beton o oczekiwanej wytrzymałości mechanicznej oraz odporności na działanie czynników zewnętrznych. Dodatki i domieszki poprawiają właściwości zarówno mieszanek betonowych, jak i betonów, np. zwiększają urabialność, mrozoodporność, wodoszczelność, ale jednocześnie wpływają na zróżnicowanie ich właściwości elektrycznych [7]. Klasyfikacja betonów ze względu na ciężar objętościowy w stanie suchym obejmuje:

1. beton ciężki – powyżej 2600 kg/m^3, jest wykonywany z kruszyw pochodzących z ciężkich minerałów lub rud żelaza, stosowany do budowy osłon przed promieniowaniem w komorach rentgenowskich lub reaktorach atomowych;



Rys. 1. Przykładowa wyszlifowana powierzchnia betonu

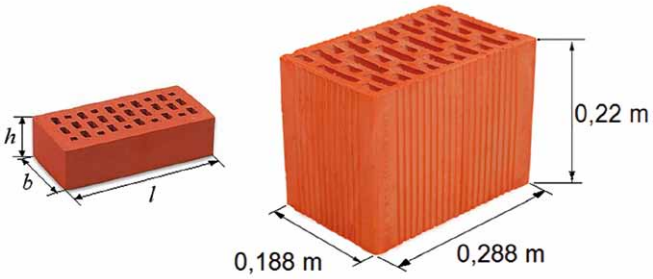
2. beton zwykły:
   - ⟨2200, 2600⟩ kg/m^3, stosowane naturalne i łamane kruszywa (żwir, piasek, grys), stosowany do wykonywania elementów konstrukcyjnych betonowych i żelbetowych;
   - ⟨2000, 2200⟩ kg/m^3, kruszywa porowate (np. keramzyt), służy do wykonywania elementów o podwyższonej izolacyjności cieplnej, np. ścian osłonowych, pustaków ściennych i stropowych;
3. beton lekki (beton komórkowy, gazobeton) – ⟨800, 2000⟩ kg/m^3; wykonywany z kruszyw lekkich lub przez nadanie betonowi porowatej struktury np. przez napowietrzenie lub spienienie.

Wyroby wapienno-piaskowe (silikatowe), jak i **beton komórkowy** produkowane są z niemal identycznych surowców, jednak odmienne technologie wytwarzania sprawiają, że

reklama

reklama

otrzymane materiały posiadają inne właściwości. W obu przypadkach podstawowe składniki to wapno, piasek i woda. Materiały silikatowe, podobnie jak ceramikę budowlaną, cechuje wysoka gęstość objętościowa wynikająca z małej ilości wolnych przestrzeni w materiale. Cegły wykonane są z gliny lub innych surowców ilastych z dodatkiem piasku, a następnie suszone i wypalane w wysokiej temperaturze. Podział gotowych wyrobów dotyczy cech geometrycznych, wytrzymałości na ściskanie, stopnia wypalenia oraz zastosowanych surowców. Wymiary cegieł są bardzo zróżnicowane, ale oparte na stosunku wysokości (h) do szerokości (b) oraz długości (l) wynoszącym 1:2:4. Wyroby silikatowe oraz z ceramiki budowlanej oferowane są w formie m.in. bloczków pełnych i drążonych, cegieł zwykłych i elewacyjnych oraz pustaków (rys. 2).



Rys. 2. Elementy murowane z drążeniami pionowymi (cegła klinkierowa i pustak)

Opis analizowanych modeli ścian

Przedmiotem analizy był model zawierający ścianę o grubości 0,12 m (model 1w) oraz 0,24 m (model 2w) wykonaną z różnych materiałów budowlanych:

- pełna cegła (przenikalność elektryczna względna – $\varepsilon_r' = 4{,}44$);
- cegła klinkierowa z 18 drążeniami prostopadłymi do powierzchni kładzenia (wspornej) – model C18;
- cegła klinkierowa z 30 drążeniami – model C30;
- beton ($\varepsilon_r' = 5$);
- gazobeton/beton komórkowy ($\varepsilon_r' = 2{,}25$).

