

Badania funkcjonalne generatora udarów do prób odporności awioniki

Streszczenie. Przeprowadzono badania funkcjonowania generatora przeznaczonego do prób odporności awioniki pojedynczymi udarami napięciowymi i prądowymi odwzorowującymi zagrożenie zaburzeniami powstającymi w czasie wyładowań piorunowych. Obiektem poddanym próbom był wybrany zasilacz komputerowy. Wyniki badań potwierdziły właściwości i parametry generatora gwarantowane przez jego wytwórcę, a także zgodność tych parametrów z wymaganiami normy DO-160. Pozwoliły również na ocenę odporności badanego zasilacza na udary napięciowe i prądowe oraz umożliwiły identyfikację charakteru impedancji jego obwodu wejściowego.

Abstract. Functional investigations were conducted of generator dedicated for immunity tests of avionics with voltage and current single strokes representing the threat coming from disturbances caused by lightning discharges. Selected computer supplier was the tested object. Investigation results confirmed the characteristics and parameters of the generator guaranteed by the manufacturer, and also the conformity of these parameters with the DO-160 standard requirements. The results also allowed to evaluate the immunity of tested supplier to voltage and current surges, and they enabled to identify the character of its input circuit impedance. (**Functional investigations of surge generator for immunity tests of avionics**).

Słowa kluczowe: awionika, odporność na zaburzenia, próby udarami napięciowymi i prądowymi.

Keywords: avionics, immunity to disturbances, tests with voltage and current surges.

doi:10.12915/pe.2014.01.34

Wstęp

Wśród wielu typów wyładowań atmosferycznych można wyróżnić wyładowania doziemne oraz wyładowania w chmurach. W pierwszym przypadku wyładowania są inicjowane liderami odgórnymi (tereny równinne) lub oddolnymi (tereny góryste, wysokie obiekty). Wyładowania w chmurach wiążą się z przepływem ładunku w obrębie jednej chmury lub między chmurami [1].

Efekty w postaci zaburzeń pola elektromagnetycznego dla tych dwóch rodzajów wyładowań są różne. Decyduje o tym wiele czynników. Charakter przebiegu poszczególnych faz wyładowania zależy od warunków lokalnych, które mogą decydować np. o rozwoju wstępnego wyładowania skokowego. Będą mieć wpływ na jego parametry, np. długość pojedynczego skoku, czas pomiędzy skokami, średnia prędkość rozwoju lidera, wartość prądu. Wpływ na kształt przebiegu pola elektrycznego ma długość kanału, która dla wyładowań doziemnych wynosi kilka kilometrów, a wewnątrz chmury poniżej 1 km. Z tego powodu w przebiegach prądu wyładowania w chmurach uwidacznia się obecność składowych o wyższych częstotliwościach [2].

Wpływ zaburzeń generowanych przez wyładowania atmosferyczne na pracę urządzeń elektrycznych i elektronicznych zależy od ich odległości od kanału wyładowania. Od tej odległości zależą zarówno wartości szczytowe, jak i kształty przebiegów natężenia pola elektrycznego oraz indukcji magnetycznej [1]. Na zaburzenia spowodowane wyładowaniami w chmurach najbardziej narażone są statki powietrzne i inne obiekty znajdujące się w pobliżu. Narażone na te zaburzenia mogą być także czułe urządzenia pracujące na powierzchni ziemi. Podobnie, wyładowania doziemne zagrażają nie tylko obiektom naziemnym, ale i statkom powietrznym, szczególnie podczas ich startu i lądowania.

Jedną z grup urządzeń narażonych na efekty wyładowań atmosferycznych są elementy wyposażenia statków powietrznych, a w tym szczególnie awionika. Szacuje się, że średnio raz na 1000 godzin lotu samolotu cywilnego dochodzi do wyładowania atmosferycznego bezpośrednio w jego poszycie [3]. W zależności od miejsca kontaktu kanału wyładowania z elementami kadłuba oraz parametrów samego kanału piorunowego, stopień ryzyka uszkodzeń elementów awioniki bądź ich nieprawidłowej pracy jest różny. Efektem wieloletnich badań są liczne publikacje dotyczące wyładowań atmosferycznych z udziałem statków powietrznych, np. [4-7], a przede

wszystkim wytyczne oraz normy określające warunki, procedury oraz sprzęt niezbędny do przeprowadzenia testów odporności awioniki na przepięcia atmosferyczne, m.in. [8-12].

