

Kazimierz JAKUBIUK\*  
Mikołaj NOWAK\*  
Daniel KOWALAK\*  
Mirosław WOŁOZYN\*

## ANALIZA WŁAŚCIWOŚCI EMITERÓW LCR

Od wielu lat pojawiają się publikacje dotyczące konstrukcji emiterów służących do wypromieniowania energii pola elektromagnetycznego z układów, w których są wytwarzane impulsy prądowe o krótkim czasie trwania (rzędu ns lub  $\mu$ s) i znaczącej wartości szczytowej (rzędu MA) [3]. Tego rodzaju emitery nazywane są w języku angielskim *Large Current Radiators* (LCR) [3, 4, 5]. Budowa emitera LCR powinna zapewniać możliwie niewielką indukcyjność (rzędu  $\mu$ H) i możliwie dużą efektywność wypromieniowania energii pola elektromagnetycznego wytworzonego w impulsowym generatorze prądu, np. w generatorze magetokumulacyjnym [1]. Celem niniejszej pracy jest przedstawienie metody analizy numerycznej właściwości wybranych układów emiterów LCR w oparciu o oprogramowanie EMCOS Antenna VLab v1.0.1 SV [8] oraz wyników symulacji komputerowej wybranych ich typów. Wyniki symulacji zostały porównane z wynikami pomiarów. Uzyskano ich zadawalającą zgodność.

SŁOWA KLUCZOWE: emitery polowe, anteny, LCR, pole bliskie, metoda momentów

### 1. MODEL MATEMATYCZNY

#### 1.1. Metoda momentów

W ogólnym przypadku, w liniowym, jednorodnym i bezstratnym środowisku pole elektryczne i magnetyczne może zostać wyrażone w zależności od źródeł (gęstości prądu i ładunku) poprzez potencjały Lorentza  $\mathbf{A}$  i  $V$  wyrażone zależnościami [6]:

$$\mathbf{A}(\mathbf{r}) = \mu \int_{v'} \mathbf{j}(\mathbf{r}') g(\mathbf{r}, \mathbf{r}') dv' \quad (1.1)$$

$$V(\mathbf{r}) = \frac{1}{\varepsilon} \int_{v'} \rho(\mathbf{r}') g(\mathbf{r}, \mathbf{r}') dv'$$

---

\* Politechnika Gdańska.

gdzie:  $\mathbf{j}(\mathbf{r})$  – wektor gęstości prądu,  $\rho(\mathbf{r})$  – gęstość ładunku elektrycznego,  $\mathbf{r}$  – wektor określający punkt M, w którym określa się wartość pola,  $\mathbf{r}'$  – wektor określający położenie źródła pola w przestrzeni,  $v'$  – objętość źródła pola,  $g(\mathbf{r}, \mathbf{r}')$  – funkcja Greena określona jak następuje:

$$g(\mathbf{r}, \mathbf{r}') = \frac{e^{-jk|\mathbf{r}-\mathbf{r}'|}}{4\pi|\mathbf{r}-\mathbf{r}'|} \quad (1.2)$$

gdzie:  $k = \omega\sqrt{\mu\varepsilon}$  – współczynnik fazowy.

W przypadku rozważań statycznych lub wysokoczęstotliwościowych funkcja Greena może być odpowiednio uproszczona. Straty w modelu można uwzględnić przyjmując zespoloną wartość współczynnika przenikalności dielektrycznej.

Rozwiązania odpowiednich równań całkowych można dokonać za pomocą metody momentów (MoM) [6, 7], która w odróżnieniu od metod różnicowych pozwala przeprowadzić obliczenia z wykorzystaniem prądów i ładunków źródłowych zamiast potencjału wektorowego i skalarne. Ogólna postać metod całkowych może zostać przedstawiona w postaci:

$$L(f) = g \quad (1.3)$$

gdzie:  $L$  – operator całkowy,  $f$  – określa wartości gęstości prądów i ładunków przestrzennych,  $g$  – zadana wielkość modelującą wymuszenie.

W MoM nieznaną wielkość  $f$  podlega rozwinięciu do postaci (1.4) w odniesieniu do zbioru liniowych, niezależnych funkcji bazowych  $f_n$ :

$$f \approx \sum_{n=1}^N \alpha_n f_n \quad (1.4)$$

gdzie:  $\alpha_n$  – współczynniki wyznaczone w trakcie obliczeń.