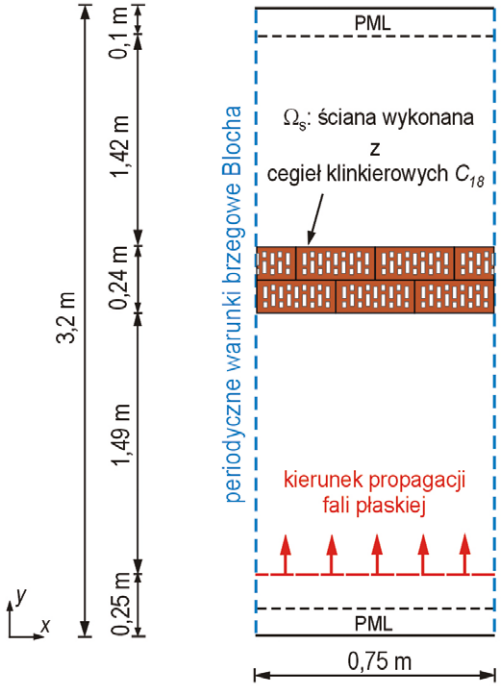
W analizie przyjęto, że z obu stron ściany znajduje się otwarta przestrzeń o właściwościach powietrza, pozbawiona innych elementów, które mogą zaburzać propagującą falę elektromagnetyczną i wpływać na rozkład pola w rozpatrywanym układzie. Założono, że wymiary ściany w kierunku prostopadłym do kierunku propagacji fali (szerokość ściany oraz jej wysokość), są znacznie większe od długości fali, która miała częstotliwość $f = 5$ GHz. Z tego względu, pomijając zjawiska zachodzące na krańcach ściany, w pobliżu jej krawędzi lub na styku z inną ścianą, możliwe było:

- zastosowanie modelu 2D;
- zmniejszenie wielkości modelu przez zastosowanie właściwych warunków brzegowych: periodycznych Blocha oraz PML [5].

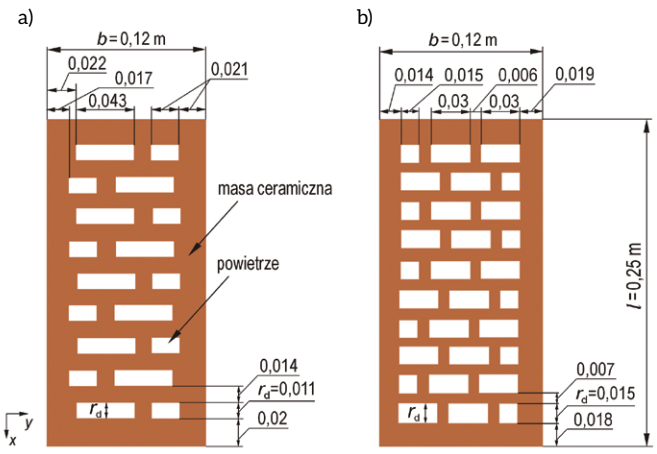
Przyjęte założenia pozwalają na określenie wpływu materiału budowlanego na wartości natężenia pola, z pominięciem innych czynników. Wymiary i ogólną konstrukcję przyjętego modelu przedstawiono na rys. 3, gdzie zaprezentowano najbardziej złożony wariant ściany – dwuwymiarowa, wykonana z cegieł klinkierowych C18.

Wymiary zewnętrzne materiałów niejednorodnych (cegieł klinkierowych) oraz cegły pełnej wynoszą: $h = 0{,}06$ m (wysokość), $b = 0{,}12$ m (szerokość), $l = 0{,}25$ m (długość) (rys. 4).