Przebiegi napięcia i prądu probierczego

Jedną z norm stosowanych w lotnictwie cywilnym jest aktualizowana sukcesywnie przez Radio Technical Commission for Aeronautics (RTCA) norma DO-160 [8], która jest także podstawą dla bardziej szczegółowych wytycznych opracowywanych przez producentów samolotów, m.in. takich jak Boeing i Airbus. Wymagania i zalecenia dotyczące badań odporności awioniki na przepięcia atmosferyczne ujęte są w tej normie w sekcji 22 (Lightning induced transient susceptibility) oraz 23 (Lightning direct effects). Treść sekcji 23 określa warunki testów symulujących bezpośrednie działanie prądu piorunowego na cały statek powietrzny. Sekcja 22 zawiera zaś opis badań odzwierciedlających pośrednie efekty wyładowania piorunowego - pojawienie się indukowanych przebiegów napięcia i prądu.

W badaniach odporności awioniki na pośrednie efekty wyładowania rozróżnia się trzy rodzaje przebiegów probierczych [8]:

- udar pojedynczy (Single Stroke),
- udar wielokrotny (Multiple Stroke),
- ciąg impulsów (Multiple Burst).

Próby wymienionymi przebiegami stosowane są do określenia zarówno odporności udarowej poprzez badania o charakterze niszczącym, jak i weryfikacji poprawności pracy urządzenia przy określonym poziomie zaburzenia - badanie kompatybilności elektromagnetycznej.

Mimo faktu, że w obecności rzeczywistych zaburzeń generowanych przez pioruny, przebiegi pojawiające się w instalacji statku powietrznego są bardzo złożone, uznano przedstawiony wyżej podział przebiegów probierczych jako bardziej praktyczny dla celów projektowych i weryfikacyjnych. Dopuszczalne jest przeprowadzenie prób oddzielnie dla każdego rodzaju przebiegów i przyjęcie wyniku końcowego jako superpozycji wyników cząstkowych. W normie DO-160 przyjęto następujące kształty (WF - WaveForm) przebiegów probierczych [8]:

- WF1 6,4/69 μ s - udar prądowy,
- WF2 0,1/6,4 μ s - udar napięciowy,
- WF3 1 MHz lub 10 MHz - przebieg prądowy lub napięciowy,

- WF4 6,4/69 μ s - udar napięciowy,
- WF5A 40/120 μ s oraz WF5B 50/500 μ s - udary prądowe lub napięciowe.

Udar prądowy WF1 6,4/69 μ s (narastający do wartości szczytowej w ciągu 6,4 μ s i opadający do połowy tej wartości w czasie 69 μ s) jest odzwierciedleniem zjawiska wnikania pola magnetycznego, jako efektu wyładowania pobliskiego, przez wszelkiego rodzaju szczeliny konstrukcyjne, np. okna. Prąd jest indukowany w nieosłoniętych wiązkach przewodów oraz elementach poszycia samolotu. Udar napięciowy WF2 0,1/6,4 μ s (narastający w ciągu 0,1 μ s i opadający do zera w ciągu 6,4 μ s), odpowiadający pochodnej udaru prądowego, ma symulować przepięcia indukowane w pętlach utworzonych przez przewody i konstrukcję samolotu. Prądowy lub napięciowy przebieg WF3 jest gasnącą falą sinusoidalną, której częstotliwości dobrano tak, aby symulować zjawiska rezonansów w kablach, a w rzeczywistości częstotliwości te wynikają z długości przewodów bądź elementów konstrukcyjnych samolotu. Udar WF4 symuluje spadki napięcia na rezystancji materiału poszycia samolotu i ma taki sam kształt jak przebieg WF1. Udar prądowy WF5A symuluje prąd indukowany w ekranach wiązek kablowych, których końce z obu stron są połączone z konstrukcją samolotu wykonaną z aluminium. Natomiast udar WF5B jest stosowany, kiedy materiałem konstrukcyjnym jest włókno węglowe. Wtedy, w porównaniu do szkieletu aluminiowego, przebieg prądu w wiązkach wewnętrznych wydłuża się wyraźnie a amplituda rośnie znacząco [10,13].

