

Wpływ konstrukcji budowlanej na propagację fal elektromagnetycznych

Agnieszka Choroszucho, Jakub Tymiński, Damian Orzechowski, Alan Kondrusik, Szymon Piotr Duchnowski

Wstęp

Sieci bezprzewodowe są sprawdzonym, nowoczesnym rozwiązaniem stosowanym przy tworzeniu systemów telekomunikacyjnych. Ich użycie pozwala na zastąpienie okablowania stosowanego w standardowych sieciach lokalnych LAN (ang. *Local Area Network*) czy rozległych WAN (ang. *Wide Area Network*). Do grupy systemów komunikacji bezprzewodowej należą zarówno sieci bazujące na komunikacji z wykorzystaniem podczerwieni, jak też sieci, w których transmisja danych odbywa się drogą radiową w paśmie mikrofal.

Systemy komunikacji bezprzewodowej pozwalają na przesyłanie danych np. między komputerami bez konieczności montażu złożonych instalacji kablowych. Umożliwiają wspólne użytkowanie jednego szerokopasmowego połączenia. Dzięki wykorzystaniu standardowych urządzeń instalacja systemów bezprzewodowej transmisji danych jest w wielu przypadkach łatwiejsza i szybsza niż montaż sieci kablowych. Technologie tego typu stanowią istotne, stale zyskujące na znaczeniu uzupełnienie sieci przewodowych. Mogą być stosowane tam, gdzie względy techniczne utrudniają układanie sieci przewodowych. Systemy bezprzewodowej transmisji danych pozwalają na względnie łatwe i szybkie połączenie wielu urządzeń, przy zachowaniu możliwości dynamicznego i automatycznego konfigurowania zbioru komunikujących się elementów.

Zachowanie właściwej jakości komunikacji w wybranym obszarze, w tym stabilności zestawianych połączeń oraz szybkości transmisji, pozostaje zasadniczą kwestią przy montażu systemów komunikacji bezprzewodowej. Struktura sieci bezprzewodowych wymaga uwzględnienia liczby punktów dostępowych i ich odpowiedniego rozmieszczenia. Dyskutowane problemy stają się szczególnie istotne przy montażu sieci bezprzewodowych wewnątrz budynków. Powodem są efekty powstające przy propagacji fal elektromagnetycznych w układach o złożonej geometrii i strukturze materiałowej [1, 2].

Ostateczna konfiguracja sieci bezprzewodowych wymaga wykonania odpowiednich pomiarów i prób w rzeczywistych warunkach. Na etapie projektowania i analizy struktury sieci możliwe jest również wykorzystanie metod modelowania komputerowego. Numeryczna analiza zjawisk propagacji fal elektromagnetycznych pozwala uwzględnić konstrukcję budynku i wykonać wielowariantową analizę projektowanego systemu komunikacji bezprzewodowej [3].

W inteligentnym budownictwie stosowane są urządzenia odpowiedzialne za sterowanie pracą bram garażowych czy też regulacją oświetlenia i temperatury. Praca urządzeń RTV i AGD może być także dostosowana do potrzeb jego

Streszczenie: Praca przedstawia wpływ konstrukcji budowlanej na rozkład pola elektromagnetycznego wewnątrz części budynku. W analizowanym obszarze zamontowano źródło pola o częstotliwości związanej z komunikacją bezprzewodową (2,4 GHz). Artykuł zawiera dyskusję dotyczącą zjawisk fizycznych związanych z propagacją fali elektromagnetycznej w złożonych konstrukcjach zawierających beton, zbrojenie i cegły. Zastosowano numeryczną metodę różnic skończonych w dziedzinie czasu (FDTD). Analizowany obszar modelowano według typowych budowlanych technologii. Dokładna analiza wyników może przyczynić się do rozwiązania problemu związanego z zanikami sygnału i problemem związanym z komunikacją bezprzewodową.

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

THE INFLUENCE OF THE BUILDING STRUCTURE ON THE PROPAGATION OF ELECTROMAGNETIC WAVES

Abstract: The work presents the influence of the building structure on the distribution of the electromagnetic field inside a part of the building. In the analyzed area, a field source with a frequency related to wireless communication (2.4 GHz) was installed. The article discusses the physical phenomena related to electromagnetic wave propagation in complex structures containing concrete, reinforcement and bricks. The numerical method of finite differences in the time domain (FDTD) was used. The analyzed area was modeled according to typical construction technologies. Careful analysis of the results can contribute to solving the problem related to signal dropouts and the problem related to wireless communication.

