

Badanie odporności zespołów awioniki statków powietrznych na narażenia LEMP

Streszczenie. Przedstawiono efekty wyładowań atmosferycznych oddziałujących na statki powietrzne oraz procedurę badań odporności zespołów awioniki na efekty pośrednie obserwowane w ich obwodach. Scharakteryzowano metody weryfikacji podatności urządzeń elektrycznych i elektronicznych na zaburzenia przejściowe powstające w instalacji statku powietrznego. Zaprezentowano przykładowe badanie podatności pracującego zasilacza impulsowego na zaburzenia indukowane w jego obwodzie zasilania. Wykorzystano stanowisko z generatorem pojedynczych udarów napięciowych dostępne w Laboratorium przepięciowych badań awioniki w Politechnice Rzeszowskiej, dedykowane do badań zgodnych z normą DO-160.

Abstract. Lightning effects observed on aircraft wiring and procedure of lightning immunity tests of avionics were presented. Verification methods of susceptibility to induced transients have been characterized. Exemplary immunity test of powered SMPS power supply with the use of cable bundle method was performed. The test stand with single stroke generator available in the Laboratory of lightning immunity tests of avionics at Rzeszow University of Technology was used. It is dedicated to conduct tests according to DO-160 standard. In the future it is planned to carry out a series of test to obtain input surge impedances. (**LEMP immunity test of aircraft avionics**).

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

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

doi:10.12915/pe.2014.10.15

Wstęp

Zapewnienie kompatybilności elektromagnetycznej oraz właściwej ochrony przeciwprzebiegowej jest ważną częścią procesu projektowania i certyfikacji statków powietrznych (SP). Badanie odporności awioniki na zaburzenia elektromagnetyczne jako następstwa wyładowania atmosferycznego jest procesem złożonym. W wyniku wieloletnich badań opracowane zostały znormalizowane przebiegi napięciowe i prądowe [1-3], które służą do opisu i symulacji zjawisk, jakie zachodzą w wyniku działania na statek powietrzny przepływu prądu piorunowego i propagacji impulsu elektromagnetycznego LEMP (ang. *Lightning ElectroMagnetic Pulse*) towarzyszącego wyładowaniom atmosferycznym.

Przez odporność pojedynczych elementów, urządzeń, zespołów urządzeń lub całego systemu na efekty wywołane wspomnianymi zjawiskami można rozumieć taki poziom narażeń elektrycznych lub elektromagnetycznych, którego przekroczenie objawia się nieprawidłową pracą lub ich całkowitym uszkodzeniem.

Efekty wyładowań atmosferycznych obserwowane w obwodach statków powietrznych

Wśród wielu istniejących klasyfikacji wyładowań atmosferycznych, jakie oddziałują na statek powietrzny można wyróżnić wyładowania doziemne (odgórne lub oddolne – inicjowane liderem skierowanym od ziemi do chmury) i wyładowania w chmurach (wewnątrz chmury lub pomiędzy chmurami). W stosunku do tego, jaką polaryzację ma neutralizowany ładunek w chmurze wskazać można dodatnie lub ujemne wyładowanie atmosferyczne [4]. Wraz ze zmianą lokalizacji narażanego obiektu względem obszaru wyładowania modyfikacji ulegają wartości szczytowe i kształt prądu piorunowego oraz składowych pola elektromagnetycznego. Wzrost odległości statku powietrznego od kanału piorunowego skutkuje przede wszystkim zmniejszeniem ich wartości maksymalnych. Od długości samego kanału zależeć będzie charakter zmian pól. Dlatego pole elektromagnetyczne powstałe podczas wyładowań w chmurach, gdzie długość kanału jest kilkukrotnie mniejsza niż przy wyładowaniach doziemnych, posiada składowe o wyższych częstotliwościach [5].