Podczas wyładowania atmosferycznego po pierwszym wyładowaniu głównym może dochodzić do kolejnych, pod warunkiem, że nie nastąpi degradacja kanału piorunowego. Wyładowania kolejne poprzedzane liderami strzałowymi lub strzałowo-skokowymi rejestrowane są średnio co 50 ms. Ich liczba zależy od warunków lokalnych i wynosi od kilku do nawet kilkudziesięciu. Wyposażenie statków powietrznych poddaje się badaniom na wpływ udarów wielokrotnych (MS - multiple stroke), gdzie zgodnie z normą DO-160 pierwsze wyładowanie główne symulowane jest przez udar WF1, po którym następuje 13 udarów o wartości szczytowej nie większej niż 50% amplitudy pierwszego udaru.

Efektom wyładowań wewnątrz chmur oraz pomiędzy nimi, tzn. efektem wydłużania się lidera i jego rozgałęzień, są zaburzenia w postaci zmian pola elektromagnetycznego, których skutki działania na statek powietrzny symuluje się poprzez wprowadzanie zdefiniowanych ciągów impulsów wielokrotnych (MB - multiple burst). Na ciąg impulsów MB składają się 3 pojedyncze wiązki w odstępach 30 - 300 ms. Te z kolei złożone są z 20 impulsów o kształcie WF3 i częstotliwości 1 MHz lub 10 MHz, opóźnionych względem siebie o 50 - 1000 μ s. Przebieg oscylacyjny tłumiony WF3 jest pochodną pola magnetycznego wyładowania.

Metody wprowadzania przebiegów probierczych

Wybór przebiegów probierczych oraz ich parametrów zależy przede wszystkim od lokalizacji testowanego urządzenia na statku powietrznym, położenia innych urządzeń współpracujących z nim oraz ułożenia wiązek przewodów przyłączonych do niego. Jednym z takich parametrów jest poziom narażeń - wartości szczytowe udarów, które powinno wytrzymać badane urządzenie.

Rozróżnia się dwa sposoby wprowadzania przebiegów probierczych do obwodów badanego urządzenia:

- bezpośrednie wprowadzanie do przewodów (*pin injection*),
- wprowadzanie do wiązek przewodów z wykorzystaniem sprzężenia magnetycznego (*cable bundle induction*) [8].

Pierwszy z tych sposobów polega na sprzęganiu obwodu wyjściowego generatora przebiegów udarowych z przyłączami zasilania lub komunikacji badanego

urządzenia. W przypadku konieczności wykonania badań narażeń obwodu zasilania urządzenia pracującego niezbędne jest zastosowanie specjalnych układów sprzęgających i odsprzęgających, żeby nie obciążać generatora impedancją sieci zasilającej oraz nie wprowadzać zaburzeń do innych urządzeń przez wspólny obwód zasilania. Drugi sposób nie wymaga galwanicznego połączenia obwodu wyjściowego generatora z badanym obiektem. Jest alternatywą dla narażeń przez wstrzykiwanie do zacisków, szczególnie wygodną, kiedy istnieje wiele przewodów i połączeń dochodzących do badanego urządzenia. Wtedy narażeniu poprzez specjalny transformator sprzęgający poddać można od razu całą wiązkę przewodów połączoną z badanym obiektem i ewentualnymi urządzeniami peryferyjnymi [3, 10].

Wykonanie testów symulujących bezpośrednie wyładowanie piorunowe do badanego obiektu wymaga użycia bardzo drogiego sprzętu, przede wszystkim generatorów o prądzie szczytowym sięgającym 200 kA. Drugą ważną przeszkodą jest odpowiednio duża przestrzeń laboratoryjna niezbędna do pomieszczenia samego statku powietrznego oraz sprzętu do wykonania prób udarowych. Dlatego częściej stosuje się testy ujęte w sekcji 22 normy DO-160. W celu określenia reakcji badanego urządzenia na przebiegi probiercze potrzebne jest stosunkowo niewielkie stanowisko laboratoryjne oraz generatory o znacznie mniejszych energiach. Takie warunki spełnia utworzone niedawno w Politechnice Rzeszowskiej Laboratorium przeciwprzepięciowych badań awioniki, wyposażone w kompletne stanowisko do badań awioniki według normy RTCA/DO-160 (Seksja 22).

