

## Badanie parametrów dynamicznych nowych konstrukcji udarowych dzielników napięć

**Streszczenie.** W artykule przedstawiono prototypy kilku nowych konstrukcji wysokonapięciowych dzielników napięcia. W celu oceny przydatności zaprojektowanych dzielników do pomiaru impulsów napięciowych o nanosekundowych czasach narastania zaproponowano metodykę badań ich parametrów dynamicznych. Następnie przeprowadzono badania w dziedzinie czasu i częstotliwości.

**Abstract.** The article presents prototypes of several new high-voltage voltage divider designs. In order to assess the suitability of designed dividers for measuring voltage pulses with nanosecond rise times, a methodology of their dynamic parameters was proposed. Then, time and frequency domain studies were performed. (Examination of dynamic parameters of new impulse voltage divider designs).

**Słowa kluczowe:** dzielnik napięcia, czas odpowiedzi.

**Keywords:** voltage divider, step response.

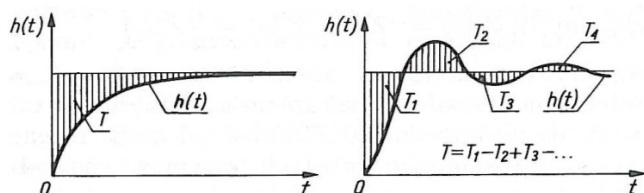
### Wstęp

Pomiar przebiegów napięć impulsowych o amplitudach rzędu kilkudziesięciu, do kilkuset kilowoltów, przy jednoczesnych czasach narastania rzędu nanosekund wymaga zastosowania zupełnie nowych rozwiązań udarowych dzielników napięć.

Wielkości, które są istotne jeśli chodzi o odpowiedź układu pomiarowego wysokiego napięcia, to czas odpowiedzi, czas ustalenia odpowiedzi (czas od momentu początkowego, do momentu aż wartość chwilowa przebiegu różni się od przebiegu referencyjnego o mniej niż 1%), maksymalna wartość przepięcia i czas narastania odpowiedzi.

Najistotniejszym parametrem dynamicznym wydaje się być właśnie czas odpowiedzi, który możemy zdefiniować jako sumę algebraiczną obszarów zawartych między impulsem jednostkowym a odpowiedzią układu pomiarowego na ten impuls (rys. 1), a więc:

$$(1) \quad T = \int_0^{\infty} [1 - h(t)] dt$$



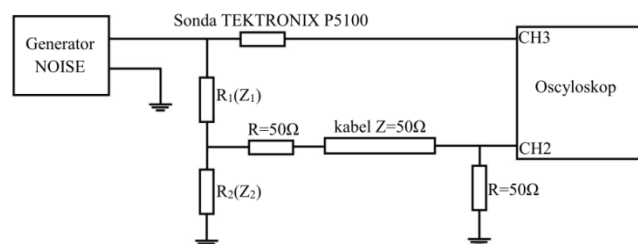
Rys.1. Typowe odpowiedzi na skok jednostkowy układu pomiarowego a) aperiodyczna; b) oscylacyjna [1]

Wyznaczanie parametrów dynamicznych projektowanego układu do pomiaru impulsów napięciowych lub prądowych może być prowadzone zarówno w dziedzinie czasu (odpowiedź na impuls jednostkowy) [2] oraz w dziedzinie częstotliwości (pasmo przenoszenia) [3]. Szczegółowe wymagania stawiane wysokonapięciowym układom pomiarowym, w tym również ich własnościom dynamicznym, zawarte są w normie PN-EN 60060-2 [4].

