

## Oddziaływanie pola magnetycznego o dużej energii na urządzenia i systemy infrastruktury krytycznej

**Streszczenie.** W artykule przedstawiono możliwości generacji wysokoenergetycznych pól magnetycznych, ze szczególnym uwzględnieniem generatorów energoelektronicznych oraz magneto-kumulacyjnych. Omówiono oddziaływanie pola magnetycznego na urządzenia i systemy infrastruktury krytycznej. Zaprezentowano badania symulacyjne oddziaływania pól magnetycznych na podatne elementy urządzeń infrastruktury krytycznej. Wykonano weryfikację laboratoryjną dla wybranych urządzeń elektroenergetycznych. Przedstawiono stanowisko badawcze do badania odporności urządzeń na wysokoenergetyczne pole magnetyczne.

**Abstract.** The paper presents the possibility of generation of high-energy magnetic fields, with particular emphasis on generators, power electronics and magneto-cumulative. Discusses the influence of magnetic field on the devices and systems for critical infrastructure. Presented simulation study magnetic fields on vulnerable elements of critical infrastructure installations. Laboratory verification was performed for selected devices power. Presented test stand for testing devices at high-energy magnetic field. (**High energy magnetic field influence with devices and systems for critical infrastructure**).

**Słowa kluczowe:** pole magnetyczne, generator magnetokumulacyjny, zaburzenie, infrastruktura krytyczna.

**Keywords:** magnetic fields, magneto-cumulative generators, disturbance, critical infrastructure.

### Wstęp

W dzisiejszych czasach występuje duże zagrożenie związane z atakiem terrorystów. Atak taki można przeprowadzić za pomocą metod konwencjonalnych takich jak ładunki wybuchowe czy atak hakerów na systemy informatyczne lub za pomocą bardziej wyrafinowanych metod takich jak oddziaływanie poprzez wysoko energetyczny impuls elektromagnetyczny. Impuls tego typu oddziałuje na różnego rodzaju urządzenia elektroniczne, w tym na infrastrukturę krytyczną Państwa, dużych korporacji czy banków.

Generatory wykorzystujące impuls elektromagnetyczny do zakłócania lub niszczenia urządzeń mogą być różnego rodzaju. W zależności od charakteru generowanego pola możemy wyróżnić generatory:

- składowej magnetycznej pola elektromagnetycznego, np. generator magnetokumulacyjny połączony z cewką obciążenia;
- składowej elektrycznej pola elektromagnetycznego, np. generator magnetokumulacyjny połączony z urządzeniem generującym impulsy mikrofalowe (vircator).

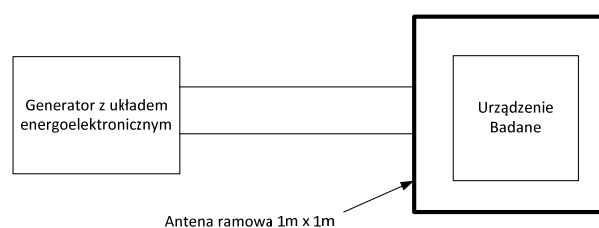
W niniejszym artykule opisano budowę generatora pola magnetycznego.

### Budowa generatorów silnych pól magnetycznych

Generatory pola magnetycznego ze względu na budowę można podzielić na:

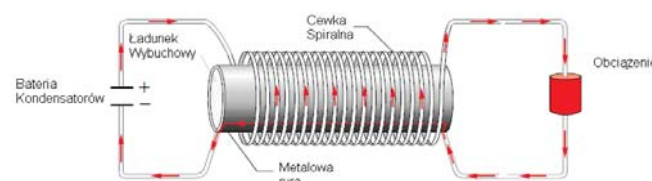
- generatory które są zbudowane z wykorzystaniem układów energoelektronicznych;
- generatory wykorzystujące zamianę energii wybuchu na energię elektryczną (magnetokumulacyjne).

Badania odporności urządzeń na impulsowe pole magnetyczne w zakresie EMC wykonuje się z wykorzystaniem generatorów z układami energoelektronicznymi na podstawie norm serii PN-EN 61000-X. Jedną z takich norm jest norma PN-EN 61000-4-9 [1]. Stanowisko pomiarowe do badania odporności urządzeń na pole magnetyczne według normy [1] przedstawiono na rysunku 1. Wartości indukcji magnetycznej stosowane w badaniach EMC określone w normie [1] są niskie w stosunku do wartości indukcji magnetycznej wytwarzanej przez generatory magnetokumulacyjne.