Wobec powyższego przepływ prądu piorunowego podczas wyładowania atmosferycznego niesie ze sobą

powstanie różnego rodzaju efektów obserwowanych w SP. Są one dostrzegane od razu w postaci uszkodzeń płatownia lub wyposażenia SP, chwilowych przerw w poprawnym funkcjonowaniu urządzeń. Bywa też, że o ich obecności świadczą jedynie zapisy odpowiednich rejestratorów. Można je podzielić na dwie zasadnicze grupy [1]:

- skutki bezpośrednie (*direct effects*),
- następstwa wtórne (*indirect effects*).

Pierwsza z nich to zjawiska towarzyszące bezpośredniemu kontaktowi kanału piorunowego z płatowncem. Działanie przepływającego przez elementy konstrukcyjne prądu piorunowego doprowadza często do mechanicznych, cieplnych lub elektrycznych uszkodzeń fragmentów płatownca, wyposażenia albo instalacji elektrycznej. Jako przykład wskazać można różnego rodzaju przetopienia, wypalenia, wżery, rozwarstwienia materiału, działanie dynamiczne sił, iskrzenie. Każda z usterek wpływa na bezpieczeństwo lotu, a niektóre doprowadzają bezpośrednio do skutków katastrofalnych, np. iskrzenie w zbiorniku paliwa.

Druga grupa efektów to pośrednie następstwa przepływu prądu piorunowego oraz działania impulsu LEMP, które skutkują pojawieniem się w instalacji elektrycznej statku indukowanych zaburzeń w postaci przebiegów prądowych i napięciowych. Nie zawsze obserwacji niebezpiecznych przepięć musi towarzyszyć bezpośredni kontakt kanału piorunowego z płatowncem. Zjawisko to może wywołać samo działanie impulsu LEMP od wyładowania pobliskiego. Mimo, że obecność efektów pośrednich nie jest od razu tak widoczna jak w przypadku bezpośrednich skutków wyładowania atmosferycznego, doprowadzić mogą one tak samo do sytuacji utraty bezpieczeństwa lotu, jeśli dojdzie do awarii krytycznych obwodów.

Procedury badań odporności zespołów awioniki na oddziaływanie LEMP

Określenie odporności wyposażenia elektrycznego i elektronicznego SP na wtórne efekty wyładowania atmosferycznego jest procesem złożonym. W celu odzwierciedlenia rzeczywistych zjawisk towarzyszących wyładowaniom atmosferycznym z udziałem SP konieczne było przyjęcie znormalizowanych składowych prądu wyładowań doziemnych i wyładowań w chmurach. Służą

one do opisu i symulacji zarówno bezpośrednich jak i pośrednich efektów wyładowań. Każdy fragment płatowca narażony jest w rzeczywistości prądem o różnych składowych. Wynikiem takiego zróżnicowania jest podział SP na strefy. Ma to znaczenie przede wszystkim ekonomiczne. Korzysta się z istnienia naturalnie lepiej chronionych przed niekorzystnymi zjawiskami przestrzeni płatowca, przewidując instalację w nich ważnych pod względem bezpieczeństwa komponentów, np. podzespołów odpowiedzialnych za poprawną pracę i sterowanie silnikami. Zaoszczędza się w ten sposób na kosztach i ciężarze dodatkowych środków ochrony przeciwprzebiegowej.

Działanie impulsu LEMP symulowane jest laboratoryjnie prądem o wybranych parametrach przepływającym przez określone fragmenty SP. Na podstawie korelacji lokalizacji obwodów krytycznych z określonymi strefami SP ustala się zestaw prób udarowych przewidzianych do wykonania przy zadanych drogach przepływu prądu, złożonego z dedykowanych znormalizowanych składowych. Zalecane byłoby, aby badania takie na każdym etapie projektowym i wykonawczym SP odbywały się przy zachowaniu szczytowych wartości przebiegów przyjętych dla określonego komponentu prądu piorunowego. Wymaga to jednak, oprócz odpowiedniej przestrzeni laboratoryjnej, drogich generatorów o dużej energii i wysokim napięciu. Zastępczo wykonuje się badania przy niższych wartościach szczytowych prądów, zakładając liniowość zjawiska, a ich wyniki odpowiednio skaluje. Podczas prób udarowych należy zadbać, aby zminimalizować wpływ przewodów powrotnych, które najczęściej układa się symetrycznie względem SP i możliwie jak najdalej od niego. Badania przeprowadzane są dla kompletnej instalacji z zasymulowanymi stanami pracy, jak w czasie lotu, co najczęściej sprowadza się do rejestracji prądów dla zwartych i napięć dla rozwartych obwodów bez udziału docelowych urządzeń awioniki.

