

Wpływ struktury cegieł klinkierowych oraz ich konduktywności na wartości pola elektrycznego

Agnieszka Choroszucho, Bogusław Butryło

Wprowadzenie

Współczesna technologia budowlana jest oparta głównie na materiałach ceramicznych oraz warstwowości ścian w zależności od stosowanych materiałów i funkcji, jaką ma pełnić konstrukcja. Przyszłość w budownictwie to przede wszystkim wykorzystanie najnowszych technologii i innowacyjnych materiałów. W tym celu wielu wiodących producentów ceramiki budowlanej udoskonala swoje wyroby, jednocześnie uwzględniając wciąż rosnące zainteresowanie energooszczędnością powstających konstrukcji. Niemniej jednak, współczesne budownictwo bazuje na materiale ceramicznym, którego wpływ na wartości pola elektrycznego został zaprezentowany w tym artykule.

Budynki jednorodzinne zawierają ściany jedno- i wielowarstwowe, złożone głównie z elementów ceramicznych, takich jak cegły, pustaki. Są one uformowane z gliny, wapna, piasku lub innych surowców mineralnych. Wytrzymałość mechaniczną i odporność na wpływy atmosferyczne uzyskują poprzez proces suszenia oraz wypalania (ew. naparzenia parą wodną). W zależności od zastosowanych surowców mogą służyć również do wznoszenia murów, filarów, słupów, a także fundamentów oraz stanowić wypełnienie stropów (strop Kleina). Podział gotowych wyrobów dotyczy cech geometrycznych, wytrzymałości na ściskanie, stopnia wypalania oraz zastosowanych surowców [8, 9, 10]. Wymiary cegieł są bardzo zróżnicowane, ale oparte na stosunku wysokości (h) do szerokości (b) i długości (l) wynoszącym 1:2:4 [8–10] (rys. 2, 3).

Lokalizacja systemów komunikacji bezprzewodowej (Wi-Fi) wewnątrz tego typu budynków wymaga szczegółowej analizy rozkładu pola elektromagnetycznego [7]. Analiza propagacji fal w zakresie wielkich częstotliwości wiąże się z koniecznością badania zjawisk związanych z konstrukcją budowlaną oraz zastosowanymi materiałami o różnych właściwościach elektrycznych [1, 6]. Stosowanie nowoczesnych systemów komunikacji bezprzewodowej wymaga uwzględnienia efektów, które mogą pogarszać zakładaną jakość transmisji danych. Analiza pól występujących w systemach komunikacji bezprzewodowej wymaga rozpatrzenia efektów związanych z: wielokrotnymi odbiciami, ugięciami, interferencją i tłumieniem fali spowodowanych geometrią i złożonością konstrukcji. Powyższe czynniki są tematem licznych badań naukowych, mających na celu jak najdokładniejsze określenie rozkładu natężenia pola w rozpatrywanych układach [4, 6].

Wskazane zjawiska są bezpośrednim efektem rozchodzenia się fal w strukturach zbudowanych z niedoskonałych dielektryków czy złożonych elementów zawierających drążenia, jak np.

Streszczenie: W artykule przedstawiono wpływ powszechnie stosowanego materiału budowlanego na rozkład pola elektromagnetycznego. Analiza dotyczyła obszaru zawierającego ścianę jedno- lub dwuwarstwową, wykonaną z dwóch rodzajów cegieł klinkierowych. Uwzględniono zmienność rozmiaru drążenia oraz ilość otworów wewnątrz cegieł. Analizowano wpływ zmiany parametru elektrycznego materiału ceramicznego, tj. konduktywności, na rozkład pola elektrycznego. Analiza otrzymanych wyników oraz zachodzących zjawisk umożliwi lepsze planowanie lokalizacji nadajników sieci bezprzewodowej stosowanych m.in. w sieciach komórkowych, Wi-Fi, WiMAX. Do analizy zastosowano metodę różnic skończonych z bezpośrednim całkowaniem równań Maxwella w dziedzinie czasu (FDTD). Celem badań jest lepsze zrozumienie zachodzących zjawisk polowych wewnątrz złożonych materiałów budowlanych, co może stanowić źródło wiedzy przy ocenie problemów związanych z zanikami sygnału i wpłynąć na polepszenie jakości przesyłanych danych.

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

THE INFLUENCE OF THE STRUCTURE OF CLINKER BRICKS AND THEIR CONDUCTIVITY ON THE VALUES OF ELECTRIC FIELD

Abstract: The paper presents the influence of typical building material on distribution of the electromagnetic field. The analysis was connected with the area containing the wall (single or double-layers) made of two kind of clinker bricks. Also the variability of size of drilling and the number of holes inside the brick were taken into account. Also the influence of change conductivity on values of electric field was analysed. Some phenomena connected with propagation of a high frequency electromagnetic wave cross over the complex, non-ideal material structures (e.g. clinker bricks or reinforced concrete) are discussed. In this paper the finite-difference time-domain method (FDTD) was used. Analysed area was modelled according to requirement the typical building technologies. Analysis of the obtained results will make it possible to solve the problem connected with fading.