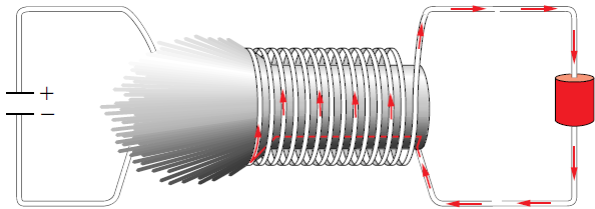
Rys.1. Schemat stanowiska pomiarowego do badania odporności urządzeń na pole magnetyczne

Zasada działania generatora magnetokumulacyjnego opiera się na zamianie energii ładunku wybuchowego w energię elektryczną, która polega na kompresji strumienia magnetycznego [2], [3]. Schemat generatora przedstawiono na rysunku 2.



Rys.2. Generator magnetokumulacyjny [4]

W pierwszej chwili od inicjacji procesu uruchamiania generatora następuje rozładowanie się baterii kondensatorów. Prąd rozładowania płynie przez cewkę spiralną do obciążenia. Cewka spiralna jest nawinięta na metalowej rurze. Metalowa rura wypełniona materiałem wybuchowym nie jest połączona z cewką spiralną. Podczas przepływu prądu przez cewkę spiralną wytwarza się pole magnetyczne w przestrzeni pomiędzy cewką spiralną a rurą. Gdy prąd rozładowania kondensatorów osiągnie wartość maksymalną następuje wybuch ładunku znajdującego się w metalowej rurze. Podczas wybuchu elementy rury zbliża się do spiralnej cewki, przestrzeń pomiędzy spiralną cewką a metalową rurą się zmniejsza i następuje kompresja strumienia. Schemat generatora podczas wybuchu przedstawiono na rysunku 3.

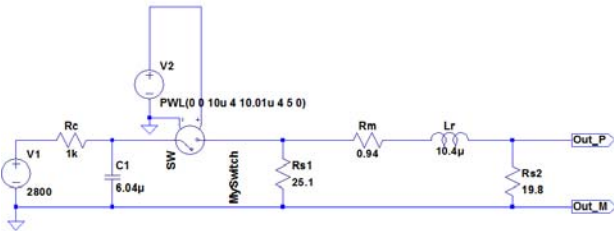


Rys.3. Generator magnetokumulacyjny podczas wybuchu ładunku [4]

### Modele generatorów do wytwarzania silnych pól magnetycznych

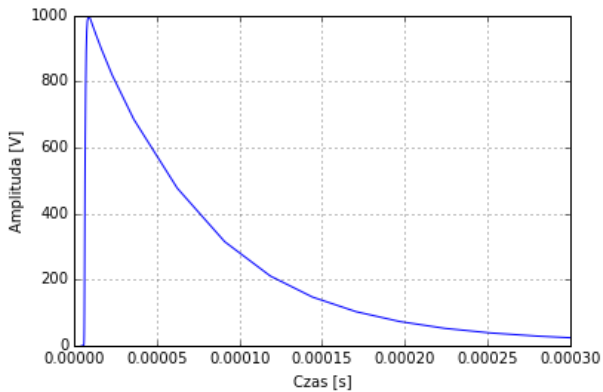
Schemat elektryczny modelu generatora typu SURGE, którego zasada działania została opisana w normie PN-EN 61000-4-5 [5], przedstawiono na rysunku 4. Tego rodzaju generator jest używany do badania oddziaływania impulsowego pola magnetycznego na urządzenia (norma [1]).

Modele generatorów energoelektronicznych zostały opracowane w programie LTSpice natomiast model generatora magnetokumulacyjnego opracowano przy użyciu języka Python.



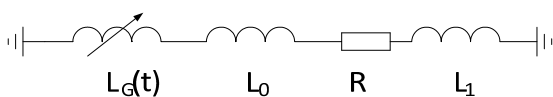
Rys.4. Schemat elektryczny modelu generatora typu SURGE

Przebieg napięcia na wyjściu generatora uzyskany w wyniku symulacji w programie LTSpice przedstawiono na rysunku 5.



Rys. 5. Przebieg napięcia wyjściowego generatora typu SURGE

Schemat zastępczy generatora magnetokumulacyjnego przedstawiono na rysunku 6 [2],[3]. Układ generatora składa się z cewki o zmiennej indukcyjności  $L_G(t)$  która odwzorowuje obwód kumulacyjny, rezystancji całego obwodu razem z obciążeniem  $R$ , cewki obciążenia  $L_1$  oraz indukcyjności doprowadzeń  $L_0$ .



