

Mikołaj NOWAK\*, Kazimierz JAKUBIUK\*, Daniel KOWALAK\*  
Miroslaw WOŁOSZYN\*

## ANALIZA REZONANSOWEGO UKŁADU EMISJI IMPULSÓW POLA ELEKTROMAGNETYCZNEGO

W literaturze przedmiotu są opisane właściwości emiterów impulsów pola elektromagnetycznego w postaci układów bazujących na antenach wysokonapięciowych HVR (ang. High Voltage Radiator) [2, 5]. W celu podniesienia skuteczności emisji poprzez wydłużenie czasu trwania impulsu oraz zwiększenie jego amplitudy możliwe jest zastosowanie systemów rezonansowych dostrojonych do parametrów sygnału kształtowanego w układzie formowania impulsu wysokiego napięcia [2, 3]. W pracy dokonano syntezy modelu symulacyjnego systemu emisji impulsów pola elektromagnetycznego dużej mocy oraz zweryfikowano jego skuteczność w ramach badań eksperymentalnych przeprowadzonych na układzie fizycznym.

SŁOWA KLUCZOWE: antena HVR, antena impulsowa, rezonansowy układ emisyjny, formowanie i emisja impulsów wielkiej mocy, symulacja polowo-obwodowa.

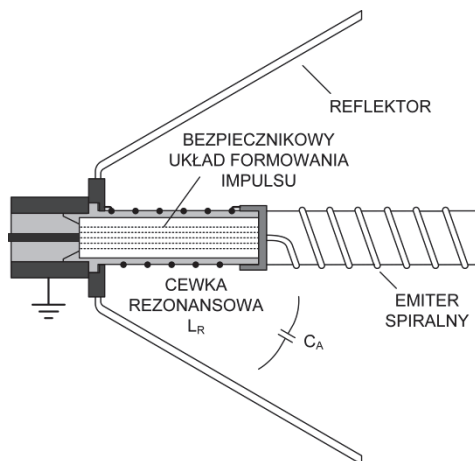
### 1. WPROWADZENIE

Istotnym elementem układów generacji i emisji impulsów pola elektromagnetycznego jest antena o określonych właściwościach [4], zasilana ze źródła impulsów dużej mocy. Klasyczne podejście do tego typu systemów zakłada konstrukcję anten szerokopasmowych (UWB) o niewielkiej dobroci  $Q$  w celu wypromieniowania impulsu o szerokim widmie częstotliwościowym gęstości mocy, bez zniekształcania jego kształtu [4]. W związku z obniżoną dobrocią i szerokim pasmem promieniowania anteny te posiadają niższe wzmocnienie oraz gorsze właściwości kierunkowe w porównaniu do konstrukcji wąskopasmowych. W przypadku, gdy zadaniem układu emisyjnego jest skuteczna transmisja energii impulsu bez konieczności zachowania jego kształtu, możliwe jest zastosowanie systemów rezonansowych, w których jeden z elementów układu drgającego  $LC$  stanowi pojemność lub indukcyjność anteny. Poprzez zwiększenie wartości dobroci  $Q$  układu oraz wydłużenie czasu trwania sygnału wypromieniowanego, możliwe jest osiągnięcie wyższej efektywności promieniowania. W pracy przedstawiono koncepcję niskoczęstotliwościowego (pojedyncze MHz)

---

\* Politechnika Gdańska

systemu impulsowego, bazującego na konstrukcji wysokonapięciowej anteny spiralnej z reflektorem składanym, której pojemność  $C_A$  wraz z zewnętrzną cewką indukcyjną  $L_R$  stanowi układ rezonansowy. Konstrukcję układu przedstawiono w sposób uproszczony na rys.1.