Układ probierczo-pomiarowy

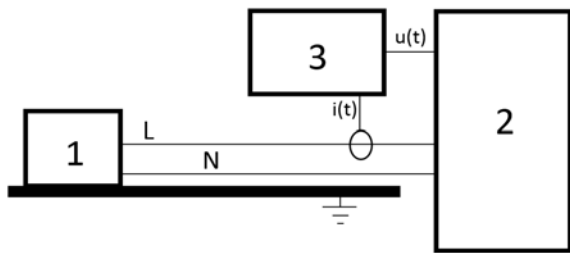
Do pierwszych prób na zbudowanym stanowisku laboratoryjnym, jako urządzenie badane, wybrano zasilacz komputerowy klasy ATX, a jako sposób sprzęgania narażeń - metodę *pin injection*. Przedstawiony na rysunku 1 i 2 układ probierczy jest przeznaczony do badań wytrzymałości portów wejściowych oraz wyjściowych urządzeń na udary napięciowe przy bezpośrednim sprzęganiu przebiegów probierczych do wybranych zacisków przyłączy badanego obiektu zgodnie z normą DO-160. Urządzenie badane ustawione jest na uziemionej aluminiowej płycie leżącej na drewnianym stole. Stalowa obudowa urządzenia jest galwanicznie połączona z lokalną ziemią odniesienia - płytą aluminiową. Obwód wyjściowy generatora połączono przewodami wysokonapięciowymi z zaciskami N i L przyłącza zasilania badanego urządzenia. Na jednym z przewodów wysokonapięciowych umieszczono sondę prądową. W czasie prób badany zasilacz nie był zasilany a jego wyjścia niskonapięciowe nie były obciążone. W celu pomiaru przebiegów prądu i napięcia w wyjściowym obwodzie generatora udarowego wykorzystano dostępne na jego przednim panelu wyjścia pomiarowe napięciowe i prądowe. Do tych wyjść przyłączono oscyloskop cyfrowy i rejestrowano badane przebiegi.

Do badań zastosowano nowoczesny generator pojedynczych udarów MIG0618SS [14] dedykowany do testów zgodnych z wymogami normy DO-160. Zakresy wartości szczytowych wybranych udarów napięciowych wytwarzanych przez ten generator przedstawiają się następująco:

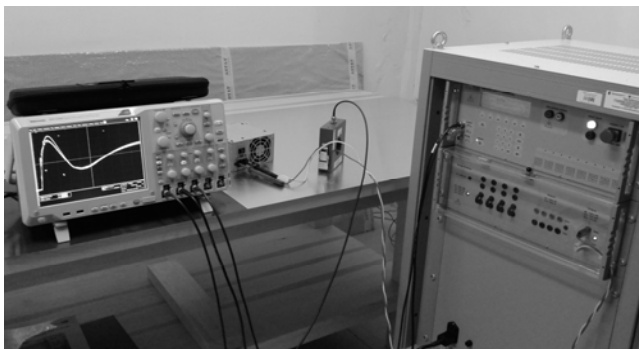
- WF4 6,4/69 μ s: 125...3200 V przy impedancji generatora $Z_g = 5 \Omega$,
- WF4 40/120 μ s: 125...3200 V przy impedancji generatora $Z_g = 1 \Omega$.

Generator jest wyposażony w wbudowany układ pomiarowy prądu oraz napięcia w obwodzie wyjściowym cechujący się dokładnością $\pm 3\%$, którego wyjścia BNC

znajdują się na przednim panelu. Istnieje możliwość obsługi ręcznej lub automatycznej generatora, dodatkowo z funkcją zdalnej komunikacji.



Rys. 1. Schemat blokowy układu probierczo-pomiarowego: 1) obiekt badany, 2) generator udarów prądowych, 3) oscylloskop cyfrowy

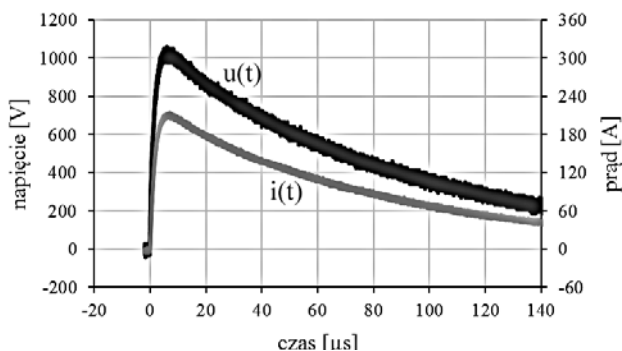


Rys. 2. Widok układu probierczo-pomiarowego

Do rejestracji przebiegów służył czterokanałowy oscylloskop cyfrowy DPO5204, o częstotliwości próbkowania 10 GS/s oraz szerokości pasma 2 GHz. Dodatkowo do pomiaru prądu w obwodzie wyjściowym generatora wykorzystano sondę prądową Pearsona 3525 o czułości 0,1 V/A, dokładności 1% dla pasma 5 Hz - 15 MHz oraz maksymalnym prądzie chwilowym 5 kA.