Przyjęta w obliczeniach długość modelu zapewniała obserwację rozkładu natężenia pola przed ścianą i za ścianą w obszarze o wymiarze podłużnym zgodnym z wektorem propagacji fali płaskiej. Analizę rozkładów pola elektrycznego oraz ilościową ocenę tłumienia fal w poszczególnych wariantach prowadzono na podstawie obserwacji maksymalnej wartości składowej pola elektrycznego w obszarze za ścianą – $\max(E_z)$. Przyjęty obszar analizy pozwalał na uwzględnienie ewentualnych deformacji w rozkładzie pola, związanych z niejednorodną strukturą



Rys. 3. Geometria modelu przy analizie układów z materiałem jednorodnym (pełna cegła, beton, gazobeton) i niejednorodnym (cegły klinkierowe), na rysunku ukazana jest tylko cegła klinkierowa



Rys. 4. Wymiary geometryczne analizowanych cegieł klinkierowych (widok 2D w płaszczyźnie XY):
a) z 18 drążeniami (C18); b) z 30 otworami (C30)

rozpatrywanych materiałów oraz zmian pola w pewnej odległości od ściany.

Wymuszenie pola w układzie stanowiła harmoniczna fala płaska spolaryzowana liniowo, propagująca w kierunku zgodnym z osią O_y ($k = 1_y$)

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

Zjawiska propagacji fal w otwartej przestrzeni zostały odwzorowane przez przyjęcie warunków absorpcyjnych PML na krawędziach prostopadłych do kierunku propagacji fali płaskiej [3]. Na powierzchniach modelu równoległych do kierunku propagacji fali przyjęte zostały warunki periodyczne gwarantujące okresowość rozkładu pola. Szerokość obszaru ściany Ω_S oraz całego modelu podlega jednak ścisłym ograniczeniom. W celu zachowania warunku periodyczności struktury materiałowej wymiar poprzeczny modelu musi być wielokrotnością szerokości cegły. W prowadzonych obliczeniach rozpatrywano układ o szerokości trzech cegieł, stąd szerokość całego modelu wynosi 0,75 m.

Model numeryczny i *Finite Difference Time Domain Method*

W celu wyznaczenia wartości natężenia pola w analizowanych układach wykorzystano metodę różnic skończonych w dziedzinie czasu FDTD (ang. *Finite Difference Time Domain*) [1, 2]. Metoda FDTD pozwala na analizę złożonych struktur, w których każdemu materiałowi przypisane są właściwości materiałowe, co bezpośrednio wpływa na poprawność wyników. Metoda jest oparta na równaniach Maxwella w postaci czasowej:

$$\nabla \times \vec{E} = -\mu \frac{\partial \vec{H}}{\partial t} \tag{2}$$

$$\nabla \times \vec{H} = \sigma \vec{E} + \varepsilon \frac{\partial \vec{E}}{\partial t} \tag{3}$$

Równania (2–3) są następnie przekształcane do postaci różnicowej. Sprzężone równania pola elektromagnetycznego są jednocześnie rozwiązywane w dziedzinie czasu i przestrzeni. W celu otrzymania układu równań skalarnych opisującego poszczególne składowe wielkości pola równania (2–3) podlegają dekompozycji w układzie współrzędnych kartezjańskich. Przykładowo równanie w postaci skalarnej dla składowej natężenia pola elektrycznego (E_z) ma postać:

$$\frac{\partial E_z}{\partial t} = \frac{1}{\varepsilon}\left(\frac{\partial H_y}{\partial x} - \frac{\partial H_x}{\partial y} - \sigma E_z\right) \tag{4}$$