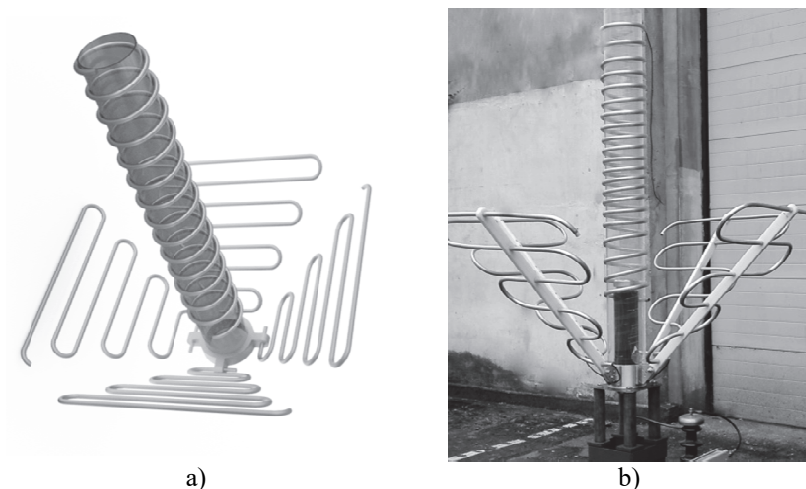


Rys. 1. Szkic rezonansowego układu emisji impulsów pola elektromagnetycznego dużej mocy z pojemnością anteny  $C_A$  oraz indukcyjnością  $L_R$  zewnętrznej cewki rezonansowej

W związku z koniecznością dostrojenia gałęzi rezonansowej układu (indukcyjności dodatkowej  $L_R$ ) do częstotliwości własnej promieniowania anteny, a także potrzebą monitorowania wpływu impedancji anteny na proces formowania impulsu wysokiego napięcia przez bezpiecznik, wskazane jest skonstruowanie modelu obwodowego, modelującego wzajemne oddziaływanie anteny na układ formujący, a także oddziaływanie polowe anteny na otoczenie.

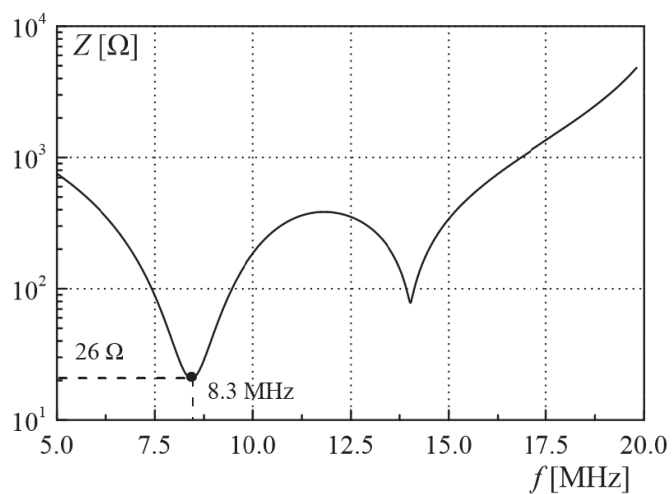
## 2. MODEL UKŁADU EMISYJNEGO

Odpowiedni dobór elementów bazowych modelu anteny w dziedzinie czasu, w związku z wpływem częstotliwości pracy anteny, zrealizować można przy pomocy naturalnego podziału na strefy sprzężenia polowego anteny – strefę reakcyjną (bliską) oraz radiacyjną (promieniowania). Przy założeniu, że dla rozważanego przedziału niskich częstotliwości możliwe jest pominięcie zjawisk związanych z odbiciem fali w polu dalekim, a co za tym idzie wpływ środowiska promieniowania na przebiegi prądów i napięć w antenie jest znikomy, możliwe jest wyodrębnienie parametrów obwodowych modelu wprost z obliczonego rozkładu pola anteny w strefie reakcyjnej. Model geometryczny anteny, wykorzystany do celów obliczeń polowych w środowisku CST Studio [7] wraz z rzeczywistym modelem fizycznym anteny przedstawiono na rys. 2.