Przebieg i wyniki badań

W ramach badań wykonano podstawowe badania zasilacza komputerowego bezpośrednio narażając zaciski wejściowe jego obwodu zasilania. Między zacisk fazowy i neutralny wprowadzano kolejno udary napięciowe WF4 6,4/69 μ s oraz WF5A 40/120 μ s, o wartościach szczytowych: 125 V, 300 V, 500 V, 750 V, 1 kV i 1,5 kV, z zastosowaniem obu polaryzacji. Przed badaniem zasilacza, przeprowadzano kalibrację generatora dla każdej kolejnej nastawy, obserwując kształty i wartości szczytowe rejestrowanego prądu i napięcia dla otwartego i zwartego jego obwodu wyjściowego. Na rysunku 3 przedstawiono



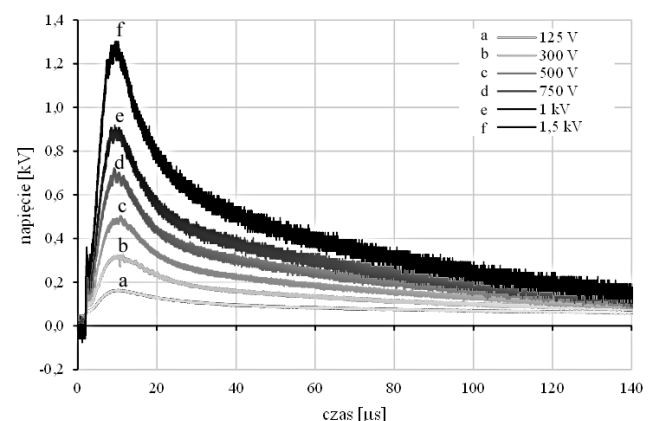
Rys. 3. Przebieg prądu dla zamkniętego, oraz przebieg napięcia dla otwartego obwodu wyjściowego generatora (wartość szczytowa 1 kV) zarejestrowane podczas kalibracji dla udaru WF4 6,4/69 μ s

wybrane, uzyskane w czasie kalibracji, przebiegi napięcia dla otwartego, oraz przebiegi prądu dla zwartego obwodu wyjściowego generatora.

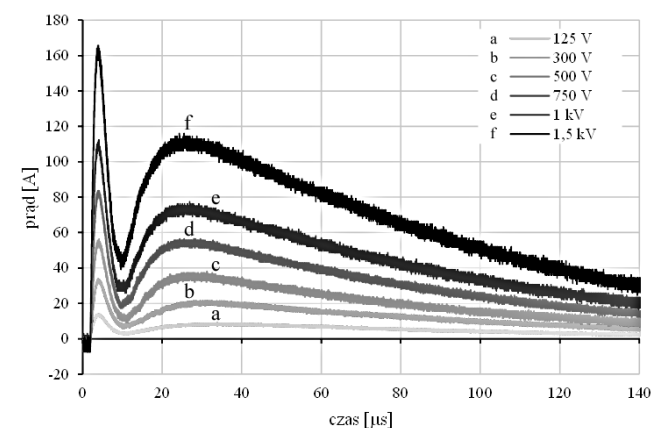
Wyniki obserwacji przebiegów potwierdziły deklarowane przez producenta generatora kształty i wartości szczytowe udarów. Przy impedancji wyjściowej generatora równej $Z_G = 5 \Omega$ dla przebiegu 6,4/69 μ s należało spodziewać się, przy zwartych zaciskach wyjściowych generatora, prądu o kształcie zbliżonym do przebiegu 6,4/69 μ s oraz szczytowej wartości $I_{SC} = 0,2U_{OC}$. Dla napięcia szczytowego w otwartym obwodzie $U_{OC} = 1000$ V, prąd I_{SC} powinien wynosić 200 A (tolerancja błęd: +10%, -0%). Wartość odczytana z zarejestrowanego przebiegu mieści się w dopuszczalnym zakresie.

W trakcie prób zaobserwowano pojawienie się dodatkowych oscylacji w przebiegu prądu na wyjściu układu pomiarowego generatora. Z tego powodu zrezygnowano z odczytu prądu z wyjścia układu pomiarowego generatora, a zastosowano sondę prądową. Problem oscylacji został wyeliminowany, natomiast w rejestrowanych przebiegach prądu i napięcia pozostał znaczny szum, który widać na rysunku 3. Jego przyczyną może być niewystarczająca dokładność układu do pomiaru napięcia i prądu, zaburzenia indukowane w przewodach pomiarowych BNC lub niewłaściwe skalowanie oscylloskopu.