Rys.6. Schemat zastępczy generatora magnetokumulacyjnego [3]

gdzie:  $L_G(t)$  – indukcyjność generatora magnetokumulacyjnego,  $L_0$  – indukcyjność doprowadzeń,  $R$  – rezystancja całego obwodu razem z obciążeniem,  $L_1$  – indukcyjność obciążenia zewnętrznego.

Na podstawie rysunku 6 z II prawa Kirchhoffa otrzymujemy równanie (1) z którego można określić prąd płynący w obwodzie przy założeniu prądu początkowego (2) [2],[3].

$$(1) \quad \frac{d}{dt} [(L_G(t) + L_0 + L_1)i] + iR = 0$$

$$(2) \quad I(0) = I_0$$

Rozwiązaniem równania (1) jest wyrażenie (3):

$$(3) \quad I(t) = I_0 \frac{L_T(0)}{L_T(t)} \exp \left[ - \int_0^t \frac{R}{L_T(y)} dy \right]$$

gdzie  $L_T$  wynosi:

$$(4) \quad L_T = L_G(t) + L_0 + L_1$$

Indukcyjność generatora magnetokumulacyjnego zmienia się zgodnie ze wzorem (5):

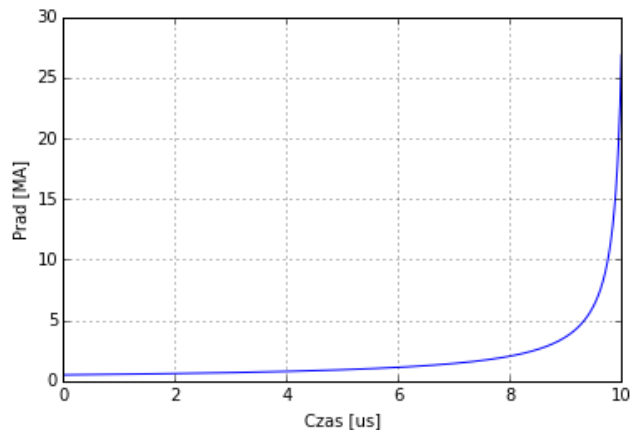
$$(5) \quad L_G(t) = L_G(1 - t/\tau)$$

gdzie  $t$  jest to czas wybuchu, który mieści się w granicach podanych według (6):

$$(6) \quad 0 \leq t \leq \tau$$

Równania od (1) do (6) zostały przepisane do języka programowania Python. Wyniki symulacji generatora magnetokumulacyjnego w postaci przebiegu prądu przedstawiono na rysunku 7. Symulację przeprowadzono dla następujących parametrów [3]:

- prąd początkowy obwodu, wygenerowany ze źródła pierwotnego wynosił  $I_0 = 5 \times 10^5$  A;
- rezystancja całego obwodu razem z obciążeniem  $R = 10$  mΩ;
- indukcyjność doprowadzeń  $L_0 = 2$  nH;
- indukcyjność początkowa cewki generatora magnetokumulacyjnego  $L_G = 1$  μH;
- czas wybuchu  $t = 10$  μs;
- cewka obciążenia  $L_1 = 10$  nH.



Rys.7. Przebieg prądu w cewce obciążenia generatora magnetokumulacyjnego

## Symulacje oddziaływania pól magnetycznych

W celu określenia oddziaływania wysokoenergetycznych pól magnetycznych na urządzenia wykonano badania symulacyjne z wykorzystaniem przedstawionych modeli generatorów.

Na podstawie prądu płynącego przez cewkę obciążenia można wyznaczyć natężenie pola magnetycznego a następnie indukcję magnetyczną  $B$  zgodnie z wzorem (7):