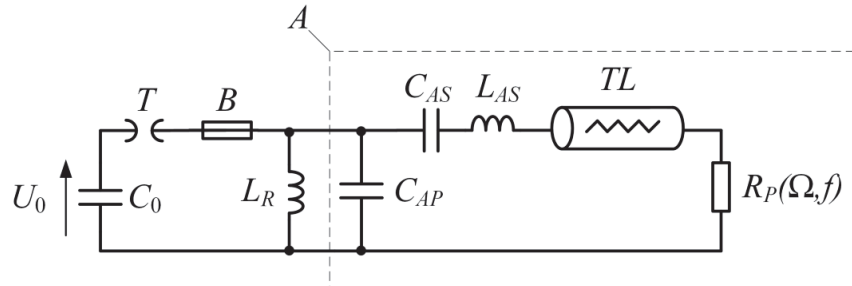
Rys. 2. Układy emisji impulsów pola elektromagnetycznego dużej mocy:  
a) model geometryczny, b) fotografia modelu fizycznego

Otrzymaną w procesie symulacji polowej charakterystykę częstotliwościową impedancji anteny przedstawiono na rys. 3.



Rys. 3. Obliczona charakterystyka częstotliwościowa impedancji anteny

Na podstawie charakterystyki częstotliwościowej impedancji układu wyznaczono wartości parametrów skupionych modelu obwodowego członu reakcyjnego anteny bazując na zmodyfikowanym modelu anteny spiralnej [4] w układzie formowania i emisji impulsu pola elektromagnetycznego (rys. 4).



Rys. 4. Model obwodowy układu emisji impulsów pola elektromagnetycznego  
 $C_0$  – pojemność baterii kondensatorów wysokonapięciowych,  $T$  – trigatron,  $B$  – bezpiecznik topikowy,  $L_R$  – zewnętrzna cewka rezonansowa układu,  $A$  – model skupiony anteny impulsowej,  $C_{AP}$  – skupiona pojemność własna oraz doziemna anteny,  $C_{AS}$  – skupiona pojemność szeregową anteny,  $L_{AS}$  – skupiona indukcyjność szeregową anteny,  $TL$  – model parametryczny stratnej linii długiej,  $R_p(\Omega, f)$  – rezystancja promieniowania układu zależna od środowiska promieniowania  $\Omega$

Oddziaływanie anteny w polu radiacyjnym zamodelowano przy pomocy modelu stratnej linii długiej o impedancji równej impedancji falowej przestrzeni promieniowania  $Z_f = 377 \Omega$  oraz współczynnika tłumienia  $\delta$  opisanym zmodyfikowaną zależnością wynikającą z równania Friisa:

$$\delta = k \left( \frac{di_L}{dt} \right) \cdot \frac{i_L \sqrt{G_A(\alpha)}}{2\sqrt{\pi} \cdot x} \quad (1)$$

gdzie:

$k \left( \frac{di_L}{dt} \right)$  – współczynnik zależny od prędkości zmian prądu wejściowego linii,

$i_L$  – prąd wpływający do linii,

$G_A(\alpha)$  – współczynnik wzmocnienia kierunkowego anteny wyznaczony na podstawie symulacji polowej,

$x$  – efektywna odległość punktu pomiarowego od anteny.

Parametr rezystancji promieniowania  $R_p$  anteny, opisujący ilość wypromieniowanej energii, wyznaczono w oparciu o symulacje polowe anteny i opisano przy pomocy zmodyfikowanego modelu nieliniowego dla danego środowiska promieniowania [1]:

$$R_p = p \cdot \frac{A_{eff} \cdot \bar{f}^2}{4\pi^2 c^2} \quad (2)$$

gdzie:

$p$  – współczynnik wynikający z rodzaju środowiska promieniowania anteny (przyjęto wartość  $5 \cdot 10^5$ ),