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

mieszkańców. Obecnie technologia inteligentnego budynku pozwala na odbieranie wielu różnych sygnałów. Czujniki wewnątrz budynku pozwalają reagować na zmieniające się warunki. *Smart home* to budynek, który jest na bardzo wysokim

sygnału pozwala na ocenę jakości połączenia i eliminację ew. zaników sygnału na trasie pomiędzy odbiornikiem i nadajnikiem. Celem opisanych w tym artykule badań jest ocena rozkładu pola elektromagnetycznego wewnątrz wycinku budynku, który zawiera ściany wykonane z cegieł oraz słup z betonu i ze zbrojeniem. Wnioski i wyniki pozwolą na lepsze zrozumienie zjawisk fizycznych związanych z propagacją fal EM i powstających z tego powodu problemów z komunikacją bezprzewodową ograniczającą poprawne funkcjonowanie inteligentnego budynku.

Konstrukcje zbrojone

W budownictwie głównym materiałem konstrukcyjnym jest beton. Właściwości mechaniczne betonu wynikają z zastosowanego rodzaju cementu, kruszywa i rodzaju wody. Te czynniki mają wpływ na właściwości elektryczne materiałów budowlanych i rozkład pola elektromagnetycznego. Zmiana składu betonu decyduje o stopniu niedoskonałości. W konstrukcjach budowlanych narażonych na naprężenia rozciągające stosuje się zbrojenie w postaci prętów ze stali. Struktura zbrojenia zależy m.in. od założeń konstrukcyjnych, środowiska oraz rodzaju betonu. Nominalna średnica prętów jest w przedziale 5,5–40 mm. W celu polepszenia właściwości wytrzymałościowych konstrukcji stosuje się także haki i pętle kotwiące, strzemiona biegnące prostopadle do kierunku prętów. Montaż zbrojenia oraz odstępy między prętami zbrojeniowymi są określone dla odpowiednich elementów konstrukcji [4].

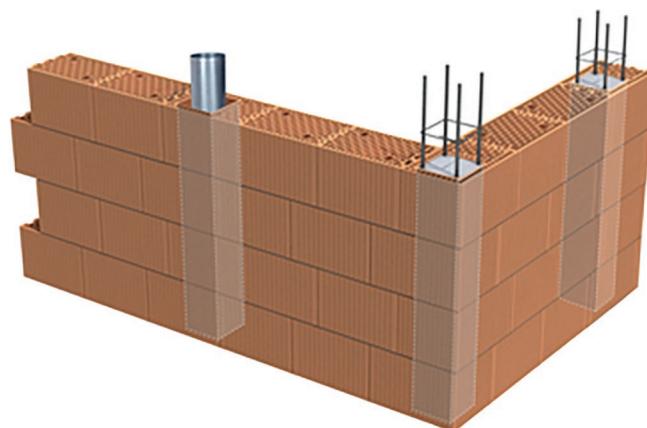
Zasady projektowania słupów i konstrukcji nośnych są inne dla przekrojów poziomych kwadratowych i prostokątnych oraz uzależnione od kierunku betonowania [4]. Średnice stalowych prętów mocowanych w słupach są w granicach 8–20 mm, średnio rozstawionych w odległości 20–30 mm od krawędzi zewnętrznych słupa. Rozstaw między prętami jest uzależniony od schematów obliczeniowych, wysokości oraz wielkości sił i momentów obciążających słupy. Jednym z elementów słupów jest stosowanie strzemion oraz klamer kotwiących łączących pręty oraz podnoszących właściwości wytrzymałościowe konstrukcji (rys. 2) [5].