Dla każdego obwodu krytycznego wyindukowane zaburzenia dla każdej z konfiguracji (dróg) przepływu prądu są porównywane pod względem szczytowych wartości i poprzez wybranie przebiegu o poziomie najwyższym, wskazywany jest rzeczywisty poziom przebiegów przejściowych ATL (ang. *Actual Transient Level*). Następnie dla każdego z nich przyjmuje się najbliższy znormalizowany poziom przebiegu przejściowego TCL (ang. *Transient Control Level*) i po uwzględnieniu odpowiedniego marginesu bezpieczeństwa stawia się wymagania co do minimalnego poziomu odporności urządzenia ETDL (ang. *Equipment Transient Design Level*). Instalowane w danym obwodzie wyposażenie musi pracować poprawnie nawet przy zaburzeniu o poziomie równym ETDL. Eksperymentalna weryfikacja rzeczywistego poziomu podatności urządzenia EDSL (ang. *Equipment Transient Susceptibility Level*) jest ostatnim z etapów procedury badań odpornościowych awioniki.

Metody weryfikacji podatności urządzeń na sygnały przejściowe w instalacji SP

Bez względu na to, czy próg ETDL został wyznaczony poprzez badanie przy właściwych dla składowych, czy też obniżonych, szczytowych wartościach prądów, urządzenia, które mają pracować w określonym obwodzie, należy poddać badaniom odporności na zestaw przebiegów o określonych poziomach ETDL. Testy takie wykonuje się przy użyciu dedykowanych generatorów impulsów napięciowych i prądowych. Symulowanemu działaniu sygnałów przejściowych poddaje się zwykle pojedyncze urządzenia lub ich zespoły – EUT (ang. *Equipment Under Test*) [3].

Zaletą takiego podejścia jest oszczędność przestrzeni laboratoryjnych i kosztów związanych z utrzymaniem aparatury do wykonywania prób na pełnym SP. Dochodzi tu jeszcze aspekt globalny przemysłu lotniczego. Dzięki standaryzacji badań produkcja podzespołu może odbywać się w innym miejscu na świecie niż jego certyfikacja i innym niż docelowy montaż, co - poprzez konkurencyjność - prowadzi do obniżenia kosztów.

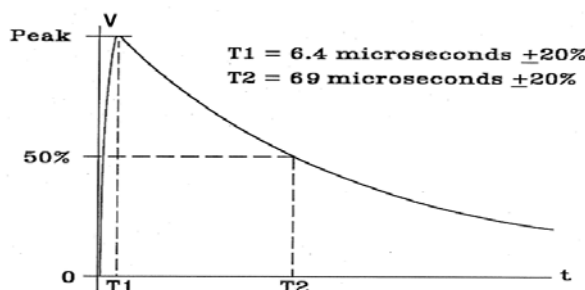
Podatność urządzeń na zaburzenia określana może być jako poziom, przy którym dochodzi do zakłócenia w pracy urządzenia (np. w komunikacji z peryferiami), ustępującego po ustaniu przebiegu przejściowego w instalacji lub ma miejsce całkowite bezpowrotne uszkodzenie. Wobec czego często wymaga się wprowadzania zaburzeń w trakcie pracy EUT. Rozróżnić można dwa sposoby sprzężenia zaburzeń przejściowych do obwodów badanej awioniki [6-8]:

- bezpośrednie narażanie portów zasilania lub sterowania (ang. *pin injection*),
- indukowanie zaburzeń we wiązkach przewodów dochodzących do EUT (ang. *cable bundle induction*).