$A_{eff}$  – efektywna powierzchnia czynna anteny,

$\bar{f}^2$  – wartość średnia częstotliwości impulsu na wyjściu z linii stratnej wyznaczona w procesie iteracyjnym,

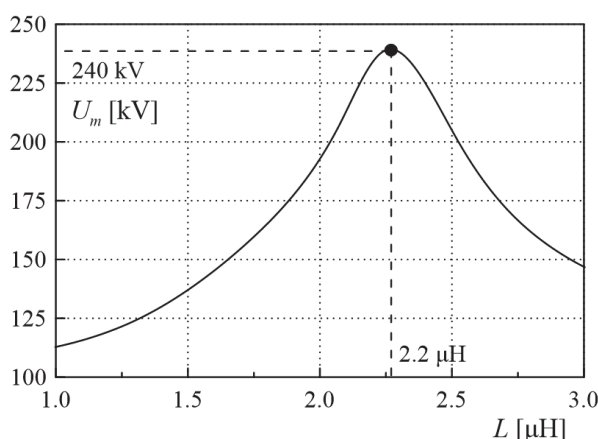
$c$  – prędkość światła w próżni.

Obliczone wartości parametrów modelu anteny zamieszczono w tabeli 1. Tablica 1. Parametry reakcyjne anteny wyznaczone metodą symulacji polowej.

$C_{AP}$	$C_{AS}$	$L_{AS}$	$R_p(8,3 \text{ MHz})$
160 pF	110 pF	1,6 $\mu\text{H}$	43 $\Omega$

W związku z faktem, że oparty na bezpieczniku układ formowania impulsu wysokiego napięcia stanowi źródło o ograniczonej mocy oraz że pojemność doziemna anteny stanowi dodatkowe obciążenie dla układu, w celu optymalizacji ilości wypromieniowanej energii konieczny jest odpowiedni dobór indukcyjności  $L_R$  zewnętrznej cewki rezonansowej. W przypadku uzyskania rezonansowego punktu pracy równoległego układu  $L_R C_{AP}$ , pobudzonego przez impuls napięcio-

wy  $\frac{du_B}{dt}$  generowany przez bezpiecznik, gałąź równoległa (rys. 2) przestaje stanowić obciążenie dla układu formowania impulsu. Na rysunku 5 przedstawiono charakterystykę wartości szczytowej napięcia generowanego przez układ formowania impulsu w funkcji wartości indukcyjności  $L_R$  cewki rezonansowej. Dobrano indukcyjność o wartości 2,2  $\mu\text{H}$ .

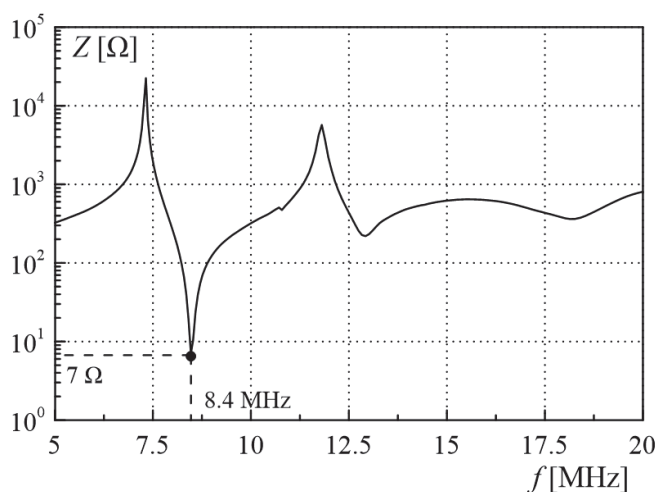


Rys. 5. Zależność wartości szczytowej napięcia generowanego przez układ formowania i emisji impulsów pola elektromagnetycznego od indukcyjności  $L_R$  cewki rezonansowej

### 3. WERYFIKACJA EKSPERYMENTANA MODELU

Na rys. 6 przedstawiono zmierzone charakterystyki częstotliwościowe impedancji rezonansowego układu emisji impulsów pola elektromagnetycznego