Model matematyczny

Do wyznaczenia rozkładu pola elektromagnetycznego w analizowanych układach wykorzystano metodę różnic skończonych (ang. *Finite Difference Time Domain*) [7–9]. Przy zagadnieniach trójwymiarowych, w klasycznym sformułowaniu metody, stosuje się komórkę *Yee*. Ze względu na proste sformułowanie metody oraz łatwe odwzorowanie geometrii analizowanego układu, jest szczególnie przydatna przy obliczeniach pól elektromagnetycznych zmiennych w czasie, w zakresie wielkich częstotliwości oraz sygnałów szerokopasmowych. Metoda FDTD opiera się na przekształceniu równań Maxwella

$$\nabla \times \mathbf{E} = -\frac{\partial \mathbf{B}}{\partial t} \quad (1)$$

$$\nabla \times \mathbf{H} = \mathbf{J}_p + \mathbf{J}_D + \mathbf{J}_I \quad (2)$$



Rys. 2. Przykład konstrukcji ze zbrojeniem wewnątrz słupa

$$\nabla \cdot \mathbf{D} = \rho \quad (3)$$

$$\nabla \cdot \mathbf{B} = 0 \quad (4)$$

$$\nabla \cdot \mathbf{J} = -\frac{\partial \rho}{\partial t} \quad (5)$$

przy czym: \mathbf{E} oznacza wektor natężenia pola elektrycznego, \mathbf{H} stanowi wektor natężenia pola magnetycznego, przez \mathbf{D} określono wektor indukcji elektrycznej, \mathbf{B} to wektor indukcji magnetycznej, \mathbf{J} oznacza wektor gęstości prądu, zaś ρ to objętościowa gęstość ładunku elektrycznego. Gęstość prądu przewodzenia \mathbf{J}_p oraz prądu przesunięcia \mathbf{J}_D wyrażono zależnościami

$$\mathbf{J}_p = \sigma \mathbf{E} \quad (6)$$

$$\mathbf{J}_D = \frac{\partial \mathbf{D}}{\partial t} \quad (7)$$

natomiast \mathbf{J}_I oznacza wektor gęstości prądu wymuszającego pole.

Po zastosowaniu dekompozycji równania (1–2) są przedstawione w postaci sześciu sprzężonych równań różniczkowych rzędu pierwszego, opisujących poszczególne składowe pola elektrycznego i magnetycznego, np. dla składowej E_z [7, 9]:

$$\frac{\partial E_z}{\partial t} = \frac{1}{\varepsilon} \left(\frac{\partial H_y}{\partial x} - \frac{\partial H_x}{\partial y} - \sigma E_z \right) \quad (8)$$

Zgodnie z klasycznym schematem *Yee* iteracyjne całkowanie równań Maxwella w dziedzinie czasu oparte jest na zastosowaniu schematu dwukrokowego. W wybranych krokach n czasu wyznacza się rozkład pola elektrycznego, zaś wartości składowych wektora natężenia pola magnetycznego są obliczane z przesunięciem o czas Δt [7]. Rozpatrywane wielkości fizyczne są funkcjami zmiennych przestrzennych (x, y, z) oraz zmiennej czasowej (t). Po zastosowaniu schematu różnic centralnych Eulera do aproksymacji pochodnych cząstkowych w obszarze i po czasie równania różniczkowe przyjmują złożoną postać, np. dla składowej E_z

$$\frac{{}^{n+1}E_z - {}^nE_z}{\Delta_t} =$$

$$= \frac{1}{\varepsilon_{i,j,k}} \left(\frac{{}^{n+\frac{1}{2}}H_y - {}^{n-\frac{1}{2}}H_y}{\Delta_x} - \frac{{}^{n+\frac{1}{2}}H_x - {}^{n-\frac{1}{2}}H_x}{\Delta_y} - \sigma_{i,j,k} {}^{n+\frac{1}{2}}E_z \right) \quad (9)$$

która po przekształceniu pozwala wyznaczyć wartość składowej wzdłuż osi x 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 [9].

