

doi:10.15199/48.2017.12.22

## Symulacje z zastosowaniem macierzy S przy weryfikacji symulatorów wyładowań elektrostatycznych

**Streszczenie.** W referacie przedstawiono algorytm pomiaru macierzy S oraz jej zastosowanie do symulacji zjawisk fizycznych zachodzących w układach elektrotechnicznych. W obliczeniach zastosowano rzeczywiste parametry S elementów toru pomiarowego generatorów ESD zgodnych z normą EN 61000-4-2: 2009. Przedstawiono wyniki symulacji metodykę pomiarów, zaprezentowano przykładowe obliczenia oraz wykresy uzyskane podczas symulacji.

**Abstract.** The paper presents the algorithm of S matrix measurement and its application to the simulation of physical phenomena occurring in electrical systems. The real S parameters of the ESD generator components were used in calculations, according to standard EN 61000-4-2: 2009. The simulation results, the measurement methodology, sample calculations and graphs obtained during the simulation were presented. (*Simulations using the S matrix for verification of electrostatic discharge simulators.*)

**Keywords:** ESD generator, calibration, dispersion parameters, transfer impedance.

**Słowa kluczowe:** Generator ESD, kalibracja, parametry rozproszenia, impedancja transferowa.

### Wstęp

Symulacja jest próbą odtworzenia właściwości badanego obiektu. W technice symulację stosuje się w przypadku weryfikacji konstrukcji, w celu kontroli projektu lub sprawdzenia istniejącego materialnego układu w pewnych warunkach trudnych lub niebezpiecznych do utworzenia.

Dla urządzeń elektrycznych i elektronicznych powszechnym staje się tworzenie modeli na podstawie pomiarów macierzy S elementów układu lub toru pomiarowego. Pozwala to na wykonywanie symulacji na rzeczywistym obiekcie, a nie na modelu matematycznym (stworzonym w oparciu o założenie teoretyczne).

### Pomiary macierzy S

Pomiar macierzy impedancyjnej S w funkcji częstotliwości umożliwia jednoznaczne opisanie parametrów elektrycznych urządzenia lub systemu traktując go jako wielowrotnik. Tego typu pomiary umożliwiają kalibrację urządzeń, stanowisk pomiarowych, czy też ocenę przydatności stanowisk do badań. Jedną z dziedzin, w której powszechnie stosuje się pomiary macierzy S urządzeń i stanowisk jest kompatybilność elektromagnetyczna (z ang. Electromagnetic compatibility – EMC). W przypadku pomiarów i badań urządzeń w różnych laboratoriach zakończonych oceną, wymagane jest potwierdzenie spełnienia wymagań przez stanowisko pomiarowe. Pomiary macierzy rozproszenia S (wszystkich parametrów lub wybranych) wykonuje się m.in. przy weryfikacji:

- układów sprzęgająco-odsprzęgających wykorzystywanych przy badaniach odporności na zaburzenia przewodzone, indukowane przez pola o częstotliwości radiowej – standard EN 61000-4-6 – parametry S11, S21 [1,2].
- sieci sztucznych przy pomiarach emisji zaburzeń przewodzonych zgodnie z EN 55016-2-1 parametry S11, S21 [4], anten pomiarowych – parametry S11,
- przydatności komór bez obciwowych do pomiarów emisji zaburzeń (pomiar NSA oraz VSWR) – parametry S11 i S21,
- tarczy prądowej wykorzystywanej przy weryfikacji impulsu wyładowania elektrostatycznego zgodnie ze standardem EN 61000-4-2 [1,6,9,10].

### Stanowisko do weryfikacji generatorów ESD

Zgodnie z wymaganiami standardu EN 61000-4-2 stanowisko do weryfikacji kształtu impulsu prądu wyładowania elektrostatycznego składa z kilku elementów:

- tarczy prądowej (przetwornika prądowego),
- tłumika z kablem pomiarowym,
- oscyloskopu,
- ekranowanej klatki lub dużej pionowej płaszczyzny ziemi odniesienia rys.1.

W celu weryfikacji elementów stanowiska niezbędny jest adapter (łącznik dopasowujący), analizator sieci, miernik impedancji dla prądu DC.