Znormalizowane przebiegi testowe

Wpływ poszczególnych efektów pośrednich wyładowania atmosferycznego odzwierciedlają przyjęte prądowe i napięciowe przebiegi testowe. Ich parametry są określane między innymi przez normę RTCA/DO-160 w sekcji 22 (*Lightning induced transient susceptibility*). Punktem wyjścia do opracowania przebiegów, jakie służą do określenia poziomów EDSL było określenie znormalizowanych składowych A, B, C, D prądu wyładowania doziemnego oraz H – odzwierciedlającej wyładowania w chmurach [1-3]. Przy symulacji efektów pośrednich najczęściej pomijane są komponenty B i C.

Przyjęte kształty (WF – ang. *WaveForm*) mają w pewnym przybliżeniu odwzorować większość zjawisk obserwowanych w instalacji SP. Przebieg prądowy WF1 (narastający do wartości szczytowej w ciągu 6,4 μ s i opadający do połowy tej wartości w czasie 69 μ s) symuluje zjawisko indukowania się prądów w zamkniętych pętlach przewodów na skutek wnikania w głąb płatowca pola magnetycznego. Odpowiada on kształtem składowej A prądu piorunowego. Natomiast podobnie indukowane w otwartych pętlach napięcia są odwzorowywane sygnałem napięciowym WF2 (narastający w ciągu 0,1 μ s i opadający do zera w ciągu 6,4 μ s), którego kształt odpowiada charakterowi zmian pochodnej komponentu A. Zjawisko spadku napięcia na impedancji płatowca przy przepływie przez niego prądu piorunowego (gdzie uwzględnia się głównie rezystancję płatowca) przybliża badanie przy użyciu udaru napięciowego WF4 (rys. 1) o kształcie identycznym jak przebieg WF1 [1,9].



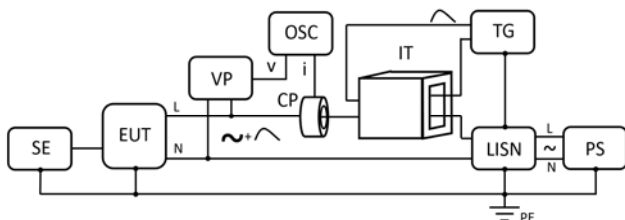
Rys.1. Wyidealizowany przebieg napięciowy WF4 (6,4/69 μ s) [2]

Procesy dyfuzji i redystrybucji pola elektromagnetycznego obserwowane w sytuacji niestacystycznego ekranowania przewodów, np. kiedy płatowiec wykonany jest z kompozytu wzmacnianego włóknem węglowym (CFC), symuluje się udarami

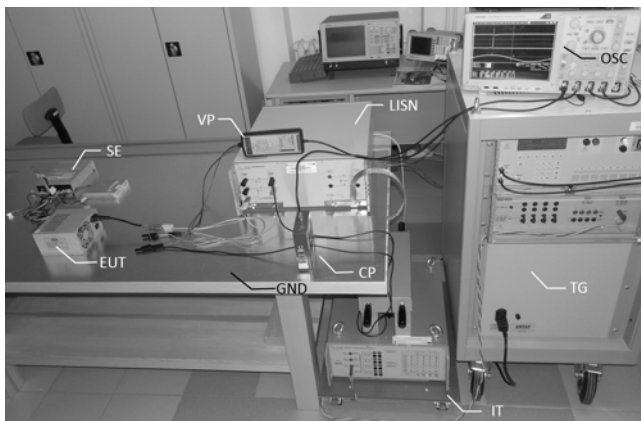
napięciowo-prądowymi WF5A (narastający do wartości szczytowej w ciągu 40 μs i opadający do połowy tej wartości w czasie 120 μs) lub WF5B (50/500 μs). Wymienione sygnały służą do badań odporności na pojedyncze udary. Skutki wyładowania wielokrotnego (ang. *multiple stroke*) odwzorowuje się natomiast poprzez ciąg impulsów, z których pierwszy kształtem odpowiada komponentowi A, natomiast kolejne, o wartości szczytowej odpowiednio niższej od uderu głównego, mają charakter zmian właściwy dla składowej D. Wyładowania w chmurach są źródłem szybkich zmian pola elektromagnetycznego, na które szczególnie podatne są urządzenia elektroniczne. Procesy te symuluje składowa H prądu piorunowego. Efekty wywołane wielokrotnymi uderami wiązkowymi (ang. *multiple burst*) odwzorowuje się badaniem przy pomocy ciągu paczek impulsów. Za pojedynczy impuls przyjęto przebieg oscylacyjny tłumiony WF3H (o częstotliwości 1 lub 10 MHz), a zastępczo stosowany jest sygnał dwuwykładniczy WF6H (0,25/4 μs).