Wartość ${}^{n+\frac{1}{2}}E_z$ w równaniu (9) jest przybliżona za pomocą średniej arytmetycznej rozwiązań w kolejnych krokach n oraz $n + 1$ (ang. *semi-implicit approximation*)

$${}^{n+\frac{1}{2}}E_z = \frac{{}^{n+1}E_z + {}^nE_z}{2} \quad (10)$$

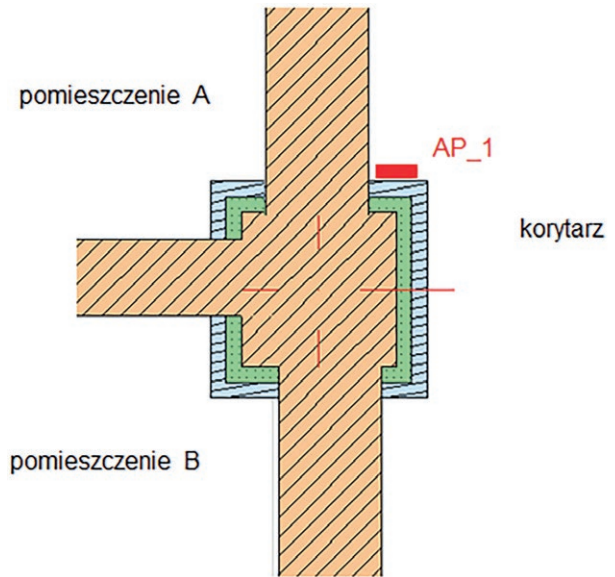
Punkty czasu, w których wyznacza się rozkład pola EM, są przesunięte o $\Delta t/2$ względem punktów, gdzie obliczane są wartości składowych wektora natężenia pola magnetycznego \mathbf{H} . Z każdą komórką związane są parametry materiału, m.in. przewodność i przenikalność.

Analizowany model konstrukcji budowlanej

W rozpatrywanym obszarze o wymiarach $X = 2,9$ m oraz $Y = 2,0$ m wpisano model betonowego słupa i trzy ściany działowe (rys. 3). Ściany były wykonane z cegieł klinkierowych o grubości 0,12 m i zostały pokryte obustronnie tynkiem o grubości 0,01 m.

Ocenie ilościowej podlegały wartości natężenia pola elektrycznego obliczone w całym obszarze. Wymiary słupa w płaszczyźnie XY wynosiły $0,25 \times 0,25$ m. Przy niezmięnionej geometrii całego obszaru rozpatrzono dwa przypadki konstrukcji słupa:

- p1: słup wykonany z betonu, bez zbrojenia, pokryty warstwą tynku o grubości 0,01 m;



Rys. 3. Analizowany fragment obszaru pomieszczenia wraz ze słupem

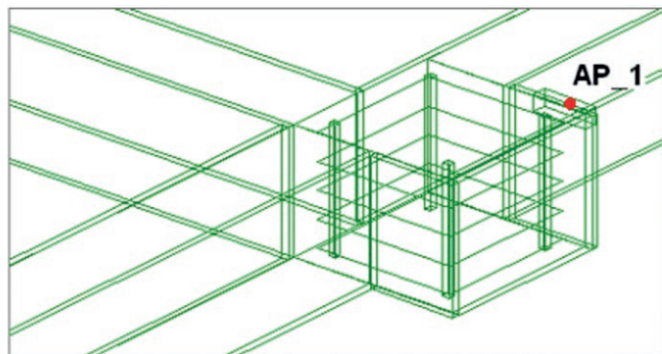
- p2: betonowy słup ze zbrojeniem w postaci: pięciu strzemion wzdłużnych ($d_1 = 0,006$ m $\approx 0,12 \lambda_b$) z rozstawem co $L_1 = 0,1$ m $\approx 1,96 \lambda_b$ (rys. 4).

W układzie działa punktowe źródło pola elektromagnetycznego (AP_1) o przebiegu harmonicznym, o częstotliwości standardowej dla komunikacji bezprzewodowej Wi-Fi, tj. $f = 2,4$ GHz. Źródło zostało umieszczone na prostopadłościowej płytce ($0,1 \times 0,03 \times 0,03$ m) o właściwościach bezstratnego dielektryka ($\varepsilon_r = 2,2$) (rys. 4).

Do wyznaczenia rozkładu pola elektrycznego w rozpatrywanym układzie zastosowano metodę FDTD [1, 2, 7–9]. Do analizy przyjęto następujące wartości parametrów materiałowych:

- beton: $\varepsilon_r = 6$; $\sigma = 1,95 \cdot 10^{-3}$ S/m;
- cegła: $\varepsilon_r = 4,44$; $\sigma = 0,01$ S/m;
- tynk: $\varepsilon_r = 2,02$; $\sigma = 0$ S/m.