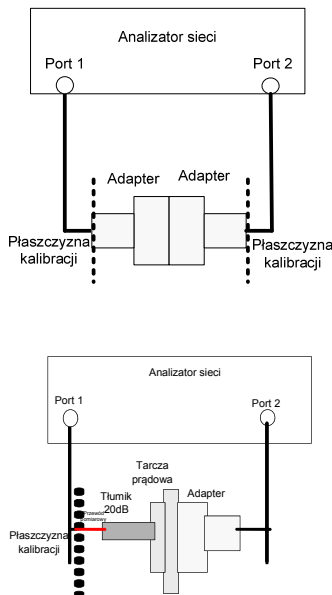
Zgodnie z wymaganiami standardu EN 61000-4-2 przed przystąpieniem do pomiarów kształtu impulsu prądu wyładowania elektrostatycznego stanowisko pomiarowe powinno zostać zweryfikowane. Weryfikacji podlegają:

- impedancja układu rozładowczego do pomiaru prądu wyładowania (impedancja tarczy),
- tłumienność wtrąceniowa układu rozładowczego do pomiaru prądu wyładowania,
- impedancja przejścia łańcucha składającego się z układu rozładowczego, tłumika oraz kabla dla małych częstotliwości.



Rys.1. Stanowisko do weryfikacji generatorów ESD

Dodatkowo zgodnie z wymaganiami standardu należy określić tłumienność wtrąceniową adaptera (metodyka pomiarowa wymaga przeprowadzenia pomiaru dwóch połączonych adapterów). Na rysunku 2 przedstawiono schematy konfiguracji układów pomiarowych wykorzystywanych przy sprawdzeniu stanowiska do weryfikacji kształtu impulsu prądu wyładowania elektrostatycznego.



Rys. 2 Schematy torów pomiarowych:

- a- tor pomiarowy do weryfikacji układu rozładowczy-tłumik-kabel) – pomiar  $S_{11}$
- b- tor pomiarowy do weryfikacji adaptera (łącznika dopasowującego) – pomiary  $S_{11}$  i  $S_{21}$ ,
- c- tor pomiarowy do weryfikacji łańcucha składającego się z układu rozładowczego – tłumika-kabla – pomiary  $S_{11}$  i  $S_{21}$ .

Zgodnie z wymaganiami standardu EN 61000-4-2 oscyloskop pomiarowy, którym weryfikuje się kształtu impulsu prądu wyładowania elektrostatycznego, powinien mieć pasmo pomiarowe minimum 2GHz. Przy weryfikacji stanowiska nie uwzględnia się charakterystyki impedancji wejściowej oscyloskopu  $S_{11}$  (przyjmuje się, że jest ona idealna i wynosi  $50\Omega$ ).

Podczas weryfikacji stanowiska przeprowadzono dodatkowo pomiar impedancji wejściowej  $S_{11}$  oscyloskopu.

Wyniki pomiarów macierzy rozproszenia  $S$  oraz wyniki pomiaru kształtu prądu rozładowania impulsu elektrostatycznego wprowadzane są do programu napisanego w środowisku Scilab. Otrzymane wyniki prezentowane przez oprogramowanie pozwalają określić, czy weryfikowane stanowisko spełnia wymagania określone w standardzie EN 61000-4-2.

### Zasada działania programu symulacyjnego

Opisywana metoda dotyczy jedynie postępowania przy wyznaczaniu niepewności typu B. Z doświadczeń badawczych laboratoriów przeprowadzających weryfikacje symulatorów ESD wynika, że udział składowych typu A w budżecie niepewności tych pomiarów jest najczęściej niewielki i może być pominięty.

Prezentowana metoda oparta jest na symulacjach komputerowych, przeprowadzanych w oparciu o opracowany model toru pomiarowego. Danymi wejściowymi do tych symulacji są wyniki pomiarów parametrów macierzy  $S$  poszczególnych elementów toru. Model toru pomiarowego jest przedstawiony w postaci wzoru matematycznego określającego zależność impedancji transferowej całego toru od częstotliwości.

Proponowana metoda oparta jest na wykorzystaniu metod analizy elementów toru pomiarowego w dziedzinie częstotliwości do określenia niepewności pomiaru parametrów prądu generatora ESD, opisanego w dziedzinie czasu. W tym celu wykorzystuje się transformatę Fouriera i transformatę odwrotną.