Po podstawieniu równania (1.4) do (1.3) i uwzględniając liniowość operatora  $L$  uzyskuje się zależność:

$$\sum_{n=1}^N \alpha_n L(f_n) \approx g \quad (1.5)$$

Mnożąc obie strony równania (1.5) przez znaną, odpowiednio dobraną funkcję wagową  $w_m$  oraz całkując je po przestrzeni otrzymuje się równanie zawierające iloczyn skalarny:

$$\sum_{n=1}^N \alpha_n \langle w_m, L(f_n) \rangle = \langle w_m, g \rangle \quad m = 1, \dots, N \quad (1.6)$$

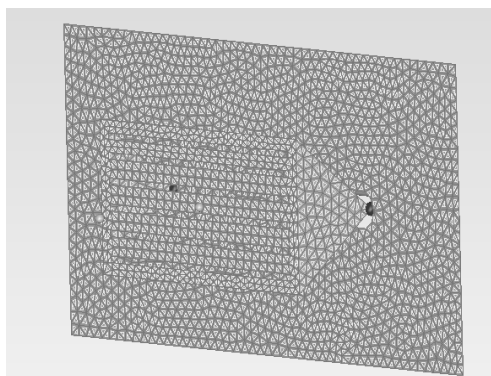
Iloczyny skalarne są liczbami skończonymi, posiadającymi reprezentację numeryczną. Równania (1.6) stanowią układ  $N$  liniowych równań z  $N$  niewiadomymi, które są rozwiązywane numerycznie.



## 1.2. Modele numeryczne emiterów LCR

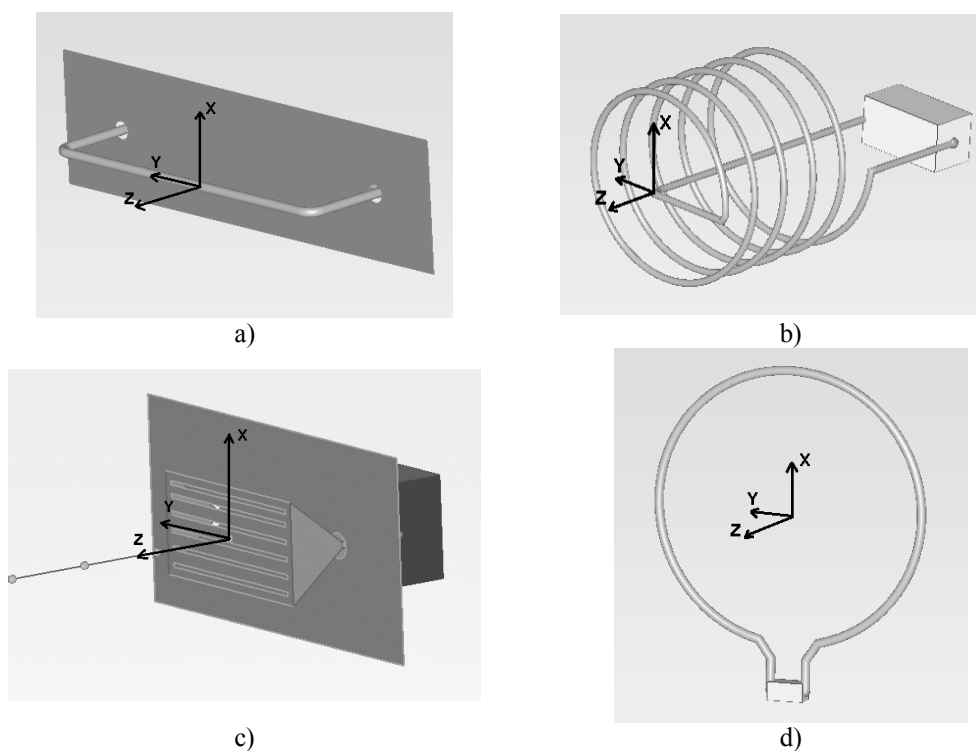
Do wykonania obliczeń symulacyjnych emiterów LCR wybrano oprogramowanie EMCOS Antenna VLab v1.0.1 SV [8]. Oprogramowanie to bazuje na rdzeniu TriD, który do obliczeń polowych wykorzystuje całkową metodę momentów w dziedzinie częstotliwości. Możliwa jest również analiza w dziedzinie czasu stanów przejściowych przy wykorzystaniu wieloczęstotliwościowego rozwinięcia wymuszenia źródłowego (bazującego na FFT) oraz próbkowania adaptacyjnego AFS [2].