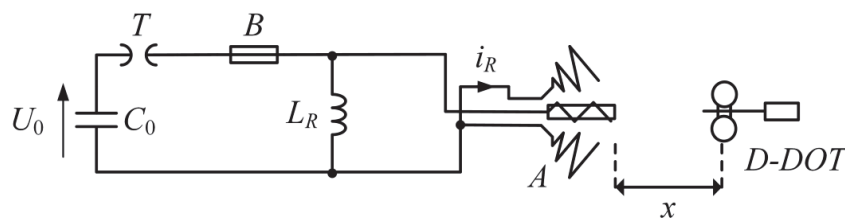
w układzie rzeczywistym (rys. 2a), składającym się z anteny spiralnej oraz cewki rezonansowej o dobranej indukcyjności. W związku z zastosowaniem kompensacji rezonansowej pojemności doziemnej  $C_{AP}$  przy pomocy indukcyjności  $L_R$  dla częstotliwości pokrywającej się z częstotliwością emisji anteny uzyskano maksymalną możliwą efektywność emisji. W punkcie rezonansowym o wartości impedancji całego systemu stanowi jedynie impedancja promieniowania anteny.



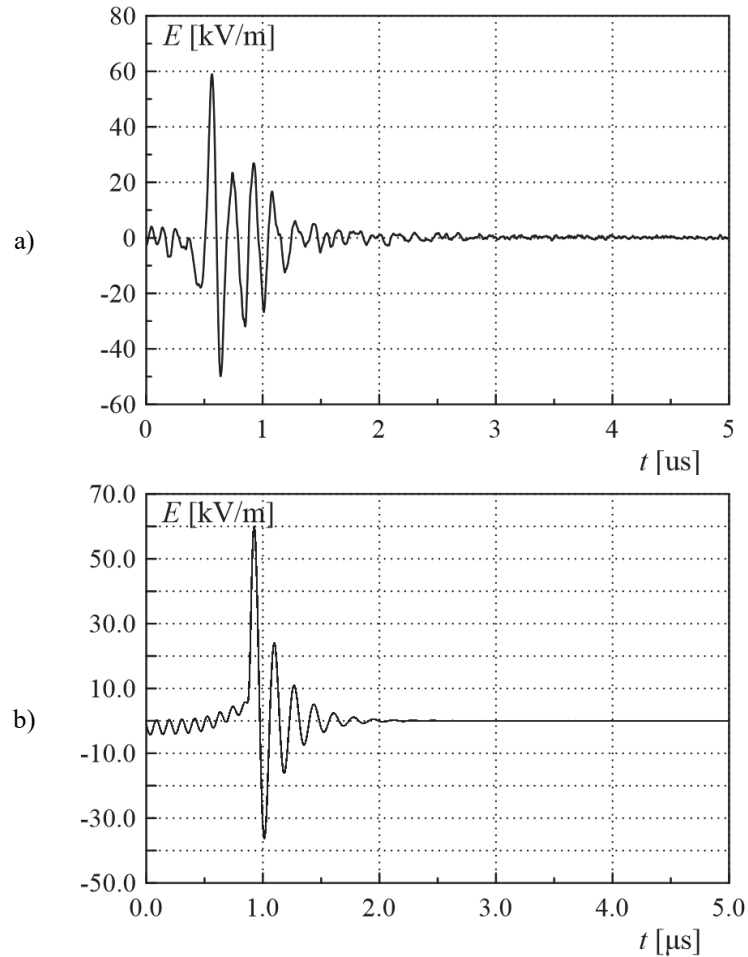
Rys. 6. Zmierzona charakterystyka częstotliwościowa impedancji rezonansowego układu emisji impulsów pola elektromagnetycznego w układzie rzeczywistym

W układzie probierczym, którego schemat ideowy przedstawiono na rysunku 7 wykonano serię prób mających na celu weryfikację zastosowanego modelu. Rejestracji wartości dominującej natężenia pola  $E$  dokonywano w przedziale odległości od anteny  $x \in <1\text{ m}; 6\text{ m}>$  za pomocą impulsowych sond pola elektrycznego D-DOT.