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

w ceglach. Są szczególnie widoczne w przypadku sieci bezprzewodowych o małym zasięgu. Zarówno struktury periodyczne, jak i pojedyncze elementy o szczególnych właściwościach materiałowych (zbrojenie) powodują, iż odporność bezprzewodowego kanału transmisyjnego narażona jest na zakłócenia, zjawiska nakładania się fal, opóźnienia sygnału i zaniki sygnału. Część czynników ma charakter losowy, związany ze zmianą warunków propagacji fal. Jednak konstrukcja odpornych sieci komunikacji bezprzewodowej wymusza – już na etapie projektowania systemu – uwzględnienie znanych czynników wpływających na rozkład pola (m.in. geometria budynku czy złożone struktury materiałowe występujące na drodze między nadajnikiem a odbiorcą). 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 m.in. Wi-Fi.

Kolejnym ważnym zagadnieniem jest odpowiedni dobór parametrów materiałowych analizowanych struktur budowlanych. Z tego powodu w artykule przedstawiono wpływ zmiany konduktywności na wartości pola elektrycznego. Prezentowane rezultaty mogą być źródłem wiedzy dotyczącej rozkładu pola elektromagnetycznego w obszarze z materiałami złożonymi z nieidealnych, absorbujących dielektryków.

W pracy przedstawiono wyniki dokładnej analizy wybranych przypadków praktycznych. Uwzględniono również właściwości materiałowe konstrukcji. Znajomość rozkładu pola elektrycznego wewnątrz przestrzeni zawierającej przeszkodę złożoną z cegieł drażonych przy typowej częstotliwości sieci bezprzewodowej może pomóc w dokładniejszym planowaniu rozmieszczenia elementów Wi-Fi.

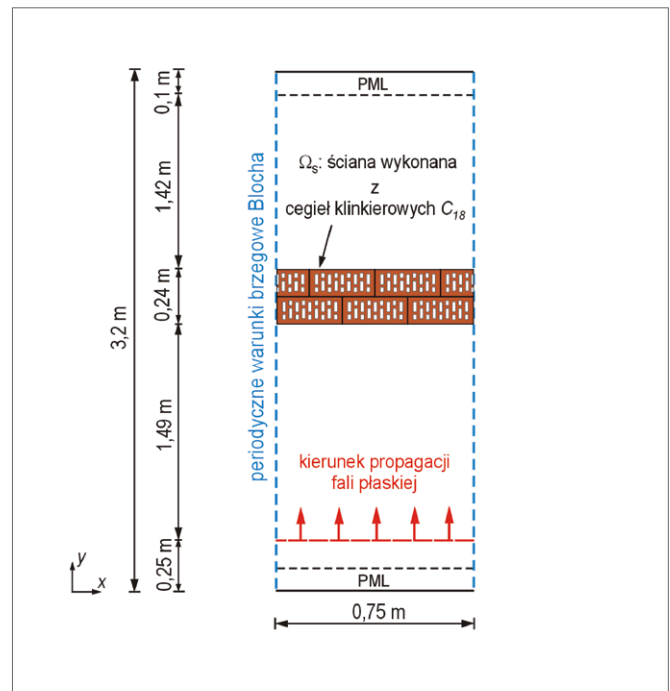
Opis analizowanego modelu

Przedmiotem analizy był model złożony ze ściany wykonanej z cegieł klinkierowych. 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 ($\lambda_0 = 0,125$ m przy $f = 2,4$ GHz). Z tego względu, pomijając zjawiska zachodzące na krańcach ściany, w pobliżu jej krawędzi lub na styku z inną ścianą, możliwe było:

- zastosowanie dwuwymiarowego modelu numerycznego;
- zredukowanie jego wielkości przez zastosowanie właściwych warunków brzegowych, w tym szczególnie warunków periodyczności rozkładu pola [5].

Przyjęte założenia pozwalają na określenie wpływu materiału budowlanego na rozkład pola elektromagnetycznego, z pominięciem innych czynników. Wymiary i ogólną konstrukcję przyjętego modelu przedstawiono na rys. 1.

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), wynoszącym co najmniej 1,4 m. Analizę rozkładów pola elektrycznego oraz ilościową ocenę tłumienia fal w poszczególnych wariantach prowadzono na podstawie obserwa-



Rys. 1. Geometria modelu przy obliczeniach układów z materiałem niejednorodnym (cegła klinkierowa)