reklama

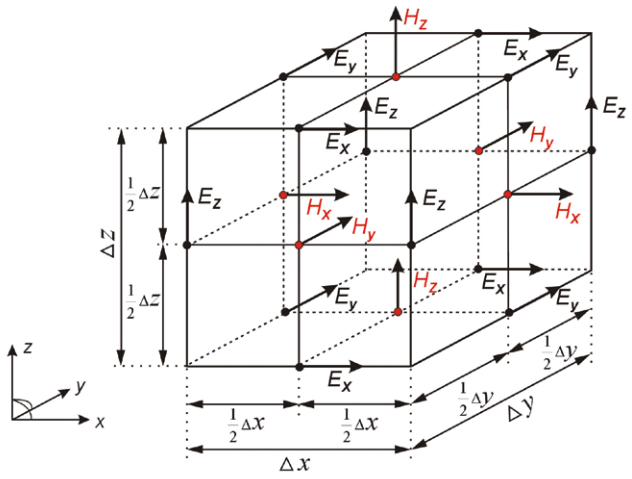
reklama

Przy zagadnieniach trójwymiarowych, w klasycznym sformułowaniu metody, wykorzystuje się komórkę Yee (rys. 5) [1, 7]. Zawiera ona sześć odpowiednio rozmieszczonych składowych wektorów natężenia pola: elektrycznego (E_x, E_y, E_z) oraz magnetycznego (H_x, H_y, H_z). Zastosowanie metody FDTD polega na podzieleniu całego analizowanego obszaru na odpowiednią liczbę komórek.

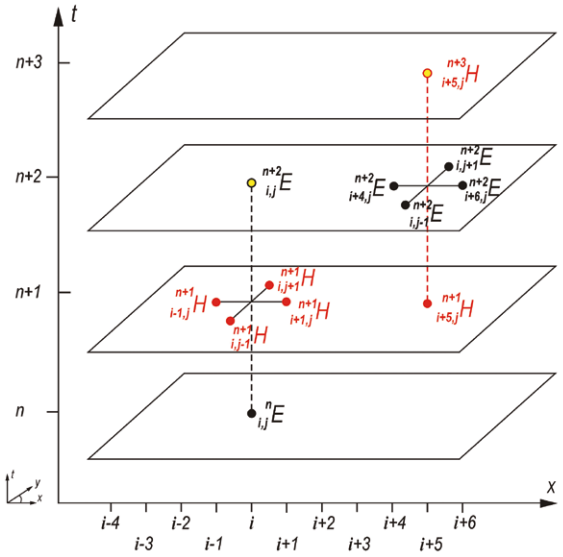
Schemat różnicowy w przestrzeni jest wykonywany przez właściwe rozmieszczenie wektorów natężenia pola elektrycznego E i magnetycznego H w ramach każdej komórki, z którą związane są parametry materiałowe, tj. przenikalność elektryczna (ε), przenikalność magnetyczna (μ) oraz przewodność (σ). Składowe pola elektromagnetycznego są obliczane w innym punkcie przestrzeni. Wektory E_x, E_y, E_z, skojarzone z komórką Yee, zaczepione są w środkach odpowiednich krawędzi, natomiast wektory H_x, H_y, H_z – w środkach płaszczyzn tworzących jej boki. 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.

Całkowanie równań Maxwella w dziedzinie czasu oparte jest na zastosowaniu schematu dwukrokowego. W wybranych chwilach czasu, w których wyznacza się rozkład pola elektrycznego, wartości składowych wektora natężenia pola magnetycznego są przesunięte o czas $\Delta_t/2$ względem nich. 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 następne wartości składowych wektorów natężenia pola elektrycznego E_x, E_y, E_z. Na rysunku 6 przedstawiono schemat wyznaczania poszczególnych wektorów E i H przy uwzględnieniu kroku w dziedzinie czasu oraz założeń dla modelu dwuwymiarowego.

W wyniku aproksymacji pochodnych cząstkowych otrzymuje się równania Maxwella w postaci różnicowej. Poniżej przedstawiono dwa równania z sześciu.