Wyniki badań eksperymentalnych w postaci przebiegów składowej dominującej natężenia pola elektrycznego  $E(t)$  w odległości 4 m od anteny oraz prądu dostarczonego do anteny  $i_R(t)$  zestawione z wynikami uzyskanymi w drodze symulacji zaproponowanego modelu przedstawiono odpowiednio na rysunku 8 i 9.

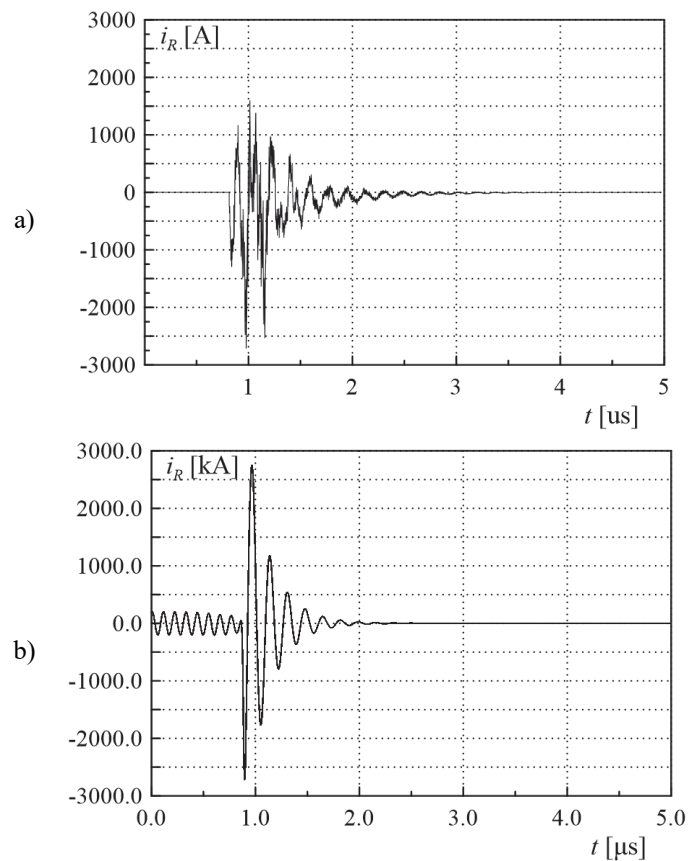
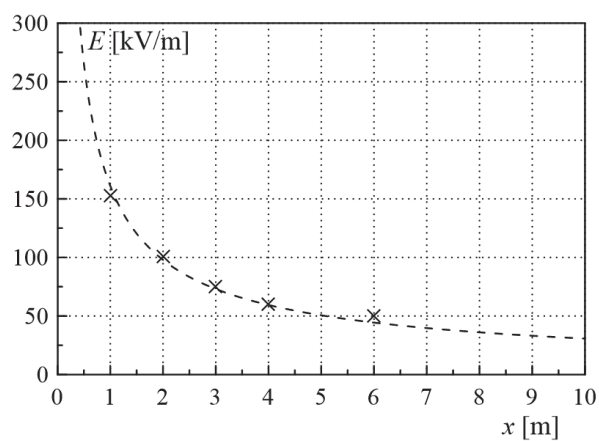


Rys. 7. Schemat ideowy stanowiska probierczego do pomiaru składowej elektrycznej  $E$  pola emitowanego przez rezonansowy układ emisji impulsów pola elektromagnetycznego



Rys. 8. Przebieg składowej dominującej natężenia pola elektrycznego  $E$  w odległości  $x = 4$  m od anteny: a) wynik eksperymentu, b) wynik symulacji

Na podstawie symulacji opracowanego modelu anteny wyznaczono również charakterystykę zmian wartości szczytowej składowej dominującej natężenia pola elektrycznego  $E$  w funkcji odległości  $x$  od anteny (rys. 10). Na wykres naniesiono również wartości zarejestrowane w trakcie badań doświadczalnych.