W celu dyskretyzacji cały obszar analizy podzielono na sześciennie komórki Yee o wymiarach $\Delta_x \times \Delta_y \times \Delta_z = 10 \times 10 \times 10$ mm. Na granicy obszaru przyjęto warunki absorpcyjne Mura pierwszego rzędu [7]. Otrzymane wyniki obliczeń rozkładu $\max(E_z)$ porównano przez



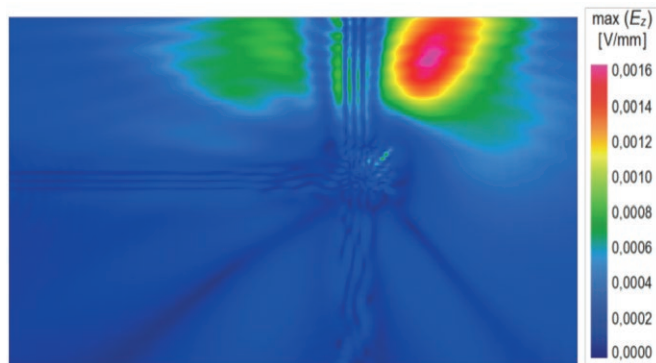
Rys. 4. Fragment konstrukcji pomieszczenia z wyróżnionymi elementami zbrojeniowymi wewnątrz słupa

zestawienie wartości obserwowanych w płaszczyźnie XY znajdującej się 0,5 m poniżej lokalizacji źródła pola, wzdłuż dwóch prostych równoległych do osi Ox , oddalonych o 0,5 m od źródła pola (AP_1).

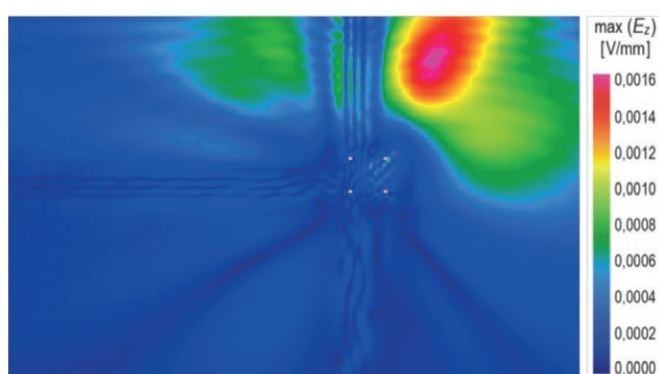
Wyniki analizy

Na rysunkach 5–6 przedstawiono zmiany w jednorodności pola elektromagnetycznego (EM) poprzez składową natężenia pola elektrycznego E_z . Na rysunkach przedstawiono maksymalne wartości pola uzyskane w stanie ustalonym wynikające z konstrukcji słupa (warianty: p1, p2). W przypadku modelu z betonowym słupem (p1), na korytarzu – po lewej stronie, występuje mniejszy obszar z wyższymi wartościami składowej E_z niż w przypadku słupa ze zbrojeniem (p2). Właściwości betonu, zwłaszcza przewodność, powodują zmniejszenie wartości natężenia pola EM. Zbrojenie w konstrukcji słupa wpływa na wzrost wartości pola, ale w części opisanej na rys. 3 jako korytarz. Powodem są zjawiska fizyczne, tj. liczne załamania fali, odbicia, czy interferencje powstające na granicy ośrodków beton–metal. Przy wielkich częstotliwościach duża różnica impedancji falowych środowisk powoduje, iż większość energii jest odbijana na skutek właściwości ekranujących konstrukcji żelbetowej. Betonowy słupek powoduje jedynie tłumienie sygnału (rys. 5–6). Natomiast zbrojenie (model p2) zwiększa obszar z wyższymi wartościami pola w korytarzu.