### Układ pomiarowy

Badania własności dynamicznych dzielników napięć wykonano w Hali Wysokich Napięć PW. Źródłem przebiegu prostokątnego był generator fali prostokątnej japońskiej firmy NOISE, model INS-420. Generator pozwala na regulację amplitudy przebiegu prostokątnego od 0 do 2 kV. Katalogowo czas narastania impulsu z tego generatora

wynosi 0,4 ns, jednak czas ten zmierzony oscyloskopem Lecroy WaveRunner 640 Zi połączonym bezpośrednio z wyjściem generatora, przy amplitudzie 30 V, wyniósł 1,7 ns. Przy napięciu przekraczającym 60 V sygnał referencyjny z generatora był dodatkowo tłumiony przez sondę Tektronix P5100 o deklarowanym przez producenta czasie odpowiedzi 1,75 ns. Schemat układu pomiarowego do badania czasów odpowiedzi projektowanych dzielników jest przedstawiony na rysunku 2.



Rys.2. Schemat układu pomiarowego do wyznaczania czasu odpowiedzi projektowanych dzielników napięć

### Pomiary w dziedzinie czasu

Pierwszym z badanych dzielników był dzielnik wykonany z opornika wodnego o średnicy 43 mm i wysokości słupa wody 1135 mm, w tym słup wody odpowiadający za rezystancję członu niskonapięciowego wynosił 10 mm. Widok dzielnika przedstawiono na rysunku 3.

Zmierzone wartości rezystancji przy prądzie stałym wynosiły: \$R\_1 = 12\$ kΩ, \$R\_2 = 5\$ Ω, gdzie: \$R\_1\$ – rezystancja członu wysokonapięciowego, \$R\_2\$ – rezystancja członu niskonapięciowego. Zmierzone wartości impedancji przy częstotliwości 200 kHz wynosiły odpowiednio: \$Z\_1 = 7,7\$ kΩ, \$Z\_2 = 170,7\$ Ω. Obliczony współczynnik skali dzielnika przy częstotliwości 200 kHz wynosi 46,28. Współczynnik skali dzielnika wyznaczony z pomiarów wynosi 112,43.

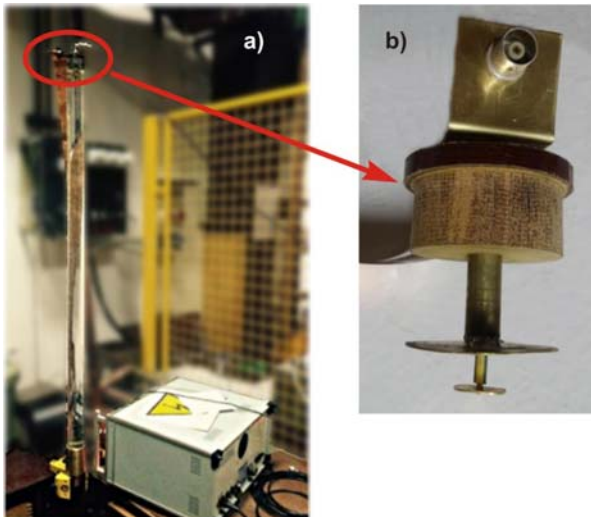
Na rysunku 4 przedstawiono przebiegi napięcia referencyjnego (z generatora napięć prostokątnych) z zastosowaniem sondy P5100 oraz napięcia obniżonego badanym dzielnikiem.

Zmierzony czas odpowiedzi dzielnika z rezystorem wodnym, względem przebiegu referencyjnego, wyznaczony ze wzoru (1), wynosi 75,7 ns. Odpowiedź dzielnika jest aperiodyczna. Czas do ustalenia odpowiedzi tego dzielnika, odczytany z oscyloskopu, wynosi 204 ns.

