

Analiza przepięć indukowanych pochodzenia atmosferycznego w systemie nawigacyjno-komunikacyjnym statku powietrznego

Streszczenie. W artykule przedstawiono wstępne rezultaty badań przepięć pochodzenia atmosferycznego, rejestrowanych w zasilonym systemie nawigacyjno-komunikacyjnym statku powietrznego, które prowadzono w Politechnice Rzeszowskiej, w laboratorium przeciwprzepięciowych badań awioniki. Badania wykonano metodą indukcyjnego sprzęgnięcia pojedynczych udarów napięciowych o znormalizowanym kształcie WF4 6,4/69 μ s do jednej z wiązek kablowych badanego zestawu. Pomiarów dokonano przy różnych wariantach uziemienia ekranów przewodów. Rejestrowano przebiegi prądowe i napięciowe indukowane w liniach zasilania oraz sygnałowych – obwodzie komunikacji audio. Wykazano wpływ obecności ekranu oraz sposobu jego podłączenia do uziemienia na wartość szczytową i kształt przebiegów napięciowych i prądowych w badanych obwodach.

Abstract. In this paper, the preliminary results of studies was presented of induced lightning transients in powered NAV/COMM system of the aircraft, conducted at Rzeszow University of Technology, Poland, in laboratory of lightning tests of avionics. The test was perform by coupling standardized voltage waveform WF4 6,4/69 μ s into one selected cable bundle, connected to equipment under test. Measurements using different methods of grounding of cable shields were done. Voltage and current transients, induced in power supply and audio communication lines, were recorded. The influence of cable shield presence and shield grounding method to peak value and shape of transients, induced in observed circuits, was shown. (**Analysis of lightning transients induced in NAV/COMM system of aircraft**)

Słowa kluczowe: wyładowania atmosferyczne, przepięcia atmosferyczne, ochrona odgromowa statków powietrznych, ochrona przepięciowa awioniki.

Keywords: lightning discharges, lightning overvoltages, lightning protection of aircraft, lightning overvoltages protection of avionics.

Wstęp

Bezpośrednie wyładowanie atmosferyczne w statek powietrzny skutkuje przepływem prądu piorunowego przez elementy płatowca oraz wywołuje groźne przepięcia w przewodzących instalacjach. Wyładowanie w niedużej odległości od niego, mimo braku bezpośredniego kontaktu statku z kanałem pioruna, może również indukować w obwodach awioniki groźne przepięcia [1]. Dlatego też poza efektami w postaci uszkodzeń mechanicznych, powstałych przy bezpośrednim kontakcie z kanałem wyładowania, istotne są też następstwa pośrednie, będące wynikiem propagacji impulsu elektromagnetycznego LEMP (ang. *Lightning ElectroMagnetic Pulse*), związanego z przepływem prądu piorunowego w kanale [2]. Pojawiają się one w wyniku przenikania zmiennych pól elektrycznego i magnetycznego przez elementy konstrukcyjne, szczególnie szczeliny oraz okna, charakteryzujące się małą zdolnością ekranowania. Dodatkowo prąd udarowy, przepływający przez płatowiec, powoduje powstanie napięcia na drodze jego przepływu, głównie w wyniku działania składowych o niższych częstotliwościach.

Parametry piorunowych przebiegów przejściowych, szczególnie kształt i wartość szczytowa, zależą od wielu czynników, do których należy zaliczyć:

- rodzaj wyładowania atmosferycznego (dodatnie, ujemne), wartość prądu w kanale oraz odległość statku od kanału pioruna;
- materiały i technologię wykonania płatowca;
- konfigurację, parametry i sposób ułożenia wzajemnych połączeń między urządzeniami;
- lokalizację narażonego systemu lub urządzenia;
- użyte środki ochrony.