Układ probierczo-pomiarowy do weryfikacji poziomu ETSL

Na rysunku 2 przedstawiono schemat układu na stanowisku do badań odporności urządzeń lub ich zestawu na przebiegi przejściowe będące efektem pośrednim wyładowania atmosferycznego z udziałem SP. Jest to przykład jednej z możliwych konfiguracji układu do badania odporności urządzenia w stanie pracy na pojedynczy udar napięciowy sprzężony w jego obwód zasilania poprzez zjawisko indukcji magnetycznej. Rysunek 3 przedstawia realizację takiego układu. Z wyjścia generatora pojedynczych uderów MIG0618SS (TG) [10] przebieg złożony trafia poprzez przewody wysokonapięciowe na uzwojenie pierwotne transformatora sprzęgającego CN-GI-CI-V (IT). Udar napięciowy indukowany jest w jednym z przewodów zasilających badane urządzenie, który przeprowadzony przez okno transformatora stanowi jego stronę wtórną.



Rys.2. Schemat ideowy układu probierczo-pomiarowego do badań odporności urządzeń na indukowane sygnały przejściowe

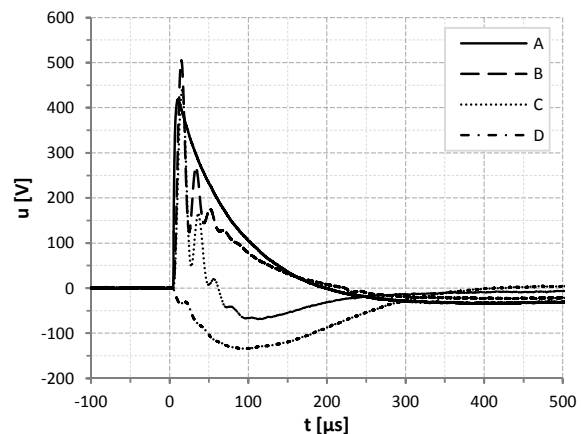


Rys.3. Stanowisko do badań odporności zasilonego urządzenia na pojedynczy udar napięciowy

Badaniu poddano zasilacz impulsowy AC/DC (EUT) połączony z odbiornikami (SE), które ułożono na aluminiowej uziemionej płycie. Zastosowano układ odsprężający DN-LISN160-32 (LISN) w celu zapewnienia ochrony źródła zasilania (PS) przed składowymi o wyższych częstotliwościach oraz zachowania odpowiedniej impedancji strony wtórnej transformatora (IT). Za pomocą oscyloskopu cyfrowego DPO5204 (OSC) rejestrowano prąd oraz napięcie w obwodzie zasilania EUT i obwodzie wyjściowym generatora. Do badania parametrów obwodu zasilania EUT wykorzystano sondę napięciową TT-SI 9010 (VP) oraz sondę prądową I-PROBE-MS (CP). Generator wyposażony jest dodatkowo w wyjścia pomiarowe BNC do monitorowania napięcia i prądu w jego obwodzie wyjściowym.