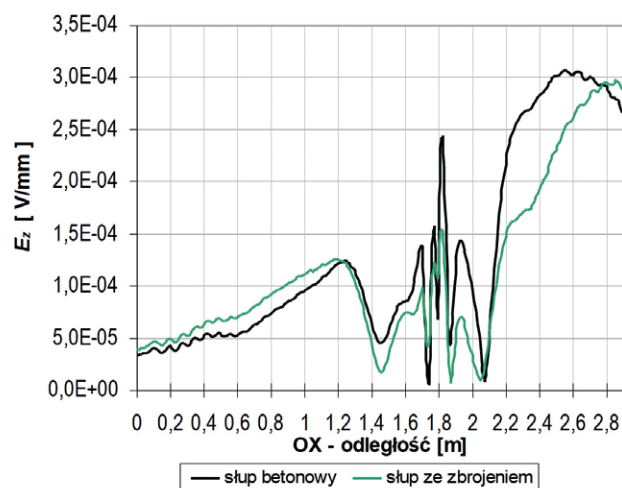
Rysunki 7–8 przedstawiają rozkład maksymalnych wartości składowej E_z względem osi X oraz odpowiednio wzdłuż dwóch prostych oddalonych o 0,5 m od źródła pola. Modelowany słupek zaznaczony jest na osi X pomiędzy 1,69–1,96 m, natomiast ściany: 1,69–1,83 m. Rysunek 7 obrazuje porównanie wartości pomiędzy pomieszczeniami: pomieszczenie B a korytarz. Na rys. 7 dla konstrukcji ze słupem wykonanym z betonu (p1) zauważalne są lokalne ($x \in \langle 2,2, 2,6 \text{ m} \rangle$) wyższe wartości natężenia pola elektrycznego niż dla konstrukcji żelbetowych (sięgające do 8%). W modelach ze zbrojonym słupem nie ma istotnych różnic w wartościach składowej E_z . Natomiast w korytarzu, w odległości do 0,5 m te wartości są wyższe dla modelu z betonowym słupem. Podobne zjawisko, ale do 0,3 m od słupa, jest zauważalne w przypadku prostej, która przechodzi przez pomieszczenie A i korytarz (rys. 8).



Rys. 5. Rozkład natężenia pola elektrycznego (składowej E_z) w analizowanym obszarze z betonowym słupem (p1)

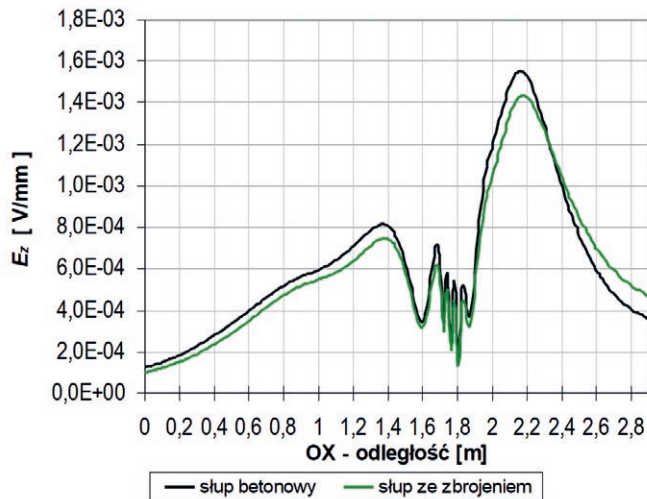


Rys. 6. Rozkład składowej E_z w analizowanym obszarze ze zbrojonym słupem (p2)



Rys. 7. Porównanie maksymalnych wartości składowej E_z dla dwóch przypadków (p1, p2) wzdłuż prostej przechodzącej przez pomieszczenie B i korytarz

Przy analizie rozkładu pola dla prostej przechodzącej przez pomieszczenie A i korytarz (rys. 8) zauważono, iż wraz ze wzrostem odległości od AP_1 sygnał maleje w przypadku modelu z betonowym słupem (p3). Natomiast w części



Rys. 8. Porównanie maksymalnych wartości składowej E_z dla dwóch przypadków (p1, p2) wzdłuż prostej przechodzącej przez pomieszczenie A i korytarz

pomieszczenia A betonowy słup powoduje wyższe wartości składowej E_z . W odległości do 1 m wartości natężenia pola EM są ustabilizowane.