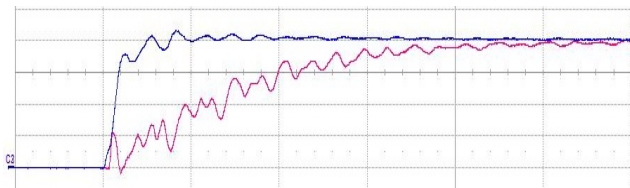
W kolejnym etapie badań, w konstrukcji dzielnika zastosowano ekran z folii aluminiowej, połączony z wejściem wysokonapięciowym dzielnika. Ekran poprawia rozkład pojemności pasożytniczych do konstrukcji dzielnika,

co znacznie polepszyło własności dynamiczne dzielnika. Wykonano pomiary z ekranami o dwóch wysokościach: 440 mm i 800 mm. Czas odpowiedzi dzielnika z zastosowanym ekranem o wysokości 440 mm wynosi 16,5 ns, a czas do ustalenia odpowiedzi 100 ns. Czas odpowiedzi dzielnika z zastosowanym ekranem o wysokości 800 mm wynosi 0,63 ns, a czas do ustalenia odpowiedzi wynosi 50 ns. W tym wypadku odpowiedź dzielnika jest oscylacyjna.

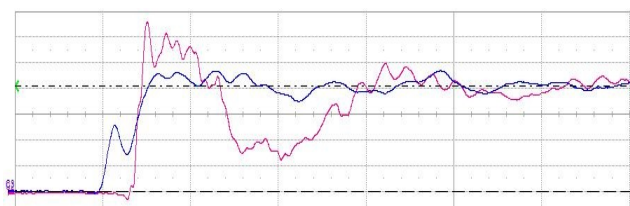
Przebiegi napięć uzyskane dla dzielnika z ekranem o wysokości 800 mm pokazano na rysunku 5.



Rys.3. Rezystancyjny dzielnik wodny; a) widok na stanowisku pomiarowym, b) widok elektrod członu niskonapięciowego



Rys.4. Przebieg napięcia referencyjnego z generatora udarów prostokątnych (niebieski) oraz napięcia z dzielnika z opornikiem wodnym (czerwony); VScale = 500 V/div, HScale = 50 ns/div



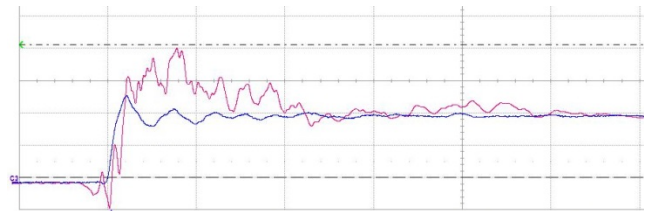
Rys.5. Przebieg napięcia referencyjnego z generatora udarów prostokątnych (niebieski) oraz napięcia z dzielnika z opornikiem wodnym (czerwony); VScale = 500 V/div, HScale = 10 ns/div

Drugim z badanych dzielników był dzielnik wykonany z niskoindukcyjnych oporników ceramicznych firmy HVP, typ 890AS i 884SP. Dzielnik na stanowisku pomiarowym przedstawiono na rysunku 6. Zmierzone wartości rezystancji przy prądzie stałym wynosiły:  $R_1 = 9,48 \text{ k}\Omega$ ,  $R_2 = 1,03 \text{ }\Omega$ , gdzie:  $R_1$  – rezystancja członu wysokonapięciowego, natomiast  $R_2$  – rezystancja członu niskonapięciowego. Zmierzone wartości impedancji przy częstotliwości 200 kHz wynosiły odpowiednio:  $Z_1 = 9,14 \text{ k}\Omega$ ,  $Z_2 = 0,99 \text{ }\Omega$ . Obliczony współczynnik skali dzielnika dla 200 kHz wynosi 9 211. Współczynnik skali dzielnika wyznaczony z pomiarów wynosi 20 000.



Rys.6. Rezystancyjny dzielnik z niskoindukcyjnymi opornikami ceramicznymi na stanowisku pomiarowym

Na rysunku 7 przedstawiono przebiegi napięcia referencyjnego oraz napięcia obniżonego badanym dzielnikiem. Nadmienić należy, że zarejestrowane przebiegi pochodzą z dzielnika wyposażonego w ekrany z folii aluminiowej o wysokości 100 mm, umieszczone zarówno od strony wysokiego napięcia, jak i od strony ziemi. Przebiegi rejestrowane dzielnikiem bez zastosowanych ekranów zawierały znacznie większą ilość zniekształceń wysokoczęstotliwościowych.