Zakładając że identyczne adaptory mają symetryczne macierze rozproszenia i nie powodują odbić, to parametry rozproszenia pojedynczego adaptera wynoszą [11,12]:

$$(1) \quad \mathbf{S}^A = \begin{bmatrix} 0 & \sqrt{S_{12}^{AA}} \\ \sqrt{S_{21}^{AA}} & 0 \end{bmatrix},$$

natomiast parametry samej tarczy wylicza się jako [3]:

$$(2) \quad \mathbf{S}^T = \begin{bmatrix} \frac{S_{11}^{AT}}{S_{12}^A \cdot S_{21}^A} & \frac{S_{12}^{AT}}{S_{12}^A} \\ \frac{S_{21}^{AT}}{S_{21}^A} & S_{22}^{AT} \end{bmatrix}$$

Ponieważ w kolejnych obliczeniach wykorzystywane będą parametry admityncyjne  $Y$  czwórników, parametry rozproszenia  $S$  należy przeliczyć na parametry  $Y$  według wzorów:

$$(3a) \quad Y_{11} = \frac{(1 - S_{11})(1 + S_{22}) + S_{12}S_{21}}{(1 + S_{11})(1 + S_{22}) - S_{12}S_{21}} \cdot \frac{1}{r_1}$$

$$(3b) \quad Y_{21} = \frac{-2S_{21}}{(1 + S_{11})(1 + S_{22}) - S_{12}S_{21}} \cdot \frac{1}{\sqrt{r_1 r_2}}$$

$$(3c) \quad Y_{12} = \frac{-2S_{12}}{(1 + S_{11})(1 + S_{22}) - S_{12}S_{21}} \cdot \frac{1}{\sqrt{r_1 r_2}}$$

$$(3d) \quad Y_{22} = \frac{(1 + S_{11})(1 - S_{22}) + S_{12}S_{21}}{(1 + S_{11})(1 + S_{22}) - S_{12}S_{21}} \cdot \frac{1}{r_2}$$

gdzie stałe normalizujące  $r$  o wymiarze  $[\Omega]$  przyjmuje się równe impedancjom portów analizatora sieci, tj.  $r_1 = Z_{G1}$ ,  $r_2 = Z_{G2}$  (zwykle  $50\Omega$ ).

Impedancja transferowa  $Z_{TR\_TK}$  toru pomiarowego

Poszukiwaną impedancję transferową  $Z_{TR\_TK} = U_2/I_1$  można wyrazić w funkcji parametrów admityncyjnych  $Y^{TK}$  czwórnika zastępczego stanowiącego łańcuchowe połączenie czwórników reprezentujących tarczę i kabel z tłumikiem oraz impedancji wejściowej tarczy  $Z_{WET}$  [5,6]:

$$(4) \quad Z_{TR\_TK} = \frac{U_2}{I_1} = \frac{1 - Y_{11}^{TK} Z_{WET}}{Y_{12}^{TK}}$$

Występującą w (4) impedancję wejściową tarczy  $Z_{WET}$  przedstawia się w funkcji jego parametrów admityncyjnych  $Y^T$  oraz impedancji obciążenia tarczy  $Z_{OT}$ , którą stanowi pozostała część łańcucha pomiarowego, tzn. kabel z tłumikiem i oscyloskop:

$$(5) \quad Z_{WET} = \frac{U_1}{I_1} = \frac{1 - Y_{22}^T Z_{OT}}{Y_{11}^T - Z_{OT} |Y^T|^T}$$

gdzie:  $|Y^T|^T = Y_{11}^T Y_{22}^T - Y_{12}^T Y_{21}^T$

Parametry admityncyjne  $Y^{TK}$  wyznacza się z parametrów łańcuchowych  $A^{TK}$  czwórnika zastępczego:

$$(6) \quad Y_{11}^{TK} = \frac{A_{22}^{TK}}{A_{12}^{TK}}, \quad Y_{12}^{TK} = -\frac{1}{A_{12}^{TK}}, \quad Y_{21}^{TK} = \frac{1}{A_{12}^{TK}}, \quad Y_{22}^{TK} = -\frac{A_{11}^{TK}}{A_{12}^{TK}}$$