Środowisko EMCOS Antenna VLab oferuje możliwość implementacji lub tworzenia od podstaw modelu geometrycznego, modeli wymuszeń źródłowych, elementów obwodów elektrycznych w postaci czwórników, a także źródeł pól bliskich i dalekich. Program pozwala na pełną kontrolę nad krokiem czasowym całkowania. Możliwa jest również implementacja własnych modeli zawierająca dyskretyzację w metodzie elementów skończonych, bądź całkowity nadzór nad procesem automatycznej generacji siatki. Przykładowy model z uwidocznioną dyskretyzacją emitera LCR przedstawiono na rys.1.



Rys. 1. Model dyskretny emitera LCR EMCOS Antenna o wymiarach płyty głównej  $240 \times 120$  mm o maksymalnym wymiarze elementu siatki równym 1 cm

W artykule przeprowadzono badania symulacyjne oraz eksperymentalne rozkładu indukcji pola magnetycznego w funkcji odległości od czterech wybranych prototypów emiterów LCR: prętowego z ekranem ferromagnetycznym (rys. 2a), spiralnego (rys. 2b), płytowego z ekranem ferromagnetycznym (rys. 2c) oraz kołowego (rys. 2d). W każdym z czterech przypadków badania przeprowadzono poprzez rejestrację składowej dominującej indukcji pola magnetycznego. W przypadku emiterów LCR spiralnego oraz kołowego – składowej równoległej do osi emitera, natomiast w przypadku emiterów płytowego oraz prętowego – składowej prostopadłej do ramienia emitera.



Rys. 2. Modele symulacyjne emiterów LCR: a) prętowego z reflektorem ferromagnetycznym, b) spiralnego, c) płytowego z reflektorem ferromagnetycznym, d) kołowego

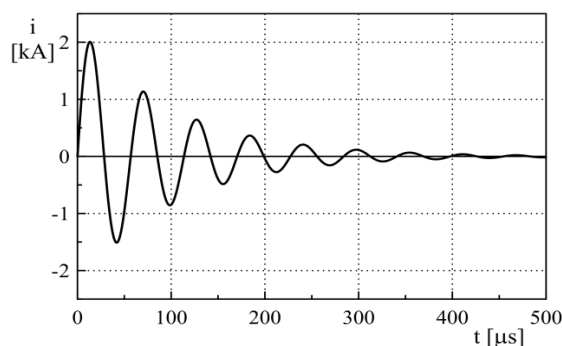
## 2. WYNIKI BADAŃ SYMULACYJNYCH

Jako wymuszenie w symulacji przyjęto impuls oscylacyjny tłumiony prądu emitera przedstawiony na rys. 3 o wartości maksymalnej oraz częstotliwości uzależnionej od wymuszeń prądowych przyjętych w badaniach eksperymentalnych. W tabeli 2.1 zamieszczono wartości maksymalne prądów i częstotliwości dla różnych typów emiterów.

Tabela 2.1. Zastosowane wartości maksymalne prądów oraz częstotliwości oscylacji wymuszenia dla poszczególnych emiterów LCR

Rodzaj emitera LCR	$I_{\max}$	f
	kA	kHz
Prętowy	12	8,2
Spiralny	10	6,5
Płytowy	2	3,2
Kołowy	2	3,2





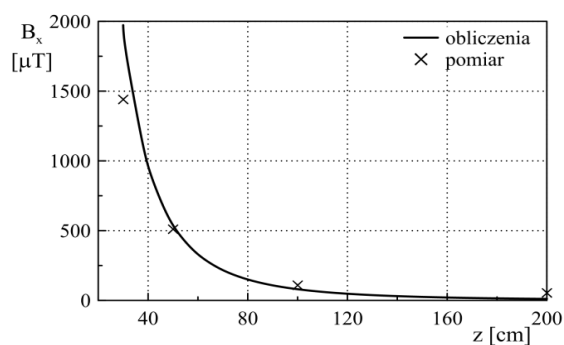
Rys. 3. Przykładowy przebieg wzorcowego impulsu prądowego zaimplementowanego w środowisku symulacyjnym

Wyniki analizy symulacyjnej rozkładu wartości maksymalnej indukcji pola magnetycznego w funkcji odległości od emiterów wraz z naniesionymi punktami pomiarowymi zamieszczono w postaci wykresów (rys. 4–7).