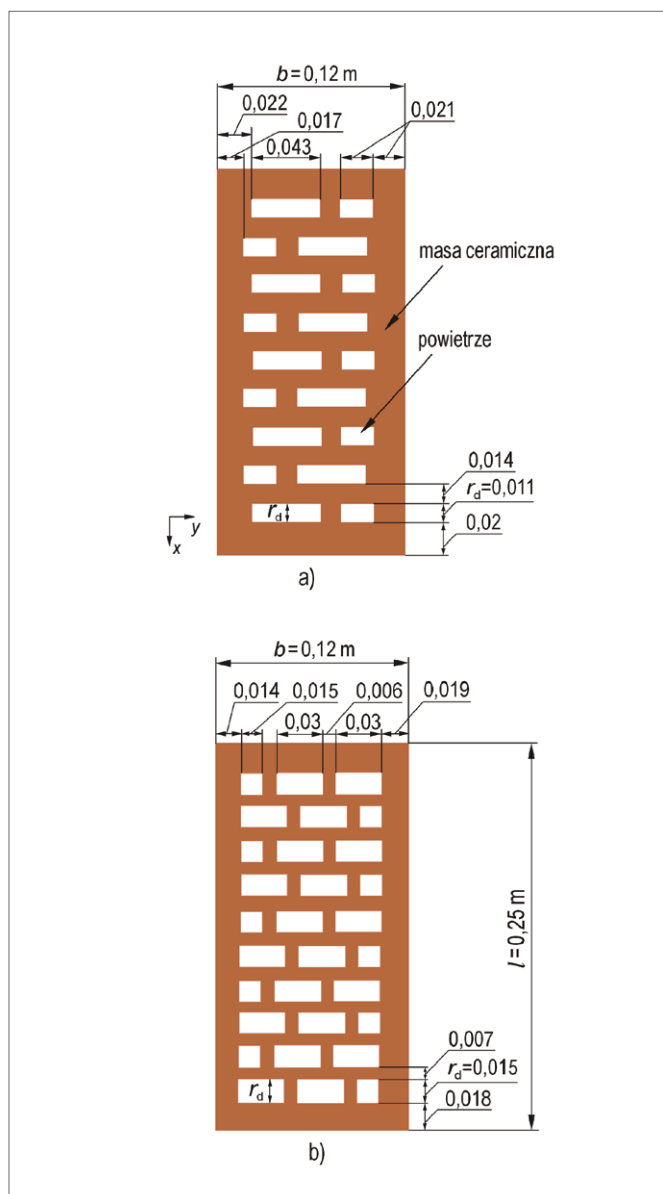
cji maksymalnej wartości składowej pola elektrycznego w obszarze za ścianą – $\max(E_z)$. Przyjęty obszar analizy pozwalał na uwzględnienie ewentualnych deformacji w rozkładzie pola, związanych z niejednorodną strukturą rozpatrywanych materiałów, oraz zmian pola w pewnej odległości od ściany.

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

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

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 rozwinięcie obszaru i okresowość rozkładu pola. Uwzględniano przy tym wymiary elementów konstrukcyjnych oraz budowę ścian. Model dotyczy ścian z cegieł pionowo drażonych. 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. Na rys. 1 przedstawiono najbardziej złożony, jeden z czterech analizowanych wariantów budowy ściany.

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:



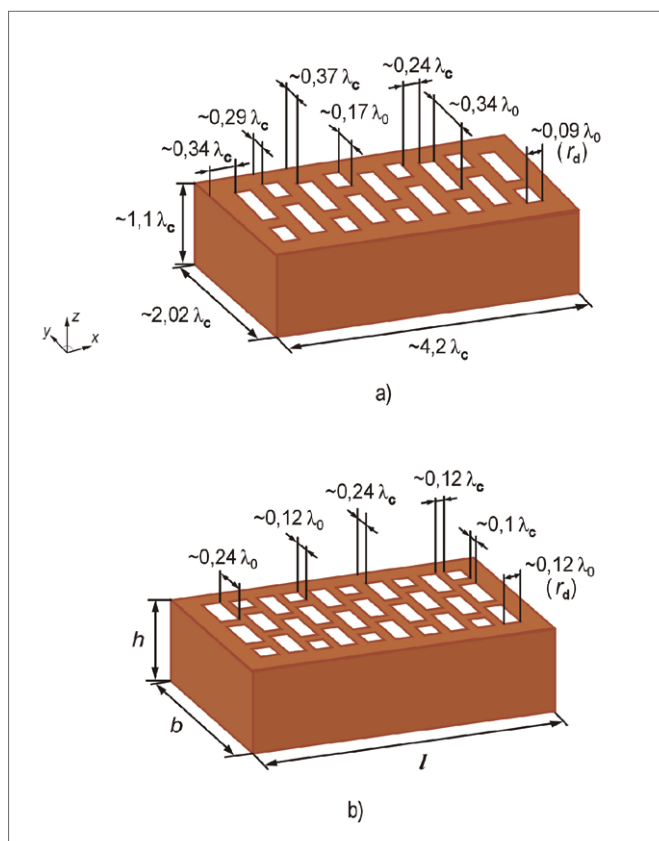
Rys. 2. Wymiary geometryczne analizowanych cegieł klinkierowych (widok 2D w płaszczyźnie XY): a) z 18 drążeniami (C₁₈); b) z 30 otworami (C₃₀)

- z 18 drążeniami prostopadłymi do powierzchni kładzenia (wspornej) – model C₁₈;
- z 30 drążeniami – model C₃₀.

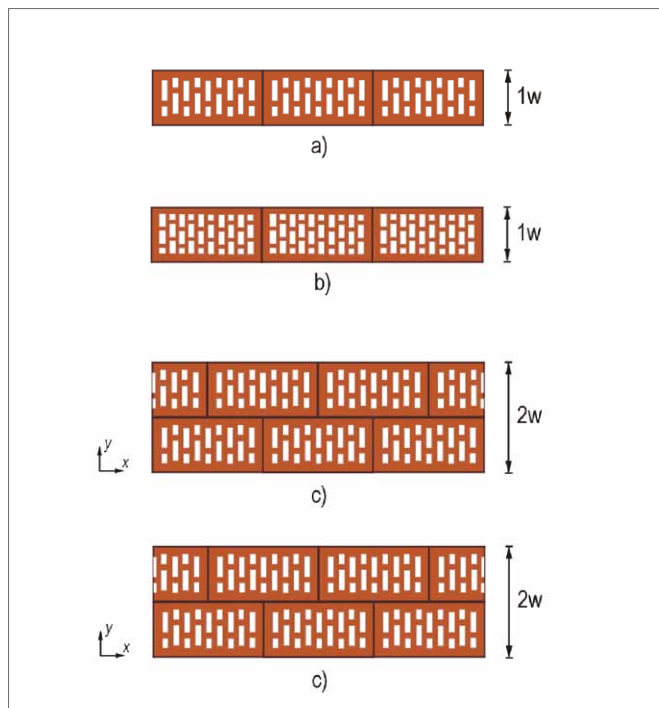
Wymiary zewnętrzne obu typów cegieł wynoszą: $h = 0,06$ m (wysokość), $b = 0,12$ m (szerokość), $l = 0,25$ m (długość).