Przebieg i wyniki badań

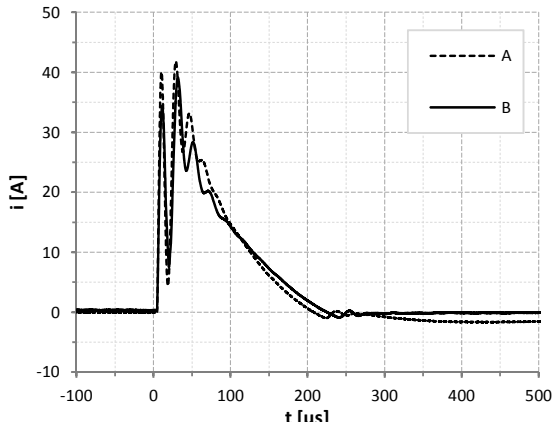
Przedstawione badanie jest wynikiem testów uruchomieniowych stanowiska badawczego tworzonego w ramach Laboratorium Przepięciowych Badań Awioniki Politechniki Rzeszowskiej. Przedstawione rezultaty dotyczą sytuacji, w której zasilony napięciem sieciowym przemiennym 230 V przetwornik impulsowy AC/DC poddano próbie odpornościowej, indukując w obwodzie jego zasilania przebieg złożony napięciowy, powstały przez podanie na uzwojenie pierwotne transformatora sprzęgającego udaru napięciowego o kształcie WF4 (6,4/69 μs) i wartości szczytowej bliskiej 600 V. Przyjęto taki poziom testowy, aby zaprezentować metodologię badania i nie doprowadzić od razu do uszkodzenia obiektu badanego. Kąt synchronizacji udaru z przebiegiem napięcia zasilania ustalono stały i równy 90°, co sprawia, że część przepięcia niewytlumiona przez LISN i odwrócona w fazie w efekcie obniża napięcie sieciowe – brak przepięć w sieci zasilającej. Na rysunku 4 dokonano porównania napięć obserwowanych podczas prób dla różnych stanów pracy obwodu.



Rys.4. Przebiegi napięcia: A) wtórnego transformatora (IT) - stan jałowy, B) na zaciskach badanego obiektu (EUT) – bezpośrednie połączenie ze stroną wtórną transformatora, C) na zaciskach EUT – dołączenie do obwodu wyjściowego IT poprzez sieć odsprężającą (LISN), nie połączoną do źródła zasilania (PS), D) na zaciskach LISN od strony PS – konfiguracja połączeń jak dla sytuacji C

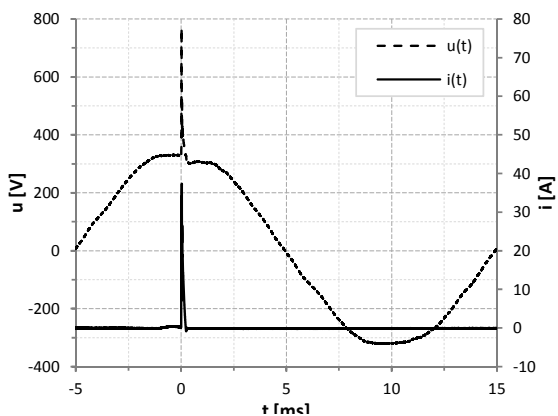
Dla zadanego poziomu napięcia wyjściowego generatora pojedynczych uderów wyindukowany w przewodzie zasilającym EUT (odłączonym od jego wejścia) sygnał przepięciowy (rys. 4, przebieg A) odpowiada kształtem przebiegowi WF4 (6,4/69 μs), a jego wartość szczytowa bliska jest 410 V. Przy braku połączenia z PS (brak wpływu indukcyjności sieci) zauważa się przenoszenie zaburzenia na stronę wejściową sieci

odsprężającej (rys. 4, przebieg D). Jednak obserwacje napięcia sieciowego w czasie prób przy właściwej konfiguracji układu wykazały nieznaczne zmiany jego kształtu. Rysunek 5 obrazuje zestawienie odpowiedzi prądowych w obwodzie wejściowym zasilania EUT. Okazuje się, że kształt tych sygnałów jest bardzo zbliżony, szczególnie w początkowej fazie. Świadczy to o właściwej impedancji obwodu wtórnego transformatora IT zapewnionej przez układ odsprężający LISN.