Do weryfikacji odporności na zaburzenia atmosferyczne zainstalowanych urządzeń stosuje się metodę badań, wykorzystującą przyjęte arbitralne prądowe i napięciowe przebiegi testowe [3, 4]. Ich parametry są określane przez normę RTCA/DO-160 w sekcji 22 (*Lightning Induced Transient Susceptibility*) [5].

W niniejszym artykule przedstawiono analizę indukowanych zaburzeń pochodzenia atmosferycznego dla wybranego systemu wyposażenia elektronicznego

samolotu. Zaprezentowano zależność rejestrowanych parametrów udarowych przebiegów prądowych i napięciowych od konfiguracji badanego systemu. Głównie skupiono uwagę na obserwacji zjawisk przy różnych warunkach ekranowania przewodów ułożonych w wiązkach, łączących badane urządzenia.

Układ probierczo-pomiarowy

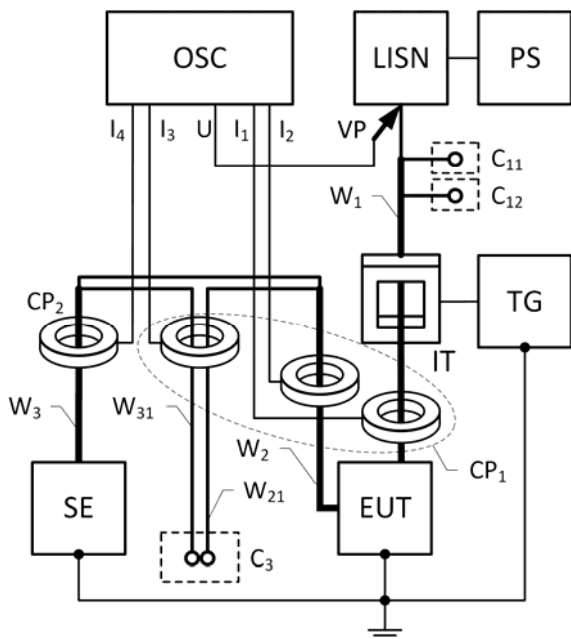
Badaniu poddano zespół awioniki składający się z radiostacji nawigacyjno-komunikacyjnej KX165 wraz ze wskaźnikiem nawigacyjnym VOR/LOC/GS – model KI-206 [6, 7]. Jest to popularne wyposażenie małych statków powietrznych. Wiązki przewodów łączących elementy zespołu, pod względem długości, liczby i rodzaju przewodów, odpowiadają typowej oryginalnej instalacji. Zakończenia wiązek łączących radiostację z pozostałym osprzętem w większości pozostawiono jako nieobciążone.

Na rysunku 1 przedstawiono schemat układu do badań przebiegów prądowych i napięciowych w zespole awioniki. Sygnały te w obwodach elektrycznych badanego urządzenia (ang. *Equipment Under Test - EUT*), będące odzwierciedleniem efektów pośrednich wyładowania atmosferycznego, wywołano przy użyciu dedykowanego generatora udarów napięciowych i prądowych [8]. Spośród możliwych dwóch sposobów sprzęgnięcia zaburzeń przejściowych do obwodów badanego systemu, tj.:

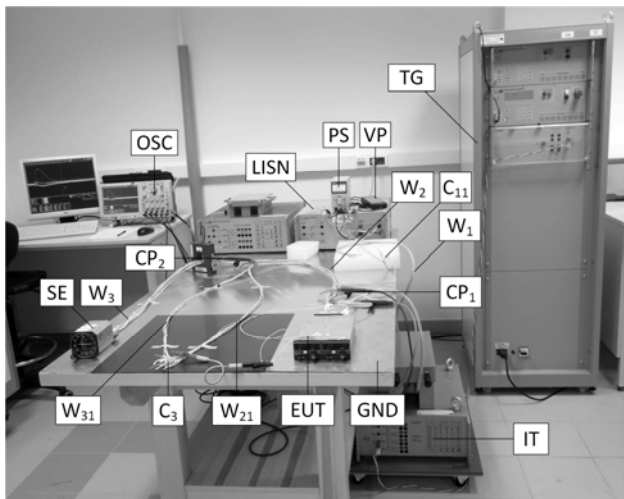
- bezpośrednie narażanie portów zasilania lub sygnałowych (ang. *pin injection*),
- indukowanie zaburzeń w przewodach dochodzących do EUT (ang. *cable bundle induction*)