Na potrzeby dalszej analizy numerycznej wymiary podane na rys. 2 wyznaczono jako wartości uśrednione na podstawie przeprowadzonych pomiarów. Sposób określenia parametrów próby precyzują normy [8, 9, 10].

W celu określenia wpływu zmian wymiarów drążeni na rozkład pola wykonano obliczenia przy zmianie szerokości drążeni w osi zgodnej z najdłuższym wymiarem cegły. Zmieniany w testach wymiar r_d (rys. 2) przyjmował wartości $r_d \in \{0, 0,005, 0,007, 0,011, 0,015, 0,017, 0,019\}$ m. Należy zwrócić uwagę, że zmiana szerokości otworów prowadzi do zmiany procentowego udziału dielektryka stratnego (tj. masy ceramicznej) w cegle.



Rys. 3. Elektryczne wymiary analizowanych cegieł przy częstotliwości $f = 2,4$ GHz: a) cegła C₁₈; b) cegła C₃₀



Rys. 4. Warianty ścian: a) 1w_C18; b) 1w_C30; c) 2w_C18; d) 2w_C30

Na rys. 3 przedstawiono elektryczne odwzorowanie wymiarów analizowanych cegieł 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. Do analizy obliczanych wariantów przyjęto zmienną konduktywność, w zakresie $\sigma \in \langle 0, 0,2 \rangle$ S/m.

Analizie poddano cztery rodzaje konstrukcji ściany (rys. 4) wpisane w obszar Ω_s w modelu bazowym. W dalszym opisie oznaczenia wariantów uwzględniają liczbę warstw cegieł oraz typ cegły. Na przykład 1w_C18 oznacza model ściany jednowarstwowej wykonanej z cegieł typu C₁₈.

Model numeryczny

Do wyznaczenia rozkładu pola elektromagnetycznego w analizowanych układach wykorzystano metodę różnic skończonych w dziedzinie czasu FDTD (ang. *Finite Difference Time Domain*) [1, 2]. Jest ona oparta na równaniach Maxwella w postaci czasowej:

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

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

które są następnie przekształcane do postaci różnicowej. Sprzężone równania pola elektromagnetycznego są jednocześnie rozwiązywane w dziedzinie czasu i przestrzeni.

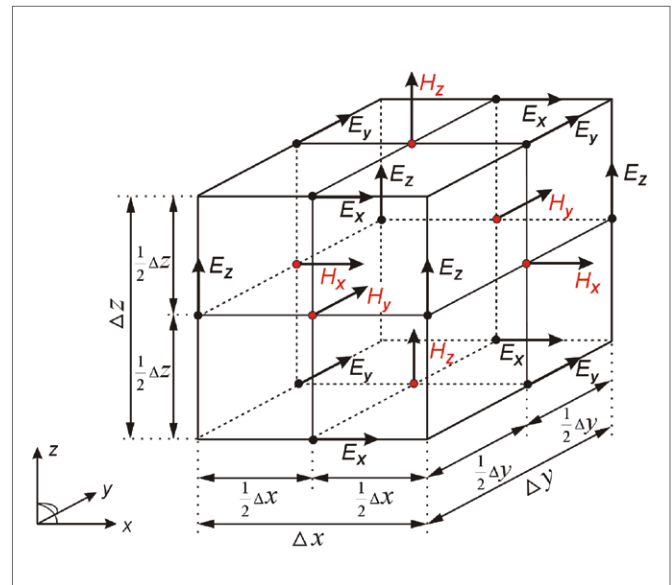
Metoda FDTD pozwala na analizę złożonych struktur, w których każdemu materiałowi przypisane są właściwości materiałowe, co bezpośrednio wpływa na poprawność wyników.

W celu otrzymania układu równań skalarnych, opisującego poszczególne składowe wielkości pola, równania (2-3) podlegają dekompozycji w układzie współrzędnych kartezjańskich. Przykładowo równanie dla składowej natężenia pola elektrycznego (E_z) w postaci skalarnej ma postać:

$$\frac{\partial E_x}{\partial t} = \frac{1}{\varepsilon} \left(\frac{\partial H_z}{\partial y} - \frac{\partial H_y}{\partial z} - \sigma E_x \right) \quad (4)$$

Przy zagadnieniach trójwymiarowych, w klasycznym sformułowaniu metody, wykorzystuje się komórkę Yee (rys. 5) [2]. 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 realizowany przez właściwe rozmieszczenie wektorów natężenia pola elektrycznego E i magnetycznego H w ramach każdej komórki, z którą związane są parametry materiałowe, takie jak 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.