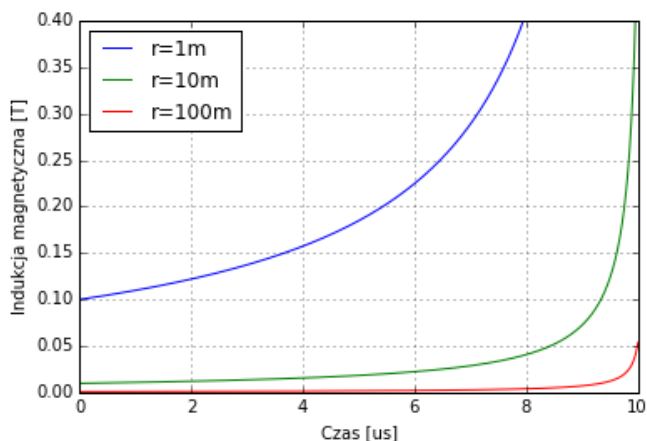
$$(7) \quad B = \mu H$$

gdzie:  $B$  – indukcja magnetyczna [T];  $\mu$  – przenikalność magnetyczna [H/m],  $\mu = \mu_0 \mu_r$ ,  $\mu_0$  – przenikalność magnetyczna próżni  $\mu_0 = 4\pi \cdot 10^{-7}$  H/m,  $\mu_r$  – przenikalność magnetyczna względna środowiska (dla powietrza  $\mu_r = 1,00000037$ ),  $H$  – natężenie pola magnetycznego [A/m].

Natężenie pola magnetycznego  $H$  dla pojedynczego przewodu może być wyrażone wzorem 8 [6].

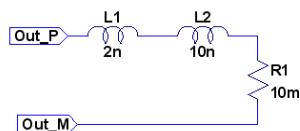
$$(8) \quad H = \frac{I}{2\pi r}$$

gdzie:  $I$  – prąd płynący przez przewód [A],  $r$  – odległość punktu w którym wyznaczamy  $H$  od przewodu [m]. Wartości wyliczonej indukcji magnetycznej  $B$  dla trzech odległości  $r$  przedstawiono na rysunku 8.



Rys.8. Przebieg indukcji magnetycznej w czasie dla trzech odległości od narażonego obiektu (w zakresie do 0,4 T)

Przeprowadzono symulację dla generatora typu SURGE do którego podłączono cewkę o parametrach identycznych jak w generatorze magnetokumulacyjnym. Schemat zastępczy cewki którą podłączono do generatora typu SURGE z rysunku 4 przedstawiono na rysunku 9.

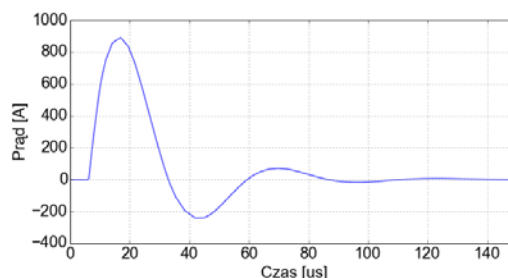


Rys.9. Schemat zastępczy cewki podłączonej do generatora typu SURGE (podobnie jak dla generatora magnetokumulacyjnego)

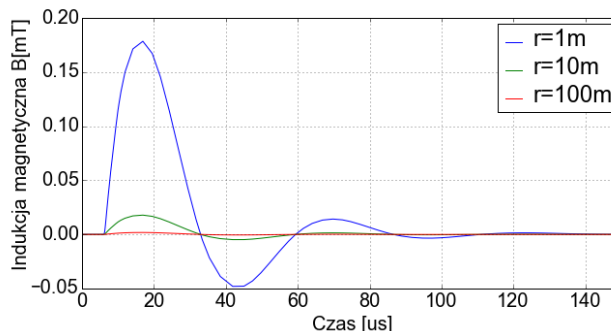
Parametry cewki obciążenia:

- rezystancja strat  $R=10$  m $\Omega$ ;
- indukcyjność połączeń  $L_1=2$  nH;
- indukcyjność cewki obciążenia  $L_2=10$  nH.

Napięcie na generatorze miało wartość 2 kV. Przebieg prądu płynącego przez cewkę został przedstawiony na rysunku 10. Przebieg indukcji magnetycznej dla generatora typu SURGE przedstawiono na rysunku 11.



Rys.10. Przebieg prądu przy obciążeniu generatora typu SURGE cewką (podobną jak dla generatora magnetokumulacyjnego)



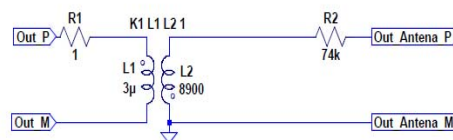
Rys.11. Przebieg indukcji magnetycznej dla różnych odległości od narażonego obiektu dla generatora typu SURGE

## Oddziaływanie pola magnetycznego na urządzenia infrastruktury krytycznej

Aby zakłócić pracę bądź zniszczyć urządzenie polem magnetycznym należy posłużyć się zjawiskiem indukcji wzajemnej. Zjawisko to polega na indukowaniu się siły elektromotorycznej w cewce pod wpływem zmian prądu w innej cewce. Wartość siły elektromotorycznej zaindukowanej w urządzeniu możemy zapisać wzorem [6]:

$$(9) \quad e_M = -\frac{\Delta \psi_{12}}{\Delta t} = M \frac{\Delta i}{\Delta t}$$