Rys.7. Przebieg napięcia referencyjnego z generatora udarów prostokątnych (niebieski) oraz napięcia z dzielnika z opornikami ceramicznymi (czerwony); VScale = 1 kV/div, HScale = 20 ns/div

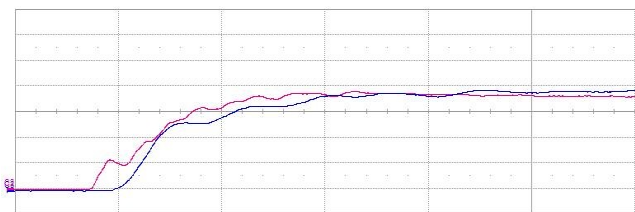
Czas odpowiedzi dzielnika rezystancyjnego tego typu, z zastosowanymi dwoma ekranami o wysokości 100 mm, względem przebiegu referencyjnego, wyznaczony ze wzoru (1), wynosi -25,9 ns. Ujemny czas odpowiedzi jest efektem znacznego przewyższenia przebiegu pochodzącego z badanego dzielnika względem przebiegu referencyjnego. Dzielnik charakteryzuje się odpowiedzią oscylacyjną, silnie tłumioną. Czas do ustalenia odpowiedzi odczytany z oscyloskopu wynosi 50 ns.

Trzecim z badanych dzielników był dzielnik pojemnościowy, wykonany w postaci dwóch koncentrycznych kondensatorów o bardzo niskiej pojemności. Koncepcja dzielnika została opracowana na podstawie publikacji [5], a projekt dzielnika opisano szerzej w [6]. Widok dzielnika koncentrycznego, wykonanego w Zakładzie WNIKE Politechniki Warszawskiej przedstawiono na rysunku 8. Wymiary dzielnika zostały dobrane w taki sposób, aby jego impedancja charakterystyczna wynosiła 50  $\Omega$ . Zmierzone wartości pojemności członów dzielnika wynosiły:  $C_1 = 13 \text{ pF}$ ,  $C_2 = 1,5 \text{ nF}$ , gdzie:  $C_1$  i  $C_2$  to odpowiednio pojemność członu wysokonapięciowego i niskonapięciowego dzielnika. Obliczony współczynnik skali dzielnika wynosi 116,4. Współczynnik skali dzielnika wyznaczony z pomiarów wynosi 236.



Rys.8. Widok koncentrycznego, pojemnościowego dzielnika napięcia wykonanego w ZWNIKE PW

Na rysunku 9 przedstawiono przebiegi napięcia referencyjnego oraz napięcia obniżonego dzielnikiem koncentrycznym.



Rys.9. Przebieg napięcia referencyjnego z generatora udarów prostokątnych (niebieski) oraz napięcia z dzielnika koncentrycznego (czerwony); VScale = 200 V/div, HScale = 10 ns/div

Czas odpowiedzi dzielnika pojemnościowego względem przebiegu referencyjnego, wyznaczony ze wzoru (1) wynosi -4,1 ns. Odpowiedź dzielnika jest aperiodyczna. Czas do ustalenia odpowiedzi dzielnika pojemnościowego odczytany z oscyloskopu wynosi 19 ns.

W czerwcu 2016 roku wykonano modernizację dzielnika koncentrycznego mającą na celu zwiększenie jego współczynnika skali, tak, aby możliwy był pomiar udarów o większej amplitudzie. Zmierzone po modernizacji wartości pojemności członów dzielnika wynosiły:  $C_1 = 11,5$  pF,  $C_2 = 3,1$  nF, gdzie:  $C_1$  i  $C_2$  to odpowiednio pojemność członu wysokonapięciowego i niskonapięciowego dzielnika. Obliczony współczynnik skali dzielnika wynosi 270,56, natomiast współczynnik skali wyznaczony z pomiarów wynosi 333.