Rys. 5. Schemat 3D pojedynczej komórki Yee



Rys. 6. Wyznaczanie wartości wektorów natężenia pola elektrycznego i magnetycznego w algorytmie FDTD (2D)

$$\frac{{}^{n+1}_{i,j,k}E_z - {}^{n}_{i,j,k}E_z}{\Delta_t} = \frac{1}{\varepsilon_{i,j,k}}\left(\frac{{}^{n+\frac{1}{2}}_{i+\frac{1}{2},j,k}H_y - {}^{n+\frac{1}{2}}_{i-\frac{1}{2},j,k}H_y}{\Delta_x} - \frac{{}^{n+\frac{1}{2}}_{i,j+\frac{1}{2},k}H_x - {}^{n+\frac{1}{2}}_{i,j-\frac{1}{2},k}H_x}{\Delta_y} - \sigma_{i,j,k}\,{}^{n+\frac{1}{2}}_{i,j,k}E_z\right) \quad (5)$$

$$\frac{{}^{n+\frac{1}{2}}_{i,j,k}H_x - {}^{n-\frac{1}{2}}_{i,j,k}H_x}{\Delta_t} = \frac{1}{\mu_{i,j,k}}\left(\frac{{}^{n}_{i,j,k+\frac{1}{2}}E_y - {}^{n}_{i,j,k-\frac{1}{2}}E_y}{\Delta_z} - \frac{{}^{n}_{i,j+\frac{1}{2},k}E_z - {}^{n}_{i,j-\frac{1}{2},k}E_z}{\Delta_y}\right) \quad (6)$$

$$\frac{{}^{n+\frac{1}{2}}_{i,j,k}H_y - {}^{n-\frac{1}{2}}_{i,j,k}H_y}{\Delta_t} = \frac{1}{\mu_{i,j,k}}\left(\frac{{}^{n}_{i+\frac{1}{2},j,k}E_z - {}^{n}_{i-\frac{1}{2},j,k}E_z}{\Delta_x} - \frac{{}^{n}_{i,j,k+\frac{1}{2}}E_x - {}^{n}_{i,j,k-\frac{1}{2}}E_x}{\Delta_z}\right) \quad (7)$$

Wyniki analizy

Na rysunkach 7 i 8 przedstawiono chwilowy rozkład składowej E_z dla tej samej chwili po osiągnięciu stanu ustalonego zarówno dla materiału jednorodnego (gazobeton), jak również dla niejednorodnego (cegła klinkierowa). Na rysunku 7 przedstawiono przykładowy chwilowy rozkład składowej E_z dla modelu ściany jednowarstwowej wykonanej z materiału jednorodnego – gazobetonu przy σ = 0,01 S/m oraz σ = 0,1 S/m. Otrzymane rezultaty potwierdzają efekty polowe obserwowane w układzie z jednorodną ścianą poddaną działaniu fali płaskiej.

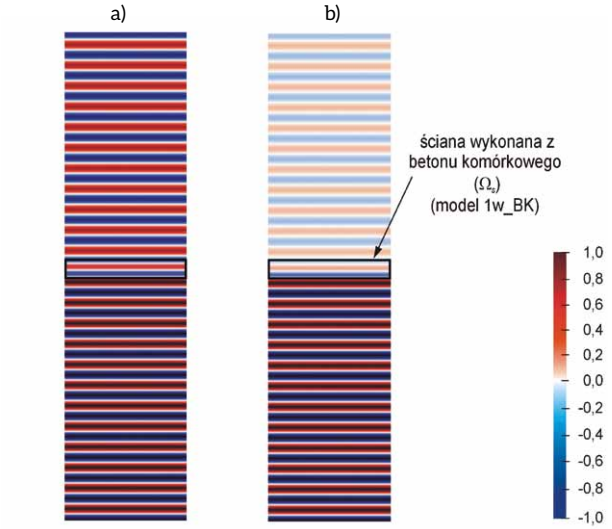
W obszarze za ścianą w obu przypadkach zauważalne jest zmniejszenie wartości pola elektromagnetycznego wynikające ze stratności materiału. Wyznaczone w stanie ustalonym chwilowe rozkłady pola uwzględniają efekty wielokrotnych odbić fali na granicy powietrze – ściana. Dziesięciokrotne zwiększenie konduktywności skutkuje ok. 90% zmniejszeniem wartości pola. Wewnątrz ściany występuje lokalna zmiana prędkości fali, która ze względu na jednorodność materiału i regularność geometrii układu nie powoduje zaburzeń w rozkładzie pola. Wskazany efekt jest widoczny przy ocenie zjawisk występujących za ścianą, gdzie amplituda zmian pola przyjmuje niższe wartości.