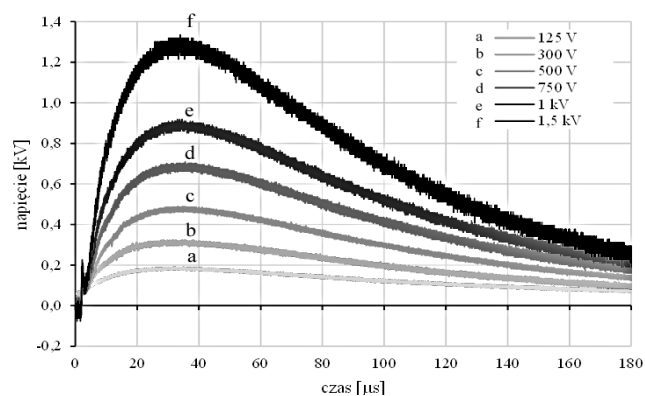
Kolejnym etapem badań było przeprowadzenie serii prób dla obu kształtów udarów, różnych poziomów napięć (ustalanych dla otwartego obwodu wyjściowego generatora) przy polaryzacji dodatniej. Zarejestrowane przebiegi przedstawiono na rysunkach 4, 5, 6 i 7.



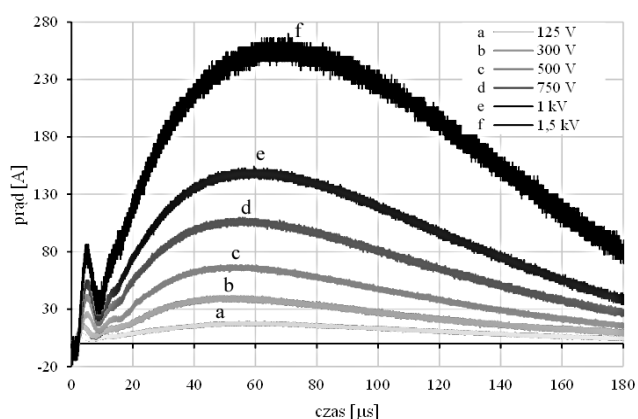
Rys. 4. Przebiegi napięcia dla różnych wartości szczytowych udarów WF4 6,4/69 μ s