Czas odpowiedzi dzielnika pojemnościowego po modernizacji wynosi -1,1 ns. Odpowiedź dzielnika jest aperiodyczna. Czas do ustalenia odpowiedzi dzielnika pojemnościowego odczytany z oscyloskopu wynosi 22 ns.

Zebrane wyniki przedstawiono w tabelach 1 i 2. Pierwsza z nich zawiera zestawienie obliczonych i zmierzonych współczynników skali. Druga natomiast zawiera zestawienie parametrów dynamicznych badanych dzielników uzupełnione o zmierzone współczynniki skali.

### Pomiary w dziedzinie częstotliwości

Przebiegi impulsowe składają się z wielu przebiegów harmonicznymi, z których każdy może być w różnym stopniu tłumiony. Charakter wpływu częstotliwości na osłabianie danego sygnału harmonicznego można zbadać za pomocą analizatora sieci (wektorowego bądź skalarnego).

Tabela 1. Zestawienie obliczonych i zmierzonych współczynników skali udarowych dzielników napięcia

Typ dzielnika	Obliczony współczynnik skali dla napięcia DC [-]	Obliczony współczynnik skali dla 200 kHz [-]	Zmierzony współczynnik skali [-]
Rezystancyjny wodny	2 401	46	112
Z rezystorami ceramicznymi	9 205	9 211	20 000
Pojemnościowy koncentryczny	116	-	236
Pojemnościowy koncentryczny, po modernizacji	271	-	333

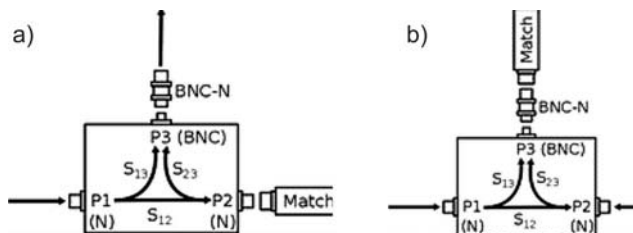
Tabela 2. Zestawienie parametrów przebadanych udarowych dzielników napięcia

Typ dzielnika	Zmierzony współczynnik skali [-]	Czas odpowiedzi [ns]	Czas do ustalenia [ns]
Rezystancyjny wodny; bez ekranu	112,43	75,7	204
Rezystancyjny wodny; z ekranem 440 mm	112,43	16,5	100
Rezystancyjny wodny; z ekranem 440 mm	112,43	0,6	50
Z rezystorami ceramicznymi; z dwoma ekranami po 100 mm	20 000	-25,9	50
Pojemnościowy koncentryczny	236	-4,1	19
Pojemnościowy koncentryczny, po modernizacji	333	-1,1	22

Z uwagi na dobrą dynamikę i ogólną przydatność do badań prowadzonych w laboratorium Wysokich Napięć dzielnika koncentrycznego postanowiono poddać go dodatkowym badaniom za pomocą wspomnianego analizatora sieci.

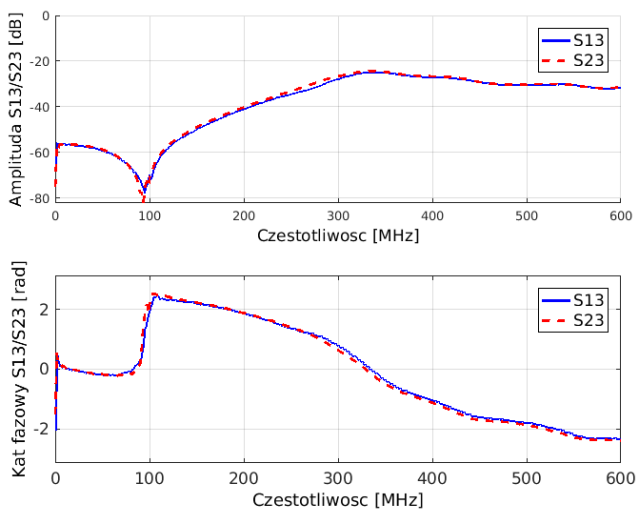
Dzielnik został zbadany za pomocą wektorowego analizatora sieci ZVL firmy Rohde & Schwarz. Badane urządzenie potraktowano jako trójwrotnik, gdzie pomiędzy portami P1 i P3 sygnał jest silnie tłumiony (przez co można go bezpiecznie przekazać na wejście oscyloskopu).