Rys. 9. Przebieg prądu  $i_R$  anteny: a) wynik eksperymentu, b) wynik symulacjiRys. 10. Charakterystyka wartości szczytowej natężenia pola  $E$  w funkcji odległości od anteny w osi anteny z naniesionymi punktami pomiarowymi



#### 4. WNIOSKI

Z przeprowadzonych badań symulacyjnych oraz eksperymentalnych wynikają następujące wnioski:

- opracowany model symulacyjny układu rezonansowego emisji impulsów pola elektromagnetycznego z dużą zgodnością opisuje współpracę układu antenowego z pozostałymi elementami systemu formowania i emisji impulsów, a także oddziaływanie anteny na środowisko promieniowania,
- istotnym elementem układu jest zewnętrzna cewka rezonansowa, stanowiąca element kompensacyjny dla pojemności doziemnej anteny, umożliwiającą osiągnięcie dużej sprawności emisji impulsów pola elektromagnetycznego,
- zastosowanie podziału modelu nieliniowego anteny spiralnej na bloki funkcyjne przybliżające poszczególne strefy oddziaływania polowego (reakcyjną oraz radiacyjną) daje możliwość niezależnej analizy układu w dziedzinie czasu i częstotliwości,
- dzięki dużej sprawności układu, przy stosunkowo niskiej częstotliwości pracy, możliwe jest jego zastosowanie w zakresie symulacji procesów emisji impulsów pola elektromagnetycznego ze źródeł naturalnych, np. wyładowań atmosferycznych.

*Badania wykonano w ramach projektu finansowanego przez Narodowe Centrum Badań i Rozwoju – nr umowy **DOB-1-1/PS/2014**.*

#### LITERATURA

- [1] Balanis C. A., Antenna theory: analysis and design, John Wiley & Sons, Inc., 1997.
- [2] Jakubiuk K., Kowalak D., Nowak M., The forming and emission of high power electromagnetic pulses, ITM Web of Conference, Volume 19, 2018 Computer Applications in Electrical Engineering (ZKwE'2018).
- [3] Kowalak D., Jakubiuk K., Nowak M., Zastosowanie wyłącznika bezpiecznikowego do formowania impulsu wielkiej mocy, Poznań University of Technology Academic Journal, Electrical Engineering 93, 2018.
- [4] Liao Y., Ying X., Shi G., Wang Y., Time Domain Response Analysis with Equivalent Circuit Models for Dipole Antennas under EMP, 2015 IEEE 6th International Symposium on Microwave, Antenna, Propagation, and EMC Technologies, 2016.
- [5] Nowak M., Jakubiuk K., Kowalak D., Analiza właściwości emiterów impulsowych pola elektromagnetycznego, Poznań University of Technology Academic Journals, Electrical Engineering 93, 2018.
- [6] Salehi M., Manteghi M., Transient characteristics of small antennas, IEEE Transactions on Antennas and Propagation, Vol. 62, No. 5, 2014.
- [7] [www.cst.com](http://www.cst.com).

**THE ANALYSIS OF RESONANCE-BASED HIGH POWER  
ELECTROMAGNETIC PULSES EMISSION SYSTEM**

In the literature, the emission properties of the electromagnetic field pulse systems based on high voltage antennas (HVR) have been widely described. In order to increase the emission efficiency by extending duration and increasing amplitude of the impulse it is possible to use a resonance system tuned to the parameters of the signal shaped in the pulse forming circuit. The synthesis of a time-domain simulation model of a complex high-power electromagnetic pulses emission system and its verification by experimental research has been presented in this paper.

*(Received: 28.02.2019, revised: 06.03.2019)*