Wykorzystanie reprezentacji łańcuchowej jest wygodne, ponieważ macierz zastępczą  $A^{TK}$  oblicza się jako iloczyn macierzy łańcuchowych czwórników składowych:

$$(7) \quad \mathbf{A}^{TK} = \mathbf{A}^T \cdot \mathbf{A}^K = \begin{bmatrix} A_{11}^T & A_{12}^T \\ A_{21}^T & A_{22}^T \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} A_{11}^K & A_{12}^K \\ A_{21}^K & A_{22}^K \end{bmatrix}$$

gdzie  $\mathbf{A}^T$  – macierz parametrów łańcuchowych tarczy,  $\mathbf{A}^K$  – macierz parametrów łańcuchowych kabla z tłumikiem. Macierz łańcuchową  $\mathbf{A}$  czwórniką wyznacza się z macierzy admitancyjnej  $\mathbf{Y}$  według zależności:

$$(8) A_{11} = \frac{Y_{22}}{Y_{12}}, \quad A_{12} = -\frac{1}{Y_{12}}, \quad A_{21} = \frac{|Y|}{Y_{12}}, \quad A_{22} = -\frac{Y_{11}}{Y_{12}}$$

W naszym przypadku przeliczenia według wzorów (8) trzeba przeprowadzić dla macierzy parametrów tarczy oraz kabla z tłumikiem.

Występująca w (5) impedancja obciążenia tarczy jest równa impedancji wejściowej kabla z tłumikiem:

$$(9) Z_{OT} = \frac{U_{2T}}{I_{2T}} = Z_{WEK} \cdot$$

Do wyznaczenia  $Z_{WEK}$  można wykorzystać zależność analogiczną do (5). Tym razem

$$(10) Z_{WEK} = \frac{U_{2T}}{I_{2T}} = \frac{1 - Y_{22}^K Z_O}{Y_{11}^K - Z_O |Y|^K}$$

gdzie:  $|Y|^K = Y_{11}^K Y_{22}^K - Y_{12}^K Y_{21}^K$ . Impedancję obciążenia stanowi w tym przypadku impedancja wejściowa oscyloskopu  $Z_O$ , którą można obliczyć ze zmierzonych parametrów rozproszenia  $\mathbf{S}^O$  oscyloskopu:

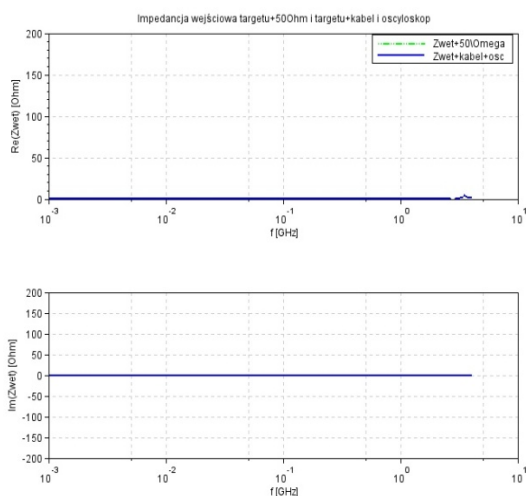
$$(11) Z_O = Z_{WEO} = \frac{U_2}{I_2} = \frac{1 + S_{11}^O}{1 - S_{11}^O} \cdot Z_{G1}$$

gdzie  $Z_{G1} = 50 \Omega$  jest impedancją źródła (impedancją portu 1 wektorowego analizatora sieci).

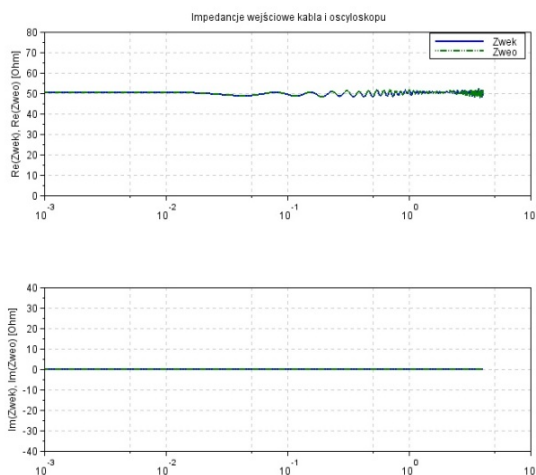
### Wyniki pomiarów i obliczeń

Do obliczeń wykorzystano wyniki pomiarów parametrów rozproszenia poszczególnych elementów łańcucha pomiarowego uzyskane za pomocą E5071C ENA Vector Network Analyzer Agilent Technologies w zakresie częstotliwości od 1 kHz do 8,5 GHz. Punkty pomiarowe są rozłożone na skali częstotliwości w odstępach logarytmicznych, a wartości podane w formie części rzeczywista - część urojona.