W celu wyznaczenia parametrów opisywanego dzielnika wykonano pomiary charakterystyki odbiciowej oraz transmisyjnej. Schemat układu pomiarowego został przedstawiony na rysunku 10. Należy zwrócić uwagę, że ten dzielnik koncentryczny posiada tylko jedno gniazdo BNC na wyjściu portu P3. Pozostałe dwa porty są przystosowane do podłączenia bezpośrednio do generatora i musiały zostać rozbudowane o gniazda N. Do portu P3 zostało podłączone przejście z BNC na N.



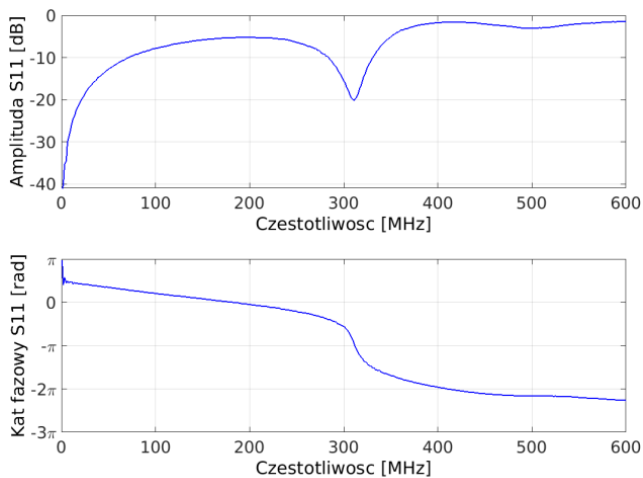
Rys.10. Schemat układu pomiarowego do pomiaru charakterystyki częstotliwościowych dzielnika; a) układ do pomiaru S13, b) układ do pomiaru S12/S21

Uzyskane w czasie pomiarów charakterystyki przedstawiono na rysunkach 11 i 12. Rysunek 11 prezentuje w jakim stopniu wejściowy sygnał tłumiony jest przechodząc pomiędzy portami P1/P2 i P3 ( $S_{13}/S_{23}$ ). Jak widać, do częstotliwości ok. 110 MHz obserwujemy tłumienie od 60 dB (1 000) do 80 dB (10 000).



Rys.11. Amplitudowa i fazowa charakterystyka częstotliwościowa parametrów  $S_{13}$  i  $S_{23}$

Jak widać z wykresu faz  $S_{13}$  i  $S_{23}$ , do częstotliwości ok. 90 MHz kąt fazowy zmienia się w niewielkim zakresie, przez co zmierzony sygnał nie odbiega istotnie od sygnału oryginalnego (pomijając oczywiście zmianę tłumienności dzielnika w tym zakresie częstotliwości).



Rys.12. Amplitudowa i fazowa charakterystyka częstotliwościowa parametru  $S_{11}$

Z przebiegu amplitudy  $S_{11}$  wynika, że do ok. 100 MHz od portu P1 dzielnika odbija się do 12,6% mocy padającej. Należy zaznaczyć, że wszystkie przedstawione pomiary zostały przeprowadzone w stanie dopasowania, co oznacza, że niewykorzystywane porty zostały zaterminowane impedancją 50  $\Omega$ .