Rys. 5. Schemat pojedynczej komórki Yee

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 następane wartości składowych wektorów natężenia pola elektrycznego E_x, E_y, E_z .

Kolejną zaletą algorytmu jest założenie, że rozmiar komórki Yee określa przyrost w przestrzeni Δ . W przypadku trójwymiarowym, jeżeli przyjmuje się, że komórka Yee jest sześcienna, gdzie $\Delta = \Delta_x = \Delta_y = \Delta_z$, to odległości pomiędzy odpowiednimi składowymi natężenia pola elektrycznego i magnetycznego wynoszą $0,5\Delta$.

W wyniku aproksymacji pochodnych cząstkowych otrzymuje się równania Maxwella w postaci różnicowej:

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

$$\frac{{}^{n+1}_{i,j,k}E_y - {}^n_{i,j,k}E_y}{\Delta_t} = \frac{1}{\varepsilon_{i,j,k}} \left(\frac{{}^{n+\frac{1}{2}}_{i,j,k+\frac{1}{2}}H_x - {}^{n+\frac{1}{2}}_{i,j,k-\frac{1}{2}}H_x}{\Delta_z} - \frac{{}^{n+\frac{1}{2}}_{i+\frac{1}{2},j,k}H_z - {}^{n+\frac{1}{2}}_{i-\frac{1}{2},j,k}H_z}{\Delta_x} - \sigma_{i,j,k} {}^{n+\frac{1}{2}}_{i,j,k}E_y \right) \quad (6)$$

$$\frac{{}^{n+1}_{i,j,k}E_z - {}^n_{i,j,k}E_z}{\Delta_t} = \frac{1}{\varepsilon_{i,j,k}} \left(\frac{{}^{n+\frac{1}{2}}_{i+\frac{1}{2},j,k}H_y - {}^{n+\frac{1}{2}}_{i-\frac{1}{2},j,k}H_y}{\Delta_x} - \frac{{}^{n+\frac{1}{2}}_{i,j+\frac{1}{2},k}H_x - {}^{n+\frac{1}{2}}_{i,j-\frac{1}{2},k}H_x}{\Delta_y} - \sigma_{i,j,k} {}^{n+\frac{1}{2}}_{i,j,k}E_z \right) \quad (7)$$

$$\frac{{}^{n+\frac{1}{2}}_{i,j,k}H_x - {}^{n-\frac{1}{2}}_{i,j,k}H_x}{\Delta_t} = \frac{1}{\mu_{i,j,k}} \left(\frac{{}^n_{i,j,k+\frac{1}{2}}E_y - {}^n_{i,j,k-\frac{1}{2}}E_y}{\Delta_z} - \frac{{}^n_{i,j+\frac{1}{2},k}E_z - {}^n_{i,j-\frac{1}{2},k}E_z}{\Delta_y} \right) \quad (8)$$

$$\frac{{}^{n+\frac{1}{2}}_{i,j,k}H_y - {}^{n-\frac{1}{2}}_{i,j,k}H_y}{\Delta_t} = \frac{1}{\mu_{i,j,k}} \left(\frac{{}^n_{i+\frac{1}{2},j,k}E_z - {}^n_{i-\frac{1}{2},j,k}E_z}{\Delta_x} - \frac{{}^n_{i,j,k+\frac{1}{2}}E_x - {}^n_{i,j,k-\frac{1}{2}}E_x}{\Delta_z} \right) \quad (9)$$

$$\frac{{}^{n+\frac{1}{2}}_{i,j,k}H_z - {}^{n-\frac{1}{2}}_{i,j,k}H_z}{\Delta_t} = \frac{1}{\mu_{i,j,k}} \left(\frac{{}^n_{i,j+\frac{1}{2},k}E_x - {}^n_{i,j-\frac{1}{2},k}E_x}{\Delta_y} - \frac{{}^n_{i+\frac{1}{2},j,k}E_y - {}^n_{i-\frac{1}{2},j,k}E_y}{\Delta_x} \right) \quad (10)$$

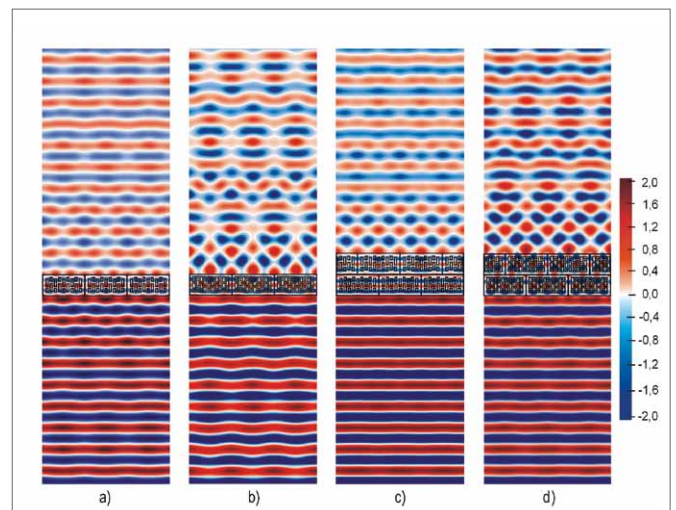
Ze względu na sformułowanie metody oraz możliwości odwzorowania geometrii analizowanego układu metoda FDTD jest szczególnie przydatna przy obliczeniach pól elektromagnetycznych zmiennych w czasie, w zakresie wielkich częstotliwości oraz sygnałów szerokopasmowych.