Rys. 5. Przebiegi prądu dla różnych wartości szczytowych udarów WF4 6,4/69 μ s

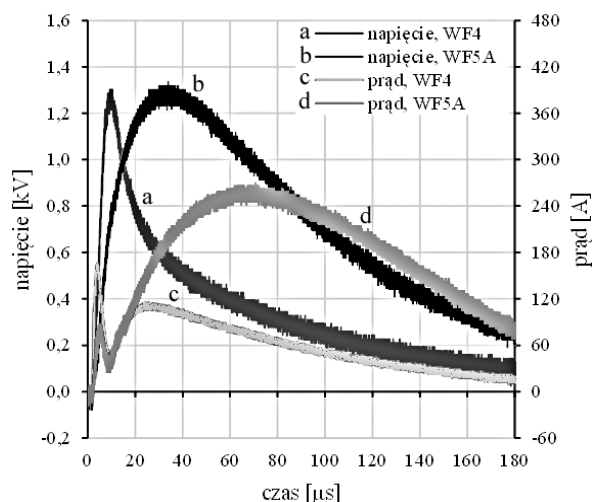


Rys. 6. Przebiegi napięcia dla różnych poziomów udarów WF5A 40/120 μ s

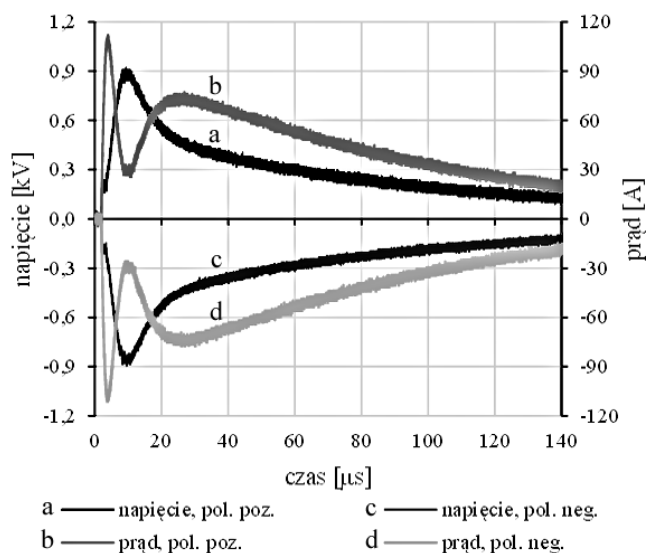


Rys. 7. Przebiegi prądu dla różnych poziomów udarów WF5A 40/120 μ s

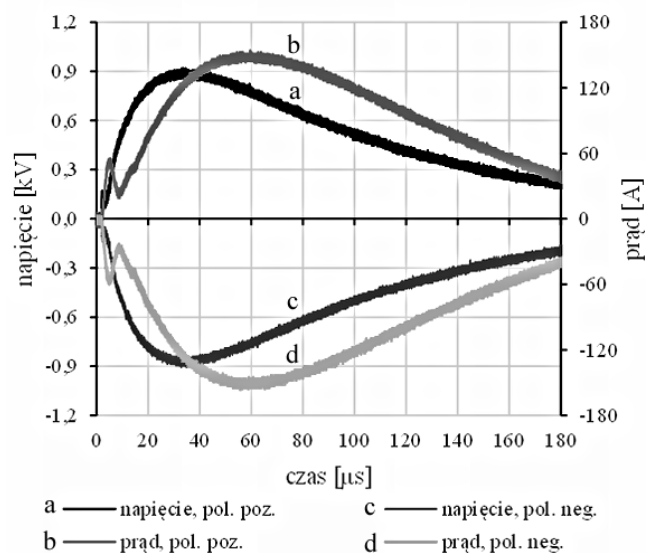
W czasie prób każdym z udarów obserwowano występowanie oscylacji na przebiegach prądu. Większy wpływ na ich amplitudę i tłumienie miały udary o krótszym czole. W zastosowanym zakresie napięć probierczych obwód wejściowy badanego urządzenia okazał się w dużym stopniu liniowy. Nie obserwowano efektów w postaci znacznej zmiany kształtu oraz wartości szczytowej udarów w odniesieniu do spodziewanej. Dla mniej stromego uderu 40/120 μ s przebieg prądu miał większą wartość szczytową niż dla uderu 6,4/69 μ s. Zestawienie przebiegów zarejestrowanych dla obu kształtów udarów przedstawiono



Rys. 8. Porównanie kształtów przebiegów przy badaniu udarami WF4 6,4/69 μ s oraz WF5A 40/120 μ s



Rys. 9. Porównanie przebiegów prądu oraz napięcia dla dwóch polaryzacji uderu WF4 1 kV



Rys. 10. Porównanie przebiegów prądu oraz napięcia dla dwóch polaryzacji uderu WF5A 1 kV

na rysunku 8. W obu przypadkach wartość szczytowa napięcia w obwodzie otwartym wynosiła 1,5 kV. Wartość szczytowa prądu w zamkniętym obwodzie różniła się o ponad 40%.

W czasie badań wykonano także cykl prób udarami napięciowymi o polaryzacji ujemnej. Okazało się, że polaryzacja nie ma istotnego wpływu na kształt i amplitudę przebiegów, rys. 9 i 10.

Wnioski

Przeprowadzono badania zasilacza komputerowego, doprowadzając do zacisków jego obwodu zasilania udary napięciowe o krótszym (6,4/69 μ s) oraz dłuższym (40/120 μ s) czasie trwania. Takim testom poddaje się awionikę zgodnie z normą DO-160. Generator wytwarzający wymienione udary pracował prawidłowo. Jego impedancja wyjściowa i kształty generowanych udarów były właściwe.

Uzyskane wyniki wykazały, że badane urządzenie charakteryzuje się liniową, pojemnościowo-rezystancyjną impedancją wejściową obwodu zasilającego. Stwierdzono, że kształt napięciowego udaru probierczego, przy zadanej wartości maksymalnej, ma wpływ na kształt przebiegu prądu rejestrowanego w obwodzie wyjściowym generatora. Nie zaobserwowano istotnych różnic w przebiegach napięcia i prądu przy stosowaniu uderów o przeciwnych polaryzacjach. Stosowane w próbach udary o napięciach szczytowych do 1,5 kV nie spowodowały uszkodzenia badanego zasilacza.

Projekt został sfinansowany ze środków Narodowego Centrum Nauki.