Zgodnie ze wzorem 9, siła elektromotoryczna zależy od stopnia sprzężenia dwóch cewek oraz od szybkości zmiany prądu (strumienia magnetycznego) w cewce. Aby skutecznie zakłócać pracę lub niszczyć urządzenia należy zapewnić dużą indukcyjność wzajemną cewek nadawczej i odbiorczej oraz dużą szybkość zmiany prądu w czasie. Im czas narastania i opadania impulsu jest mniejszy tym lepszy efekt zakłócenia, lub zniszczenia urządzenia. Do zamodelowania tego typu zjawiska wykorzystano transformator powietrzny, którego schemat zastępczy zaprezentowano na rysunku 12.

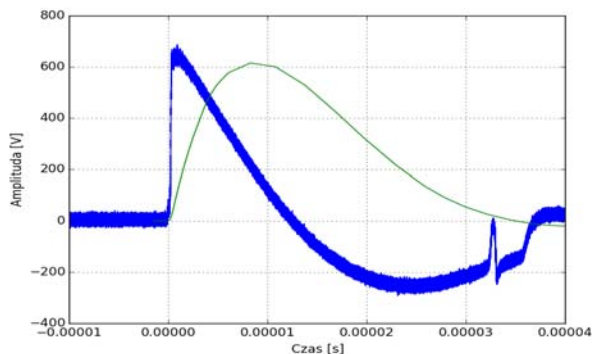


Rys. 12. Schemat zastępczy transformatora powietrznego

Wykonano weryfikację modelu oddziaływania pola magnetycznego na urządzenia. Do modelu generatora typu SURGE z rysunku 4 podłączono model oddziaływania pola magnetycznego z rysunku 12. Anteną nadawczą podłączoną do generatora SURGE była antena o wymiarach 1 m x 1 m używana w badaniach według norm PN-EN 61000-4-9. Jej parametry to:  $R=1$   $\Omega$ ;  $L=3$   $\mu$ H. Obiektem badany był cewka w postaci czujnika pola

magnetycznego. Parametry cewki były następujące:  $R=74\text{ k}\Omega$ ;  $L=8900\text{ H}$ .

Wyniki weryfikacji przedstawiono na rysunku 13. Wyniki te uzyskano przy badaniach wykonanych za pomocą generatora typu SURGE i anteny  $1\text{ m} \times 1\text{ m}$ . Na rysunku 13 przedstawiono przebieg napięcia w czasie na wejściu anteny magnetycznej podłączonej do generatora SURGE. Jak widać przebieg napięcia otrzymany z modelowania znacznie się odkształcił. Może to wynikać z zastosowania przybliżonego modelu. W rzeczywistym układzie cewki te nie są połączone.



Rys.13. Przebieg napięcia na wejściu anteny podłączonej do generatora typu SURGE, kolor niebieski jest to sygnał zmierzony na wyjściu generatora, kolor zielony wynik symulacji

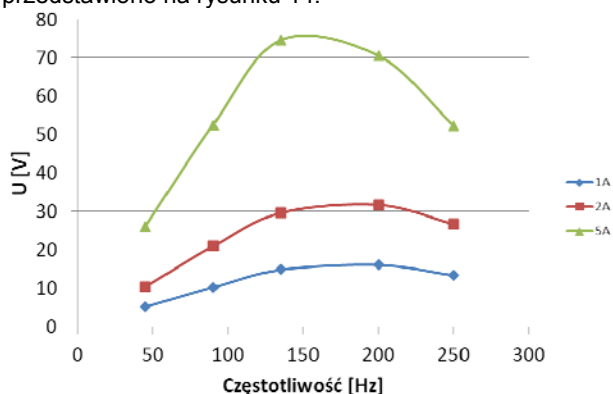
### Badania laboratoryjne urządzeń

Wykonano serię badań wpływu pola magnetycznego na urządzenia. Maksymalna wartość indukcji wynosiła  $20\text{ mT}$ . Przykładową konfigurację stanowiska przedstawiono na rysunku 15. Źródłem pola magnetycznego była cewka zakłócająca podłączona do zasilacza prądu przemiennego. Wyniki badania przedstawiono w tabeli 1.