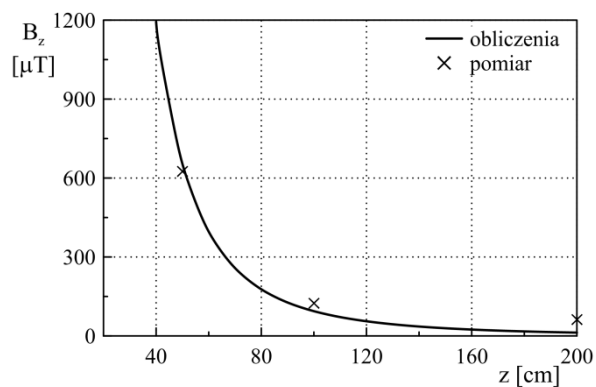
Dokonano również obliczeń symulacyjnych wartości składowych natężenia pola elektrycznego  $E$  oraz magnetycznego  $H$  w funkcji odległości od jednego, reprezentatywnego emitera LCR – emitera płytowego. Na podstawie wyników analizy dla dwóch różnych czasów narastania pierwszej półfali prądu o wartości szczytowej 100 kA (rys. 2): 1  $\mu$ s oraz 10 ns wyznaczono moduł wektora gęstości mocy  $S$  według zależności:

$$S \left[ \frac{kW}{cm^2} \right] = |(\mathbf{E} \times \mathbf{H})| \cdot 10^{-7} = 10^{-7} \text{ abs} \left( \det \begin{pmatrix} \hat{x} & \hat{y} & \hat{z} \\ E_x & E_y & E_z \\ H_x & H_y & H_z \end{pmatrix} \right) \quad (2.1)$$

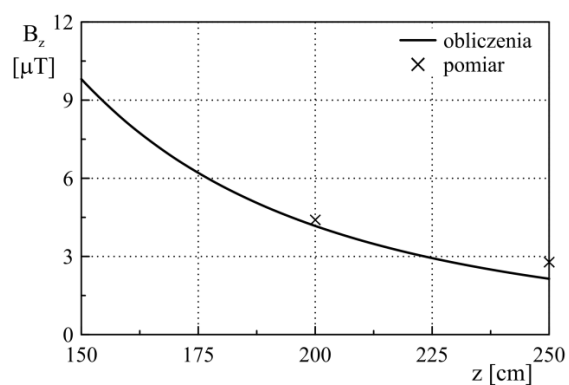
Wyniki obliczeń w funkcji odległości od emitera LCR zamieszczono w postaci wykresu na rys. 9.



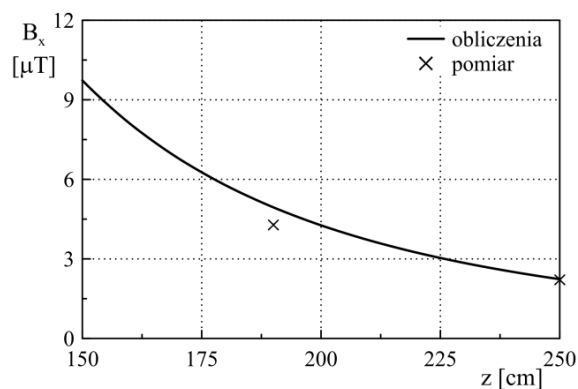
Rys. 4. Charakterystyka wartości maksymalnej składowej indukcji pola magnetycznego  $B_x$  w funkcji odległości od emitera LCR płytowego z naniesionymi punktami pomiarowymi



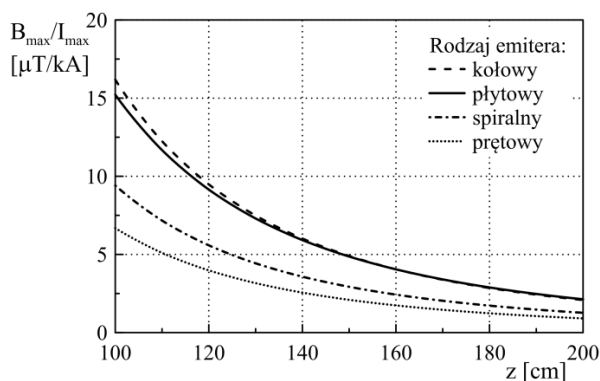
Rys. 5. Charakterystyka wartości maksymalnej składowej indukcji pola magnetycznego  $B_z$  w funkcji odległości od emitera spiralnego z naniesionymi punktami pomiarowymi