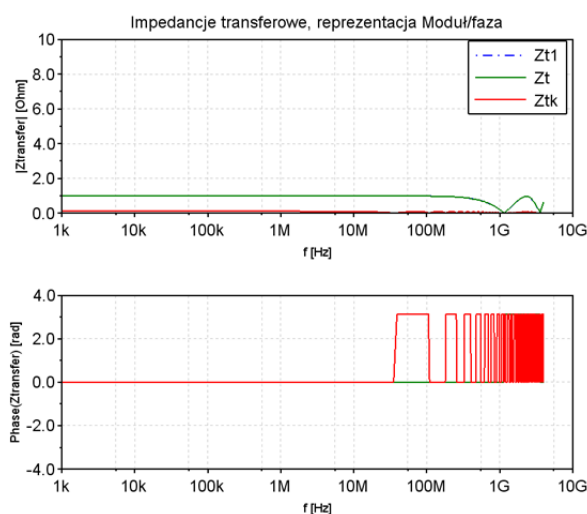
Na rys. 3-6 przedstawiono wykres z programu symulacyjnego różnych parametrów



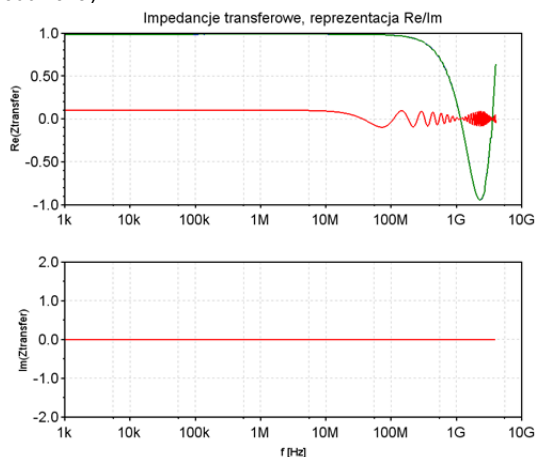
Rys. 3. Impedancja wejściowa + 50 Ω i target + kabel i oscyloskop z programu symulacyjnego



Rys. 4. Impedancja wejściowa kabla  $Z_{WEK}(f)$  i oscyloskopu  $Z_{WEO}(f)$



Rys.5. Impedancja wejściowa kabla  $Z_i(f)$  i oscyloskopu  $Z_{ik}(f)$  (moduł/faza)



Rys. 6. Impedancja wejściowa kabla  $Z_i(f)$  i oscyloskopu  $Z_{ik}(f)$  (reprezentacja Re/Im)

Rysunek 3 przedstawia wykresy impedancji wejściowych kabla  $Z_{WEK}$  i oscyloskopu  $Z_{WEO}$ , w funkcji częstotliwości, obliczone według odpowiednich wzorów (10) z uwzględnieniem wyników pomiarów parametrów macierzy  $\mathbf{S}$  tych elementów. W zakresie częstotliwości poniżej 3 GHz impedancje te mają charakter rezystancyjny, a ich wartość jest zbliżona do 50 Ω,

natomiast daje się zaobserwować pewną nieliniowość charakterystyki przy częstotliwości 3,5 GHz.

Program symulacyjny umożliwia wyznaczenie impedancji poszczególnych elementów toru pomiarowego rys. 5 i rys 6.

Określona w wyniku przeprowadzonych pomiarów i symulacji impedancja transferowa całego toru pomiarowego ma podobny przebieg jak impedancja tarczy. W zakresie częstotliwości poniżej 4 GHz impedancja ta ma w przybliżeniu charakter rezystancyjny. Występujące różnice między tymi impedancjami wynikają głównie z przesunięć fazowych, spowodowanych wpływem kabla, stanowiącego dla wielkich częstotliwości linię opóźniającą.

Znajomość impedancji transferowej toru pomiarowego w funkcji częstotliwości  $Z_{TR\_TK}(f)$ , umożliwia ocenę zniekształceń impulsu prądu wejściowego  $I_1(t)$  symulatora wyładowań ESD, poddawanego weryfikacji. Obliczone błędy graniczne poszczególnych parametrów prądu wyładowań ESD, w stosunku do modelu niskoczęstotliwościowego, stanowią podstawę do wyznaczenia składowej niepewności, wynikającej z właściwości elementów toru pomiarowego w zakresie wielkiej częstotliwości.