Obszar rozpatrywanych modeli podlegał dyskretyzacji przez wpisanie równomiernej siatki komórek Yee. Ze względu na ograniczenia czasowe i możliwości stosowanych programów maksymalny liniowy rozmiar komórki Yee wynosił co najwyżej $\Delta_x = \Delta_y = 1,6667$ mm. Przy przyjętej rozdzielczości siatki różnicowej zjawiska falowe na odcinku jednej długości fali w powietrzu (λ_p) były modelowane za pomocą 75 komórek (przy $f = 2,4$ GHz). Obliczenia rozkładu pola wykonano metodą różnic skończonych w dziedzinie czasu (FDTD) [1, 2].

Ocena jakościowa rozkładów pola w układach z cegłami drażonymi

Obliczenia układów z cegłami drażonymi wskazują na lokalne zmiany pola na skutek propagacji fal w materiale o złożonej strukturze. Na rysunku 6 przedstawiono rozkład składowej E_z dla tej samej, wybranej chwili po osiągnięciu stanu ustalonego. Zaprezentowany rozkład otrzymano przy założeniu typowych rozmiarów drażeń: $r_d = 0,011$ m (1w_C18, 2w_C18) oraz $r_d = 0,015$ m (1w_C30, 2w_C30).

W obszarze za ścianą zauważalne jest zmniejszenie wartości natężenia pola elektrycznego wynikające ze stratności masy ceramicznej ($\sigma = 0,01$ S/m). Propagacja fali elektromagnetycznej w obszarze cegły ma złożony charakter. Porowatość cegły

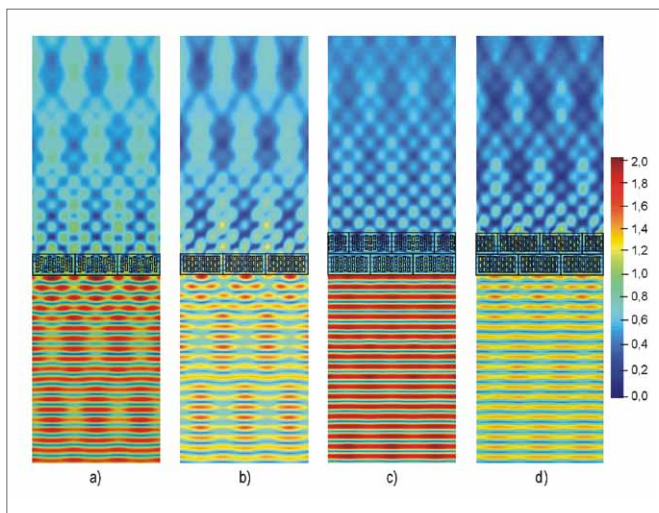


Rys. 6. Chwilowy rozkład składowej E_z w analizowanym obszarze przy $f = 2,4$ GHz dla modeli: a) 1w_C18; b) 1w_C30; c) 2w_C18; d) 2w_C30

w sensie elektromagnetycznym wpływa na pojawianie się wielokrotnych odbić na granicy powietrze – masa ceramiczna. Liczba i wielkość otworów występujących w cegle skutkują szczególnie zmianą obrazu pola w obszarze bliskim za murem. 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 C_{30} . Zakres zmian pola przyjmuje w tym przypadku większe wartości. Efekty odbić fali od ściany, powodujące powstawanie chwilowych minimów i maksimów, są szczególnie widoczne w odległości 0,6 m przed murem w modelach z jednowarstwową ścianą, przy $f = 2,4$ GHz.

Analizowane różnice w wartościach pola można wytłumaczyć w ujęciu makroskopowym przez uwzględnienie udziału masy ceramicznej w objętości cegły. Różnica $V_{\%mc}$ pomiędzy dwoma analizowanymi rodzajami cegieł wynosiła 16,38%. 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. Na przykład w modelu 1w_C18 przy $f = 2,4$ GHz 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.

Opisane powyżej wnioski znajdują również potwierdzenie w prezentowanych maksymalnych wartościach składowej E_z , przy założeniu konduktywności masy ceramicznej wynoszącej 0,01 S/m (rys. 7). Przy częstotliwości 2,4 GHz, w modelach z cegły C_{30} (1w_C30, 2w_C30), charakteryzujących się mniejszym o 16,38% udziałem masy ceramicznej względem cegły C_{18} , występują niższe o ok. 20% wartości natężenia pola przed ścianą niż w modelach 1w_C18 i 2w_C18. Rozkład masy ceramicznej oraz jej względny udział wpływają na ograniczenie wypadkowych efektów odbicia fali. Wskazane czynniki gwarantują równocześnie wyższe wartości natężenia pola elektrycznego w obszarze za ścianą (rys. 7 b, d).