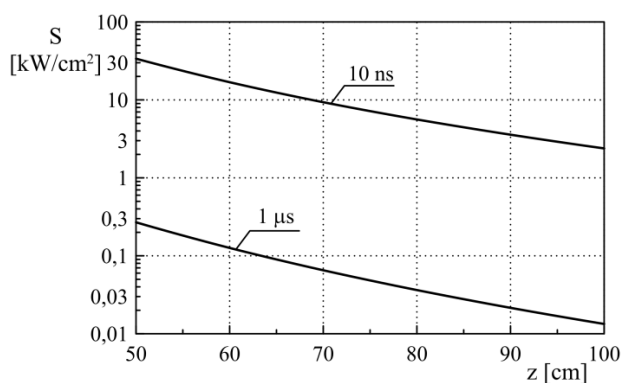
Rys. 6. Charakterystyka wartości maksymalnej składowej indukcji pola magnetycznego  $B_z$  w funkcji odległości od emitera kołowego z naniesionymi punktami pomiarowymi



Rys. 7. Charakterystyka wartości maksymalnej składowej indukcji pola magnetycznego  $B_x$  w funkcji odległości od emitera płytowego z naniesionymi punktami pomiarowymi



Rys. 8. Porównanie charakterystyk względnych wartości maksymalnej indukcji pola magnetycznego  $B_{max}/I_{max}$  w funkcji odległości od emiterów LCR



Rys. 9. Porównanie rozkładów gęstości mocy wypromieniowanej  $S$  w funkcji odległości od emitera płytowego LCR dla różnych czasów narastania pierwszej półfali prądu

### 3. WNIOSKI

Wykonane badania symulacyjne potwierdzone przez wyniki pomiarów eksperymentalnych umożliwiły oszacowanie efektywności emisji pola magnetycznego dla każdego z rozważanych emiterów. Najkorzystniejsze pod względem dalekosiężności emisji okazały się emiter kołowy oraz płytowy z reflektorem ferromagnetycznym. Rozkład pola emitera spiralnego, pomimo znaczącej wartości indukcji pola magnetycznego w pobliżu źródła, szybko zanika wraz ze wzrostem odległości. Zmiana (o dwa rzędy wielkości) czasu narastania prądu wymuszenia emitera płytowego wywołała znaczący wzrost (ponad stukrotny) wartości modułu gęstości mocy  $S$  (rys. 9). Istnieje możliwość poprawy rozkładu pola emiterów oraz jego ukierunkowania za pomocą reflektorów ferromagnetycznych w postaci płyt lub rogów kierunkowych (ang. *horn antenna*).



## LITERATURA

- [1] Altgilbers L. L., et. al.: Magnetocumulative Generators. Springer Verlag. New York, 2000.
- [2] Frei S. R. et. al.: Complex Approaches for the Calculation of EMC Problems of Large Systems. IEEE EMC Symp., 2004.
- [3] Harmuth H. F., Mohamed N. J.: Large current radiators. *Inst. Elec.Eng. pt. H*, vol. 139, no. 4, pp. 358–362, 1992.
- [4] Lukin K. A., et. al.: Large-Current Radiator with Avalanche Transistor Switch. IEEE Trans. on Electromag. Compat., vol. 39, no. 2, may 1997.
- [5] Mohaned N., J.: Magnetic Lines of Force of a Large-Current Radiator. IEEE Trans. on Electromag. Compat., vol. EMC-29, no. 3, August 1987.
- [6] Sarkar T. K. et. al.: Method of Moments Applied to Antennas, Belgrad, 2000.
- [7] W.C. Gibson: The Method of Moments in Electromagnetics, Chapman & Hall/CRC, Boca Raton, 2008.
- [8] [www.emcos.com](http://www.emcos.com)

## ANALYSIS OF THE LCR EMITERS PROPERTIES

Construction of emitters radiating the energy of the electromagnetic field from the systems that generate short duration current impulses (in the order of ns or  $\mu$ s) and large peak value (in the order of MA) has been subject of scientific papers for many years. Emitters of such kind are called Large Current Radiators (LCR). The structure of LCR emitter should provide feasibly low inductance (in the order of  $\mu$ H) and high radiation efficiency of the energy of the electromagnetic field generated in impulse current generators such as a magneto-cumulative generator. The purpose of this paper is to present the method of numerical analysis of the properties of chosen LCR. The results of the simulation has been compared to the measurements. The correspondence of the results of simulation with experimental data is sufficient.

(Received: 28. 02. 2017, revised: 03. 03. 2017)