LITERATURA

- [1] G. Masłowski, Analiza i modelowanie wyładowań atmosferycznych na potrzeby ochrony przed przepięciami, Rozprawy Monograficzne, Wyd. AGH, Kraków, nr. 208 (2010)
- [2] W. Gamera, J. Elismé, M. Uman, V. Rakov, Current Waveforms for Lightning Simulation, *IEEE Trans. on Electromagnetic Compatibility*, 54 (2012), n.4, 880-888
- [3] M. Lutz, R. Casanova, T. Ravesz, Induced Lightning Testing of Avionics – with Single Stroke, Multiple Stroke and Multiple Burst, *Electromagnetic Interference and Compatibility*, 2003. INCEMIC 2003. 8th International Conference on, 333-338
- [4] M. Uman, V. Rakov, The interaction of lightning with airborne vehicles, *Progres in Aerospace Sciences*, 39 (2003), 61-81
- [5] R. Perala, T. Rudolph, F. Eriksen, Electromagnetic Interaction of Lightning with Aircraft, *IEEE Trans. on Electromagnetic Compatibility*, 24 (1982), n.2, 173-203
- [6] A. Nag, V. Rakov, Compact intracloud lightning discharges: 1. Mechanism of electromagnetic radiation and modeling, *Journal of Geophysical Research*, 115 (2010),
- [7] V. Rakov, M. Uman, G. Hoffman, M. Masters, M. Brook, Burst of Pulses in Lightning Electromagnetic Radiation: Observations and Implications for Lightning Test Standards, *IEEE Trans. on Electromagnetic Compatibility*, 38 (1996), n.2, 156-164
- [8] RTCA/DO-160 Environmental Condition and Test Procedures for Airborne Equipment Section 22: Lightning Induced Transient Susceptibility, December 8, 2010
- [9] NO-16-A002:2006: Wojskowe statki powietrzne. Ochrona przed skutkami wyładowania atmosferycznego. Wymagania ogólne, 3 marca 2006

- [10] N. Wright, New technology drives indirect lightning test standards, *Electromagnetic Interference and Compatibility*, 2008. INCEMIC 2008. 10th International Conference on, 26-27 Nov. 2008, 523-530
- [11] N. Wright, M. Lutz, Developments in the field of avionics testing equipment, *Electromagnetic Interference and Compatibility*, 2006. INCEMIC 2006. 9th International Conference on, 23-24 Feb. 2006,
- [12] J. Plumer, System Functional Upset Testing of Aircraft Electrical and Avionic System: How to Approach the Planning and Conduct of the Test, *International Conference on Lightning and Static Electricity (ICOLSE) 2003*,
- [13] L. West, Allocating Indirect Lightning to Cables & Boxes at Program Inception. Application of Ohm's Law, Kirchhoff's Laws, Faraday's Law & Scaling by Geometric, Electrical, & Spectral Parameters, Interaction Note 617, April 2011, <http://www.ece.unm.edu/summa/notes/In/IN617.pdf>
- [14] Aircraft Electronic Tester MIG06180SS, EMC Partner AG, Laufen Switzerland 2010
- [15] PN-EN 61000-4-5:2010, Kompatybilność elektromagnetyczna (EMC). Metody badań i pomiarów. Badanie odporności na udary, maj 2010

Autorzy: mgr inż. Kamil Filik, Politechnika Rzeszowska, Wydział Elektrotechniki i Informatyki, Katedra Elektrotechniki i Podstaw Informatyki, ul. W. Pola 2, 35-959 Rzeszów, E-mail: kfilik@prz.edu.pl; mgr inż. Grzegorz Karnas, Politechnika Rzeszowska, Wydział Elektrotechniki i Informatyki, Katedra Elektrotechniki i Podstaw Informatyki, E-mail: gkarnas@prz.edu.pl; dr hab. inż. Grzegorz Masłowski, prof. PRz, Politechnika Rzeszowska, Wydział Elektrotechniki i Informatyki, Katedra Elektrotechniki i Podstaw Informatyki, E-mail: masloprz@prz.edu.pl; dr inż. Stanisław Wyderka, Politechnika Rzeszowska, Wydział Elektrotechniki i Informatyki, Katedra Energoelektroniki i Elektroenergetyki, ul. W. Pola 2, 35-959, E-mail: swyderka@prz.edu.pl; dr inż. Robert Ziemba, Politechnika Rzeszowska, Wydział Elektrotechniki i Informatyki, Katedra Elektrotechniki i Podstaw Informatyki, E-mail: ziemba@prz.edu.pl.