Tabela 1. Wynik badań podatności urządzeń na pole magnetyczne

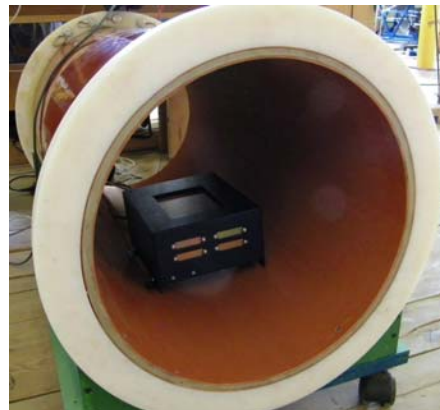
Lp.	Obiekt badany	Wynik
1.	Zestaw komputera przemysłowego	Brak efektów oddziaływania
2.	Element czujnika pola magnetycznego	Uszkodzenie cewki czujnika i układu pomiarowego (woltomierza)

Element czujnika pola magnetycznego umieszczony został w odległości  $0,8\text{ m}$  od źródła pola magnetycznego. Do czujnika podłączono woltomierz którym mierzono napięcie na wyjściu czujnika. Podczas badań zmieniano częstotliwość w zakresie od  $45\text{ Hz}$  do  $250\text{ Hz}$  oraz prąd źródła pola magnetycznego od  $1$  do  $5\text{ A}$ . Wyniki pomiarów przedstawiono na rysunku 14.



Rys.14. Wykres napięcia czujnika od częstotliwości źródła zasilania dla trzech wartości prądu płynącego przez cewkę zakłócającą.

Po badaniach nie stwierdzono uszkodzeń ani zakłóceń elementu czujnika pola magnetycznego. Kolejnym krokiem było umieszczenie czujnika wewnątrz cewki zakłócającej. Podczas tego badania układ pomiarowy z podłączonym czujnikiem pola magnetycznego przestał działać. Po badaniu stwierdzono, iż nastąpiło przebicie oraz uszkodzenie izolacji woltomierza oraz cewki czujnika, skutkiem czego nastąpiło uszkodzenie wejściowego toru pomiarowego woltomierza.



Rys.15. Komputer przemysłowy wewnątrz cewki zakłócającej

### Podsumowanie

W referacie opisano modele generatorów wytwarzających pole magnetyczne wysokiej energii, przedstawiono generatory z układami energoelektronicznymi oraz generatory magnetokumulacyjne.

Przedstawiono model oddziaływania pola magnetycznego na urządzenia, zastosowano model transformatora powietrznego. Zaprezentowano przykładowe wyniki symulacji oraz porównano te wyniki z wartościami rzeczywistymi dla modelu generatora typu SURGE.

Zaprezentowano wyniki badań podatności urządzeń na pole magnetyczne. Na podstawie badań stwierdzono, że istnieje możliwość efektywnego oddziaływania silnym polem magnetycznym na urządzenia.

### LITERATURA

- [1] PN-EN 61000-4-9:1998 Kompatybilność elektromagnetyczna. Część 4-9: Metody badań i pomiarów. Badanie odporności na impulsowe pole magnetyczne.
- [2] Altgibers L.L., Brown M.D.J., Grishnaev I., Smith I.R., Tkach Y., Novac B.M., Tkach J., Magnetocumulative Generators, Springer, 2000.
- [3] Flower C.M., Caird R.S., Garn W.B., An Introduction to Explosive Magnetic Flux Compression Generators, Los Alamos Scientific Laboratory, 1975.
- [4] Younger S., Lindemuth I., Reinvosky R., Fowler M., Goforth J., Ekdahl C., Scientific collaborations between Los Alamos and Arzamas-16 using explosive-driven flux compression generators, Los Alamos Science Number 24, 1996.
- [5] PN-EN 61000-4-5:2014-10 Kompatybilność elektromagnetyczna. Część 4-5: Metody badań i pomiarów. Badanie odporności na udary.
- [6] Bolkowski S., Elektrotechnika, WSIP 1999.

**Autorzy:** mgr inż. Andrzej Kaczmarek, Ośrodek Badawczo-Rozwojowy Centrum Techniki Morskiej, ul. Dickmana 62, 81-109 Gdynia, E-mail: Andrzej.Kaczmarek@ctm.gdynia.pl; dr inż. Rafał Namiotko, Ośrodek Badawczo-Rozwojowy Centrum Techniki Morskiej, ul. Dickmana 62, 81-109 Gdynia, E-mail: Rafal.Namiotko@ctm.gdynia.pl;