W obszarze za ścianą wykonaną z cegieł klinkierowych zauważalne jest zmniejszenie wartości natężenia pola elektrycznego wynikające ze stratności masy ceramicznej (σ = 0,01 S/m). Propagacja fali elektromagnetycznej w obszarze cegły ma złożony charakter, który wpływa na pojawianie się wielokrotnych odbić na granicy powietrze – masa ceramiczna. Liczba i wielkość otworów występujących w cegle skutkuje szczególnie zmianą obrazu pola w obszarze bliskim za murem. Chwilowa zmiana prędkości fali przy przechodzeniu przez kolejne warstwy powietrza i masy ceramicznej znajduje odzwierciedlenie w rozkładach pola i występowaniu interferencji. Z uwagi na dużą liczbę drążeń i powierzchni granicznych wskazany efekt jest szczególnie widoczny przy ocenie zjawisk występujących za ścianą wykonaną z cegieł C30. Zakres zmian pola przyjmuje w tym przypadku wyższe wartości. Efekty odbić fali od ściany, powodujące powstawanie chwilowych minimów i maksimów, są szczególnie widoczne w odległości 0,6 m przed murem. Różnice w wartościach pola można wytłumaczyć w ujęciu makroskopowym, przez uwzględnienie udziału masy ceramicznej w objętości cegły. Różnica pomiędzy dwoma analizowanymi rodzajami cegieł wynosiła 16,38%. Większa wartość 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. Na przykład w modelu 1w C18 wartości pola są wyższe o ok. 12% od wartości otrzymanych dla wariantu 1w C30. Makroskopowy opis nie uwzględnia lokalnych niejednorodności w rozkładzie pola oraz przesunięć fazowych fali.

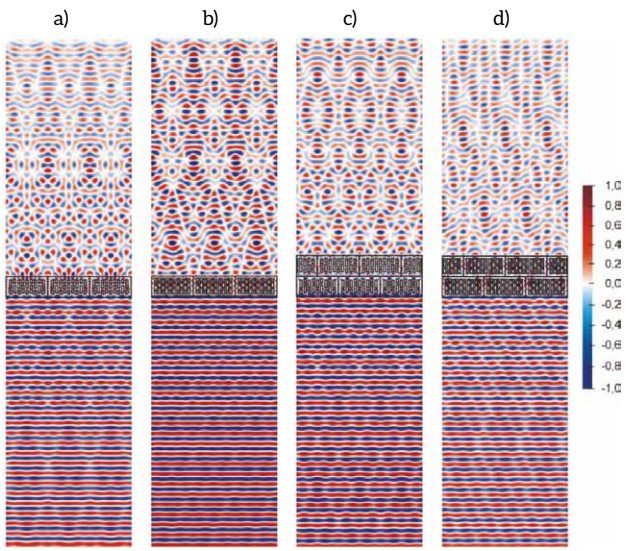
Na rysunkach 9 i 10 przedstawiono zależności pomiędzy maksymalną wartością E_z a konduktywnością w obszarze za ścianą jednowarstwową (1w) i dwuwarstwową (2w). Charakterystyki dotyczą analizowanych rodzajów materiałów budowlanych:

reklama

reklama



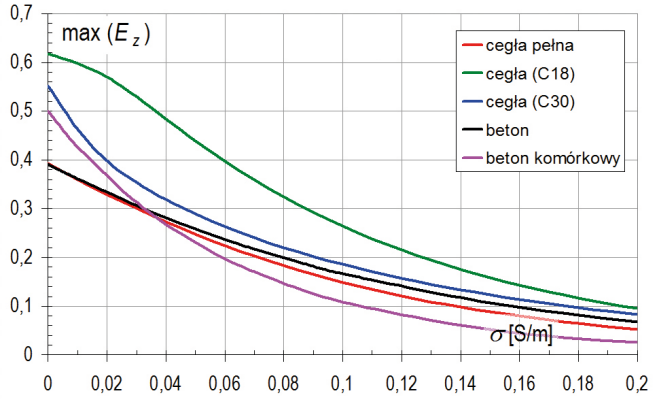
Rys. 7. Chwilowy rozkład składowej E_z w modelu zawierającym jednowarstwową ścianę wykonaną z betonu komórkowego dla konduktywności: a) σ = 0,01 S/m; b) σ = 0,1 S/m



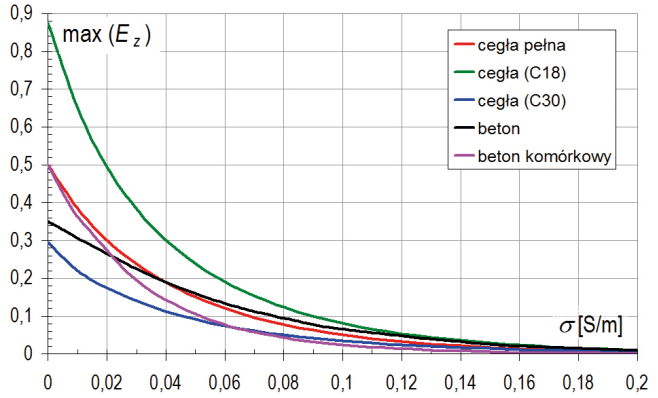
Rys. 8. Chwilowy rozkład składowej E_z w modelach: a) 1w_C18; b) 1w_C30; c) 2w_C18; d) 2w_C30

- jednorodnych (pełna cegła, beton i gazobeton);
- niejednorodnych (cegły klinkierowe z drążeniami: C18 i C30).

We wszystkich analizowanych wariantach zaobserwowano, że wraz ze wzrostem konduktywności materiału maleją wartości pola elektrycznego. W przypadku ściany wykonanej z dwóch warstw cegieł klinkierowych C18 zauważono znaczny wzrost wartości pola w porównaniu do innych wariantów ścian (rys. 10). Przy analizie konduktywności masy ceramicznej wynoszącej 0,1 S/m można stwierdzić, że dla ściany jednowarstwowej wartości pola dla wszystkich wariantów ścian są dwukrotnie wyższe niż dla ściany dwuwarstwowej. Złożoność cegły C18 powoduje, że zachodzące zjawiska zwłaszcza w jej wnętrzu skutkują najwyższymi wartościami pola elektrycznego. Biorąc pod uwagę większą liczbę drążeń w cegle C30, wydawać by się mogło, że wartości pola powinny być wyższe niż dla C18. W przypadku



Rys. 9. Względne maksymalne wartości składowej E_z w obszarze za ścianą jednowarstwową (1w) przy uwzględnieniu zmienności konduktywności materiału



Rys. 10. Zależność pomiędzy maksymalną wartością E_z a konduktywnością w obszarze za ścianą dwuwarstwową (2w)

materiałów jednorodnych wyniki są bardziej przewidywalne niż dla materiału złożonego z masy ceramicznej i powietrza.

Podsumowanie

Otrzymane wyniki wskazują, że zmniejszenie procentowego udziału masy ceramicznej w cegle prowadzi do zwiększenia bezwzględnej wartości natężenia pola. Jest to efekt oczekiwany, w związku ze zmniejszeniem bezwzględnej grubości warstwy dielektryka stratnego. Jednak obserwowane zmiany wartości natężenia pola istotnie zależą od efektów polowych, wielokrotnych odbić na granicy masa ceramiczna – powietrze i wielkości drążeń w stosunku do długości fali elektromagnetycznej. Tego typu zjawiska mogą być analizowane ilościowo jedynie poprzez obliczenia numeryczne.