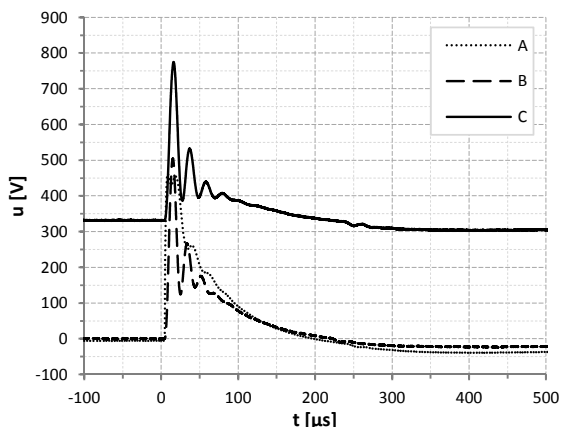


Rys.5. Przebiegi prądu w obwodzie zasilania EUT: A) bezpośrednie połączenie niezasilanego EUT ze stroną wtórną transformatora IT, B) zasilanie urządzenia, poprzez sieć LISN

Uzyskany podczas prób efekt sumowania się napięcia zasilania z testowym udarem napięciowym widać na rysunkach 6 i 7.



Rys.6. Przebiegi napięcia i prądu w obwodzie zasilania badanego urządzenia podczas jednej z prób



Rys.7. Przebiegi napięcia: A) strony pierwotnej transformatora IT – EUT zasilony poprzez LISN, B) strony wtórnego IT – EUT

niezasilony, połączony bezpośrednio z IT, C) strony wtórnego IT – EUT zasilony poprzez LISN

Pierwszy z nich ukazuje zestawienie napięcia i prądu w obwodzie wejściowym zasilacza. Zmiany przebiegu prądowego związane z normalną pracą przekształtnika impulsowego są praktycznie niezauważalne w porównaniu z reakcją na udar napięciowy (wartość szczytowa 100-krotnie wyższa niż dla kształtu przy normalnej pracy). Może to być dodatkowym powodem sytuacji analizowanej na rysunku 5. Planowane są dalsze badania, w których sprawdzone zostanie na ile odpowiedź urządzenia na udar piorunowy zależy od jego stanu pracy (EUT zasilone lub nie) i obciążenia.

Podsumowanie

Rozwój technologii produkcji statków powietrznych (nowe materiały kompozytowe, miniaturyzacja podzespołów, wypieranie techniki analogowej i rozwiązań elektromechanicznych) przyczynia się do wzrostu podatności awioniki na efekty pośrednie wyładowań atmosferycznych. Konieczne jest kontynuowanie badań w zakresie analizy zjawisk przepięciowych oraz ochrony przed nimi. Potwierdzeniem tej potrzeby jest chociażby proces ciągłej modyfikacji wymagań, i metodologii badań odporności statków powietrznych i ich wyposażenia na skutki wyładowań atmosferycznych.

Składam serdeczne podziękowania Panom dr hab. inż. Lesławowi Karpińskiemu, prof. PRz oraz dr hab. inż. Grzegorzowi Masłowskiemu, prof. PRz za cenne uwagi i merytoryczne wsparcie w trakcie opracowywania artykułu.

LITERATURA

- [1] F. A. Fisher, J. A. Plumer, R. A. Perala, Aircraft Lightning Protection Handbook, DOT/FAA/CT-89/22, September 1989
- [2] RTCA/DO-160G Environmental Condition and Test Procedures for Airborne Equipment Section 22: Lightning Induced Transient Susceptibility, December 8, 2010
- [3] NO-16-A002:2006: Wojskowe statki powietrzne. Ochrona przed skutkami wyładowania atmosferycznego. Wymagania ogólne, 3 marca 2006
- [4] G. Masłowski, Analiza i modelowanie wyładowań atmosferycznych na potrzeby ochrony przed przepięciami, Rozprawy Monograficzne, Wyd. AGH, Kraków, nr. 208 (2010)
- [5] M. Uman, V. Rakov, The interaction of lightning with airborne vehicles, *Progress in Aerospace Sciences*, 39 (2003), 61-81
- [6] 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
- [7] 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
- [8] 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
- [9] 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>
- [10] Aircraft Electronic Tester MIG06180SS, EMC Partner AG, Laufen Switzerland 2010

Autor: 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