Największe zmiany zachodzą w części słupa. Zasadniczym powodem jest tłumienie materiału i droga, jaką pokonują fale przy przejściu przez materiał stratny, oraz wielokrotne odbicia na granicy ośrodków. Tłumienie fali elektromagnetycznej na skutek stratnych właściwości betonu powoduje zmniejszenie wartości natężenia pola. Dodatkowo zbrojenie w konstrukcji słupa wpływa na selektywny wzrost wartości pola w wybranych obszarach ($x > 2$ m). Powodem są zjawiska falowe na granicy ośrodków oraz interferencje ugiętych fal na niejednorodnościach w strukturze materiału.

Podsumowanie

Propagacja fal elektromagnetycznych w obszarze zbrojenia skutkuje pojawieniem się wielokrotnych odbić na granicy beton-metal. Mimo że geometria rozpatrywanych układów jest względnie prosta, to ocena zjawisk zachodzących w analizowanych układach może być przeprowadzona wyłącznie przy użyciu metod numerycznych. Chwilowe zmiany prędkości fali przy przechodzeniu przez słup prowadzą do powstania miejscowych obrazów pola wskazujących na powstawanie interferencji. Wykonane testy miały na celu określenie wpływu zbrojenia i konstrukcji słupa na wartość pola w okolicy nadajnika. Zbrojenie w słupie powoduje lokalny wzrost wartości pola, ale jednocześnie może wpływać na wystąpienie miejscowych zaników sygnału. Wskazany efekt jest rezultatem przejścia fal przez złożony ośrodek, w którym skutki częściowego ugięcia fali oraz lokalnej zmiany prędkości propagacji przeważają nad tłumieniem. Zmiany w rozkładzie pola elektromagnetycznego wynikają z wewnętrznej struktury materiału, w tym szczególnie z rozmieszczenia elementów zbrojenia, które wpływa na wystąpienie miejscowych osłabień sygnału w bliskiej okolicy słupa. Wskazany efekt jest rezultatem przejścia fal przez złożony

ośrodek, w którym skutki wielokrotnych odbić fali łączą się z efektami tłumienia w obszarach stratnych dielektryków.

W związku z tym, że zachodzące zjawiska są zauważalne jedynie przy wykorzystaniu metod numerycznych, zalecane jest wykonywanie indywidualnych analiz uwzględniających geometrię pomieszczeń. Nawet zwiększenie liczby metalowych prętów zbrojeniowych czy strzemion może powodować lokalne zwiększenie i też zmniejszenie wartości sygnału. Takie analizy są dość istotne zwłaszcza przy obecnym trendzie do stosowania komunikacji bezprzewodowej, ładowania bezprzewodowego czy sterowania inteligentnymi budynkami.

Literatura

- [1] 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, pp. 93–100, 2002.
- [2] HARRIS L., HIKAGE T., NOJIMA T.: *Estimation of Electric Field Distribution in Wireless Office LANs using the FDTD Method*. *Proc. of the EuCAP 2007, the Second European Conference on Antennas and Propagation*, 2007.
- [3] <http://helioprofit.pl/oferta/inteligentny-budynek/>
- [4] PN-EN 1992-1-1:2008 Eurokod 2 – Projektowanie konstrukcji z betonu – Część 1-1: Reguły ogólne i reguły dla budynków
- [5] <http://elektroonline.pl/a/7710,Inteligentny-dom-i-mieszkanie,Elektrotechnika>.
- [6] <https://fachowiec.ihz.pl/slupy-zelbetowe-z-porotherm-25-k-pw/>
- [7] TAFLOVE A., HAGNESS S.C.: *Computational Electrodynamics: The finite – difference time – domain method*. Boston, Artech House, 2005.
- [8] SADIKU M.N.O.: *Numerical techniques in electromagnetics*. CRS Press LLC. 2nd edition, 2001.
- [9] ELSHERBENI A.Z., DEMIR V.: *The Finite-Difference Time-Domain Method for Electromagnetics with MATLAB Simulations*. SciTech Publishing, Inc, USA, 2009.

dr inż. Agnieszka Choroszucho, Jakub Tymiński, Damian Orzechowski, Alan Kondrusik, Szymon Piotr Duchnowski; Politechnika Białostocka, Wydział Elektryczny
e-mail:
a.choroszucho@pb.edu.pl,
jakubtyminskimail@gmail.com,
damian.orzechowsky@outlook.com,
kondrusik.alan@gmail.com,
szymonpiotrduchno@gmail.com