wybrano metodę drugą, wykorzystującą napięciowy transformator sprzęgający. Rysunek 2 przedstawia realizację takiego układu. Badany zespół ułożono na stole z uziemioną płytą aluminiową, stanowiącą główną płaszczyzną odniesienia. W trakcie badań system był zasilany poprzez sieć sztuczną ze źródła napięcia stałego. Zadany udar napięciowy indukowano w wiązce W_1 o długości 2,3 m. Do radiostacji przyłączona była też wiązka W_2 (dł. 2,4 m), która rozdzielala się na dwie, stanowiąc połączenie oznaczone jako W_{21} (dł. 2,2 m), dedykowane dla niedołączonego podczas badań osprzętu, oraz połączenie

ze wskaźnikiem KI-206 (jako część wiązki W_3). Pozostały człon zespołu przewodów W_3 (dł. 2,3 m), określony jako W_{31} , biegł wzdłuż W_{21} . Do rejestracji przebiegów w układzie wykorzystano oscyloskop cyfrowy z dołączonymi sondami prądowymi i sondą napięciową.



Rys. 1. Schemat ideowy układu probierczo-pomiarowego: EUT – badana radiostacja; SE – wyposażenie dodatkowe (wskaźnik nawigacyjny); TG – generator udarów MIG0600MS; IT – napięciowy transformator sprzęgający CN-GI-CI-V; PS – zasilacz DC (26 V); LISN – sieć sztuczna DN-LISN160-32; OSC – oscyloskop cyfrowy DPO5204; VP – wysokonapięciowa aktywna różnicowa sonda TT-SI 9010; CP₁ – sondy prądowe Rogowskiego CWT 60R; CP₂ – sonda prądowa Pearson 3525; C₁₁, C₂₂, C₃ – dostępne końce przewodów i ekranów; W₁ - W₃ – wiązki kablowe

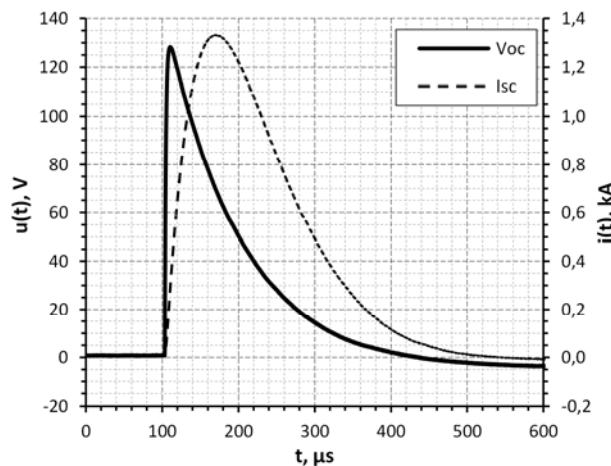


Rys. 2. Stanowisko eksperymentalne do analizy przebiegów udarów indukowanych w systemie nawigacyjno-komunikacyjnym statku powietrznego