Aspektem, który został pominięty w czasie przedstawionych pomiarów jest wpływ dołączonych portów i przejść (np. BNC-N). Z uwagi na krótkie długości

połączeń uznano, że wspomniane czynniki nie zaburzyły istotnie wyników pomiarów w zakresie częstotliwości poniżej 100 MHz. Zakres częstotliwości, dla których przeprowadzono pomiary to 1,6 MHz – 600 MHz.

Jak widać z pomiarów charakterystyk dzielnika, pomimo tego, że konstrukcja koncentryczna pozwala na osiągnięcie pożądanego tłumienia, wpływa też na sygnał przechodzący przez dzielnik (przykładowo, dla częstotliwości powyżej 100 MHz ponad 10% mocy jest odbijane w kierunku generatora).

## Podsumowanie

W ramach przeprowadzonych badań parametrów dynamicznych nowych konstrukcji dzielników wykonano pomiar czasu odpowiedzi i czasu do ustalenia odpowiedzi trzech typów dzielników napięć udarowych. Niektóre dzielniki badano w różnej konfiguracji zastosowanych ekranów. Dodatkowo dla każdego dzielnika wyznaczono pomiarowo współczynnik skali dla różnych częstotliwości.

Dokładniejsze zbadanie dzielnika koncentrycznego pozwoliło na określenie jego przybliżonej charakterystyki częstotliwościowej tłumienia. Na podstawie zmierzonych parametrów rozproszeniowych określono uśredniony współczynnik skali dzielnika (ok. 5 000) oraz praktyczny zakres częstotliwości pracy (poniżej 100 MHz). Analizując wykres charakterystyki współczynnika odbicia stwierdzono też niedopasowanie do impedancji 50  $\Omega$ . Ten aspekt będzie tematem kolejnych prac nad ulepszonym pojemnościowym dzielnikiem koncentrycznym.

**Autorzy:** dr inż. Andrzej Łasica, Politechnika Warszawska, Instytut Elektrotechniki Stosowanej i Systemów Informacyjno-Pomiarowych, Zakład Wysokich Napięć i Kompatybilności Elektromagnetycznej, ul. Koszykowa 75, 00-662 Warszawa, [alastica@ee.pw.edu.pl](mailto:alastica@ee.pw.edu.pl); mgr inż. Bartosz Chaber, Politechnika Warszawska, Instytut Elektrotechniki Stosowanej i Systemów Informacyjno-Pomiarowych, Zakład Wysokich Napięć i Kompatybilności Elektromagnetycznej, ul. Koszykowa 75, 00-662 Warszawa, [bartosz.chaber@ee.pw.edu.pl](mailto:bartosz.chaber@ee.pw.edu.pl).

## LITERATURA

- [1] Flisowski Z., Technika Wysokich Napięć, Warszawa, WNT, 2015.
- [2] Sul P., Metoda wyznaczania czasu odpowiedzi boczników prądów udarowych, *Przegląd Elektrotechniczny*, 1k/2006 Str. 245-247.
- [3] Prochazka R., Hlavacek J., Knenicky M., Mahmoud R., Determination of Frequency Characteristics of High Voltage Dividers in Frequency Domain, *International Conference on Information Science, Electronics and Electrical Engineering (ISEEE)*, 2014. DOI: 10.1109/InfoSEEE.2014.6946212
- [4] PN-EN 60060-2: 2011, Wysokonapięciowa technika probiercza – część 2: układy pomiarowe.
- [5] Cadilhon B., Pecastaing L., Reess T., Gibert A., "Low-stray inductance structure to improve the rise-time of a Marx generator", *IET Electric Power Applications*, Volume: 36, 2008, Vol. 2, No. 4, pp. 248-255, doi: 10.1049/iet-epa:20070250.
- [6] Łasica A., Szmurło R., Starzyński J., Accuracy of numerical model of coaxial impulse voltage divider validated with measurements, *Computational Problems of Electrical Engineering (CPEE)*, 2016 17th International Conference (pp. 1-4). IEEE, doi: 10.1109/CPEE.2016.7738767.