Rys. 7. Maksymalny rozkład składowej E_z dla modeli: a) 1w_C18; b) 1w_C30; c) 2w_C18; d) 2w_C30

W wyniku propagacji fali przez element elektrycznie porowaty we wszystkich modelach widoczne są minima i maksima składowej E_z . W obszarze za ścianą, w modelach wykonanych z dwóch warstw cegieł, wartości pola są oczywiście mniejsze. Dla ściany z cegieł C_{18} ta różnica wynosi ok. 10% względem modelu jednowarstwowego (1w_C18), zaś przy drugim wariancie cegieł (C_{30}) spadek wartości $\max(E_z)$ sięga 15%.

Obserwowane efekty rozkładu obwiedni pola w wariantach jednowarstwowym wskazują, że w obszarze przed ścianą występują większe zniekształcenia czoła fali, niż jest to widoczne w modelach dwuwarstwowym.

Wpływ konduktywności oraz rozmiaru drążeń na wartości natężenia pola

Uzyskane wyniki obwiedni pola w modelach z cegłami klinkierowymi wskazują na występowanie złożonych zjawisk polowych. Na rysunku 8 przedstawiono zmiany maksymalnej względnej wartości składowej E_z w zależności od wartości konduktywności materiału cegły oraz rozmiaru drążeń (r_d) dla analizowanych ścian.

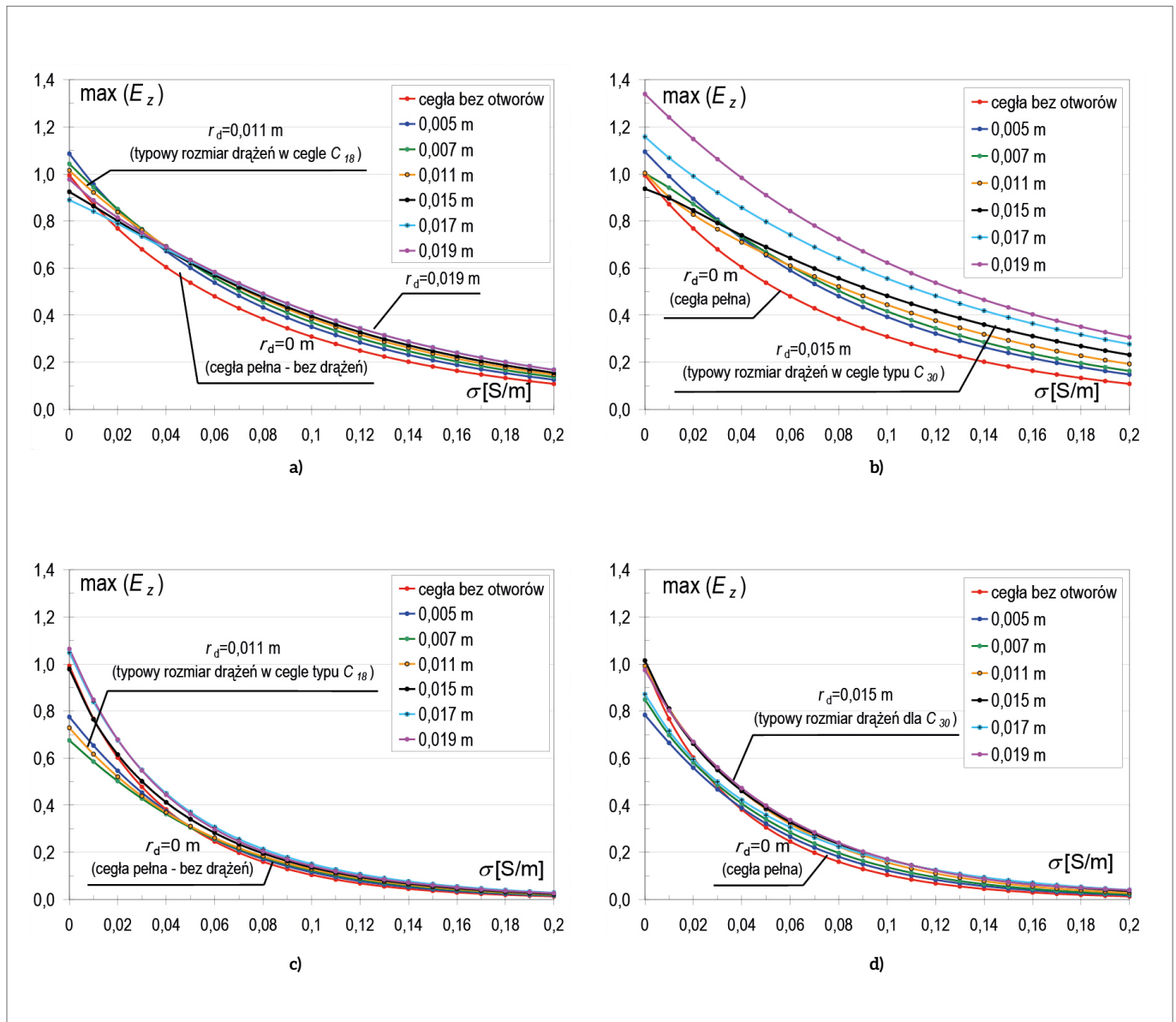
Na rys. 8c przedstawiono charakterystyki wskazujące na wpływ konduktywności na wartości składowej E_z dla modelu ściany dwuwarstwowej z cegieł C_{18} . Dla $\sigma = 0,09$ S/m wskazane wartości są zbliżone do otrzymanych w przypadku ściany jednowarstwowej przy $\sigma = 0,19$ S/m. Na rys. 8d zamieszczono analogiczne wykresy dla ściany dwuwarstwowej wykonanej z cegieł typu C_{30} . Niezależnie od rozmiaru drążeń r_d widoczne są mniejsze różnice pomiędzy wartościami pola dla różnych wartości konduktywności masy ceramicznej niż dla ściany jednowarstwowej.