Przyjęte założenia i warianty konfiguracji obwodu

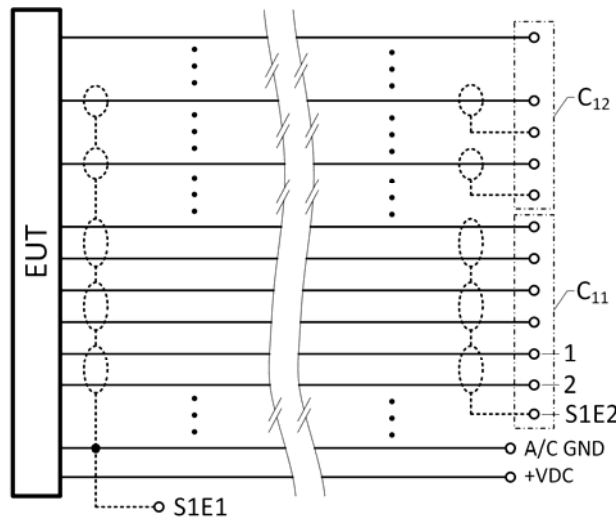
Podczas badań narażano wiązkę W_1 , indukując w każdym z jej przewodów pojedynczy udar napięciowy WF4 o znormalizowanym kształcie 6,4/69 μ s, określonym w normie DO-160 (sekcja 22) i wartości szczytowej 128 V. Wyniki kalibracji układu przedstawiono na rysunku 3.

W wyniku wielokrotnej obserwacji parametrów wytwarzanych udarów stwierdzono ich dużą dokładność i powtarzalność, głównie dzięki zaawansowanemu energoelektronicznemu układowi sterowania generatora. Widoczne na oscyloskopie różnice kształtów napięć bądź prądów, rejestrowanych podczas kolejnych powtórzeń w czasie kalibracji, były do pominięcia. Można więc porównywać ze sobą wyniki rejestracji indukowanych przebiegów udarowych, obserwowane przy różnych konfiguracjach połączeń w badanym obwodzie.



Rys. 3. Przebiegi uzyskane w czasie kalibracji: V_{OC} – napięcie w otwartej pętli (po stronie wtórnej transformatora IT), I_{SC} – prąd w zwartej pętli kalibracyjnej

Wyboru wiązki W_1 , jako miejsce wprowadzania zaburzenia w postaci piorunowego udaru napięciowego, dokonano, ponieważ składa się ona z 26 zróżnicowanych przewodów, wśród których znajdują się przewody zasilające EUT, sygnałowe przewody nieekranowane oraz ekranowane jedno- i dwużyłowe (rys. 4).



Rys. 4. Schemat poglądowy wiązki przewodów W_1 : C₁₂ – końce przewodów jednożyłowych w ekranie oraz bez niego; C₁₁ – końce przewodów dwużyłowych ekranowanych z wyprowadzonym połączeniem wspólnym zakończeń ich ekranów (S1E2); 1 – przewód sygnałowy linii komunikacyjnej audio „COMM_AUDIO_HI”, 2 – przewód masowy linii komunikacyjnej audio „COMM_AUDIO_LOW”; A/C GND, +VDC – przewody linii zasilania; S1E1 – koniec ekranów wszystkich przewodów ekranowanych od strony radiostacji

Oprócz wyprowadzonych końców ekranów w wiązce W_1 w układzie dostępne były również: wspólny koniec ekranów przewodów wiązki W_2 od strony radiostacji (nazwany S2E1) oraz wspólne końce ekranów dla każdej z wiązek W_{21} i W_{31} (odpowiednio S21E2 oraz S31E2) od strony niedołączonego osprzętu. Dlatego możliwe było zbadanie zależności parametrów rejestrowanych udarów napięciowych i prądowych od konfiguracji przewodów i ich własności w wybranych punktach systemu.