### Wnioski końcowe

Zaprezentowana metoda posiada wiele korzystnych cech i pozwala na rzetelną ocenę wpływu wszystkich istotnych składników niepewności związanych z tymi pomiarami. Uwzględnia ona błędy wnoszone przez główne elementy toru pomiarowego (tarczę rozładowniczą, kabel z tłumikiem i impedancję wejściową oscyloskopu), w szerokim zakresie częstotliwości (do 8,5 GHz).

W dotychczasowej praktyce laboratoryjnej takie podejście nie było prezentowane. Zastosowanie proponowanej metody szacowania niepewności pomiarów pozwala na bardziej wiarygodną weryfikację symulatorów ESD.

Prowadzone są prace które mają na celu uwzględnienia w budżecie niepewności składowej związanej z charakterystyką częstotliwościową oscyloskopu. Pozwoli to na uzyskanie kształtu wyjściowego napięcia generatora ESD na podstawie zarejestrowanego przebiegu oscyloskopowego.

Modelowanie z wykorzystaniem parametrów S może być narzędziem pozwalającym na poprawną interpretację wyników pomiarów. Nawet bardzo złożone obliczenia można wykonywać prawie w czasie rzeczywistym.

Do obliczeń można wykorzystywać komercyjne oprogramowanie takie jak Matlab lub Scilab daje to możliwości wyznaczenia macierzy S poszczególnych

elementów toru pomiarowego i analizy rejestrowanych przez oscyloskop przebiegów. Pozwala to również porównywać pomiary różnych stanowisk pomiarowych, jak również generatorów ESD, umożliwia wyszukiwanie „słabych” punktów toru pomiarowego.

**Autor:** dr inż. Tomasz DRÓŹDŹ, Uniwersytet Rolniczy w Krakowie, Wydział Inżynierii Produkcji i Energetyki, E-mail: Tomasz.Drozdz@ur.krakow.pl

### LITERATURA

- [1]. EN 61000-4-2: 2009 - Electromagnetic compatibility (EMC) – Part 4: Testing and measurement techniques. Section 2. Electrostatic discharge immunity test.
- [2] Borowiec J., Florek A., Wroczyński R.: Weryfikacja parametrów symulatora wyładowań elektrostatycznych. *V Międzynarodowe Sympozjum EL-TEX 2002*. Łódź 2002 r.
- [3] Sroka J., Klampfer W.; Target influence on the calibration uncertainty of ESD simulators. *8th Int. Conference on Electromagnetic Interference and Compatibility*. Chennai India, December 2003, str. 241 – 244.
- [4] Sroka J.; Calibration uncertainty of ESD simulator estimated with frequency dependent transfer impedance of the target. *16th International Wrocław Symposium and Exhibition on EMC*. Wrocław, June 2002, str. 429 – 432.
- [5] Sroka J.; Crucial but still ignored aspects of the ESD target characterisation. *EMC Europe 2002. Sorrento*, September 2002, str. 809 – 814.
- [6] KURYTNIK I, DRÓŹDŹ T., NAWARA P.: "Sensitivity method for evaluating impact of accuracy of the measurement path during ESD generator verification" PRZEGLĄD ELEKTROTECHNICZNY, ISSN 0033-2097, NR 07/2016, STRONA 90-94
- [7] J. Dobrowolski: Technika wielkich częstotliwości. Oficyna Wydawnicza Politechniki Warszawskiej, 2001.
- [8] K. Kurokawa: Power Waves and the Scattering Matrix. IEEE Trans. On Mectowave Theory and Technics vol. MTT - 13, No. 2, str. 194 -202, 1965.
- [9] Sroka J.; Calibration uncertainty of ESD simulator estimated with frequency dependent transfer impedance of the target. *16th International Wrocław Symposium and Exhibition on EMC*. Wrocław, June 2002, str. 429 – 432.
- [10] Sroka J.; Crucial but still ignored aspects of the ESD target characterisation. *EMC Europe 2002. Sorrento*, September 2002, str. 809 – 814.
- [11] Dróźdź T., "Ocena zniekształceń prądu w kalibracji symulatorów wyładowań elektrostatycznych", Rozprawa doktorska, Politechnika Częstochowska, Wydział Elektryczny, Częstochowa 2006.
- [12] Dróźdź T. Kuciński S., "Metoda szacowania niepewności pomiarów wykonywanych przy weryfikacji symulatorów wyładowań elektrostatycznych", *Przegląd Elektrotechniczny*, ISSN 0033-2097, r. 83 nr 9/2007, pp.39-42