Analizując przypadek, gdy masa ceramiczna jest ośrodkiem bezstratnym, oraz przyjmując typowe rozmiary drążeń dla obu rodzajów cegieł (tj. $r_d = 0,011$ m dla cegły C_{18} oraz $r_d = 0,015$ m w C_{30}), stwierdzono, że wartości natężenia pola są co najwyżej o 4% wyższe w porównaniu do konstrukcji z pełnej cegły (rys. 8 a, b, d). Wyjątek stanowi model dwuwarstwowo 2w_C18, gdzie zaobserwowano obniżenie wartości składowej E_z o 26% (rys. 8 c). Obserwowane efekty należy wiązać ze złożonością zjawisk polowych przy propagacji fali w materiale porowatym.

Znaczna stratność materiału powoduje, że charakterystyki mają przebieg zbliżony do wariantów z materiałem jednorodnym stratnym. Zwiększenie rozmiaru szczelin (obszaru powietrza) kosztem stratnego dielektryka obniża wypadkowe tłumienie fali. Charakterystyki zarówno dla cegieł C_{18} , jak i C_{30} mają przebieg monotoniczny.

Podsumowanie

Otrzymane wyniki wskazują, że zmniejszenie procentowego udziału masy ceramicznej w cegle prowadzi do zwiększenia bezwzględnej wartości natężenia pola. Jest to oczekiwany efekt, 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 poprzez obliczenia numeryczne.



Rys. 8. Względne maksymalne wartości składowej E_z przy częstotliwości $f = 2,4$ GHz w obszarze za ścianą, modele: a) 1w_C18; b) 1w_C30; c) 2w_C18; d) 2w_C30

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 $\sigma \in \langle 0,04, 0,09 \rangle$ S/m, zaś najmniejsza dla $\sigma \in \langle 0,03, 0,04 \rangle$ S/m.

Rezultaty otrzymane dla modelu ścian jednowarstwowych, wykonanych z cegieł z typowym rozmiarem drążenia stosowanym w Polsce $r_d = 0,011$ m, wykazują przynajmniej dwukrotne zwiększenie wartości składowej E_z względem ścian dwuwarstwowych w zakresie kondukcyjności masy ceramicznej $\sigma > 0,05$ S/m. Natomiast wraz ze wzrostem kondukcyjności ($\sigma > 0,18$ S/m) analiza ścian dwuwarstwowych dowodzi, iż obserwowana wartość składowej E_z w ramach tej samej częstotli-

wości przyjmuje zbliżone wartości natężenia pola, niezależnie od rodzaju cegieł. Wyjaśnienie tego zjawiska wynika ze znacznego tłumienia fali w obszarze masy ceramicznej (ograniczony wpływ wielokrotnych odbić) oraz porównywalnego procentowego udziału masy ceramicznej w obu rodzajach cegieł ($C_{18} - 78,88\%$ i $C_{30} - 72,50\%$), zatem zbliżonej grubości warstwy dielektryka, przez którą propaguje fala.

Powyżej opisane zależności dla obu wariantów ścian z cegieł o typowym rozmiarze otworów $r_d = 0,011$ m są analogiczne również dla cegieł przy $r_d = 0,007$ i $0,015$ m, które uzyskuje się również w procesie produkcji. Zatem można zauważyć analogie w wartościach pola w przypadkach rozmiarów drążenia dopuszczalnych według norm.

Wnioski wynikające z charakterystyk dla cegieł pełnych ($r_d = 0$ m) świadczą, że dla ścian dwuwarstwowych różnice w maksymalnych wartościach pola elektrycznego wynoszą

do 5%. Natomiast dla ścian jednowarstwowych w zakresie konduktywności $\sigma \in \langle 0, 0,09 \rangle$ S/m różnice pomiędzy wartościami sięgają do 20%.

Opisane wykresy i ich graficzna prezentacja świadczą o złożonych zjawiskach falowych, jakie występują podczas propagacji fali przez materiał elektrycznie porowaty. Różne konstrukcje ściany czy zmienność parametrów materiałowych wymagają indywidualnej analizy.

Literatura

- [1] TAFLOVE A., HAGNESS S.C.: *Computational Electrodynamics: The finite – difference time – domain method*. Artech House, Boston 2005.
- [2] YEE K.S.: *Numerical solution of initial boundary value problems involving Maxwell equations in isotropic media*. IEEE Trans. Antennas Propagation, vol. AP-14, no. 5, 1966, pp. 302–307.
- [3] BERENGER J.P.: *A perfectly matched layer for the absorption of electromagnetic waves*. „Journal of Computational Physics” 114/1994, pp. 185–200.
- [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, no. 1, 2002, pp. 93–100.
- [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, 181/2010, pp. 687–702.
- [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, 5/2010, s. 60–63.
- [7] DUNTEMANN J.: *Przewodnik po sieciach Wi-Fi*. Nakom, Poznań 2006.
- [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 . Część 1: Elementy murowe ceramiczne.



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

artykuł recenzowany