Zwiększenie stratności materiału powoduje, że przy przechodzeniu fali przez dielektryk dominującą rolę odgrywa zjawisko tłumienia fali. Natomiast porowatość ośrodka w ujęciu elektromagnetycznym skutkuje tym, iż fale doznają wielokrotnych odbić i ugięć przy względnie małym tłumieniu. Niezależnie od modelu ściany największa rozpiętość w wartościach pola elektrycznego widoczna jest w zakresie $\sigma \in \langle 0, 0{,}09 \rangle$ S/m.

Charakterystyki otrzymane dla modelu ścian jednowarstwowych wykonanych z cegieł z typowym rozmiarem drążeń stosowanym w Polsce (rys. 4) wykazują przynajmniej dwukrotne zwiększenie wartości składowej E_z względem ścian dwuwarstwowych w zakresie konduktywności masy ceramicznej $\sigma > 0{,}05$ S/m.

Wyniki świadczą o złożonych zjawiskach falowych, jakie występują podczas propagacji fali przez materiał elektrycznie porowaty (cegły klinkierowe). Jak można zauważyć, różne konstrukcje ściany czy zmienność parametrów materiałowych wymagają indywidualnej numerycznej analizy.

Literatura

[1] Taflove A., Hagness S.C.: *Computational Electrodynamics: The finite – difference time – domain method*. Boston, Artech House, 2005.

[2] Zhao Z.B., Cui X., Li L., Gao Ch.: *Analysis of shielding performance of reinforced concrete structures using the method of moments*. IEEE Transactions on Magnetics, t. 44, 6/2008.

[3] Berenger J.P.: *A perfectly matched layer for the absorption of electromagnetic waves.* Journal of Computational Physics, vol. 114, 1994.

[4] Cuiñas I., García Sánchez M.: *Permittivity and Conductivity Measurements of Building Materials at 5.8 GHz and 41.5 GHz*. Wireless Personal Communications: An International Journal, vol. 20, 1/2002.

[5] Oskooi A.F., Roundyb D., Ibanescua M., Bermelc P., Joannopoulosa J.D., Johnson S.G.: *MEEP: A flexible free-software package for electromagnetic simulations by the FDTD method*. Computer Physics Communications, vol. 181, 2010.

[6] Choroszucho A., Butryło B.: *The influence of the building reinforcement inside the concrete column on the distribution of the electromagnetic field*. „Przegląd Elektrotechniczny", t. 86, nr 5/2010.

[7] Choroszucho A.: *Analiza propagacji fal elektromagnetycznych w elementach budowlanych o złożonej strukturze w zakresie częstotliwości komunikacji bezprzewodowej*. Rozprawa doktorska, Oficyna Wydawnicza Politechniki Białostockiej, 2014.

[8] PN-EN 772-3:2000 Metody badań elementów murowych – Określenie objętości netto i udziału procentowego drążeń elementów murowych ceramicznych przez ważenie hydrostatyczne.

[9] PN-EN 772-16:2001/A1:2005 Metody badań elementów murowych. Część 16: Określenie wymiarów.

[10] PN-EN 771-1:2006 Wymagania dotyczące elementów murowych. Cześć 1: Elementy murowe ceramiczne.

dr inż. Agnieszka Choroszucho, Gabriela Druć, Damian Orzechowski – Politechnika Białostocka, Wydział Elektryczny;
Katedra Elektrotechniki Teoretycznej i Metrologii;
e-mail: a.choroszucho@pb.edu.pl, gabriela.druc2d@gmail.com, damian.orzechowsky@outlook.com

artykuł recenzowany

reklama

reklama