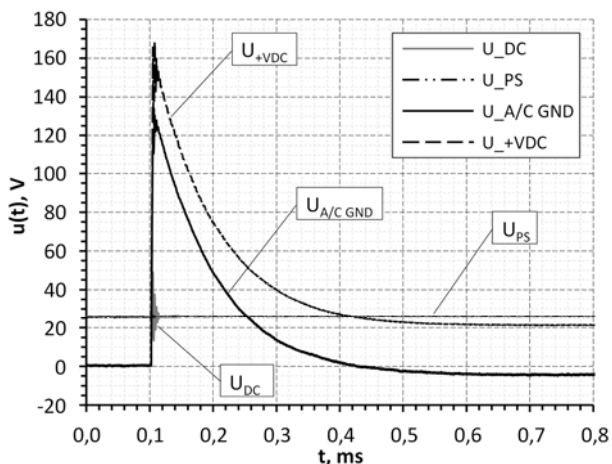
Zmierzono napięcia w obwodzie zasilania po stronie wejściowych i wyjściowych zacisków sieci sztucznej oraz w jednym z wybranych torów sygnałowych – komunikacyjnym wyjściu słuchawkowym audio – po stronie zakończeń przewodów C_{11} . Linia audio jest częścią wiązki W_1 , wykonaną z dwużyłowego miedzianego ocynowanego przewodu 20 AWG, otoczonego ekranem w zewnętrznej powłoce z polwinitu ciepłoodpornego. Służy m.in. do przenoszenia sygnałów audio ze wzmacniacza radiostacji do słuchawek. Zaciski końcowe tych przewodów wraz z wyprowadzeniem końca ich ekranu w rzeczywistej instalacji podłączone są do panelu audio w kopcicie. Natomiast w czasie badań linia sygnałowa pozostała nieobciążona.

Badania przeprowadzono dla kilku wariantów połączeń końców ekranów przewodów poszczególnych wiązek z główną płaszczyzną uziemienia:

- A - wszystkie dostępne końce ekranów odizolowane od głównej płaszczyzny uziemienia (GND),
- B - wyprowadzenie S1E2 uziemione, reszta końców ekranów odizolowana,
- C - wyprowadzenia: S1E1, S1E2, S2E1 uziemione, reszta końców ekranów odizolowana,
- D - wyprowadzenie S1E2 odizolowane, reszta końców ekranów uziemiona,
- E - wszystkie końce ekranów uziemione,
- F - wyprowadzenie S1E1 uziemione, reszta końców ekranów odizolowana.

Analiza przebiegów udarowych

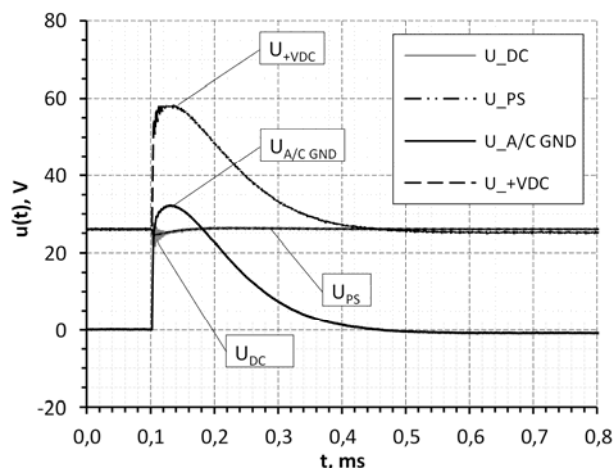
Rysunki 5 i 6 przedstawiają sygnały napięciowe rejestrowane w obwodzie zasilania badanego układu dla wariantów ekranowania D oraz E.



Rys. 5. Przebiegi napięć w obwodzie zasilania dla konfiguracji D: U_{DC} – napięcia różnicowego na początku linii zasilania (na wyjściu sieci sztucznej); U_{PS} – różnicowego na wyjściu źródła zasilania (na wejściu sieci sztucznej); $U_{A/C GND}$ – na początku linii A/C GND względem płaszczyzny uziemienia; U_{+VDC} – na początku linii +VDC względem uziemienia

Przy zastosowaniu pierwszego z nich (D) napięcia na początku linii zasilania: U_{+VDC} oraz $U_{A/C GND}$, mierzone względem płaszczyzny odniesienia, były zbliżone kształtem do sygnału testowego WF4, narastającego do wartości

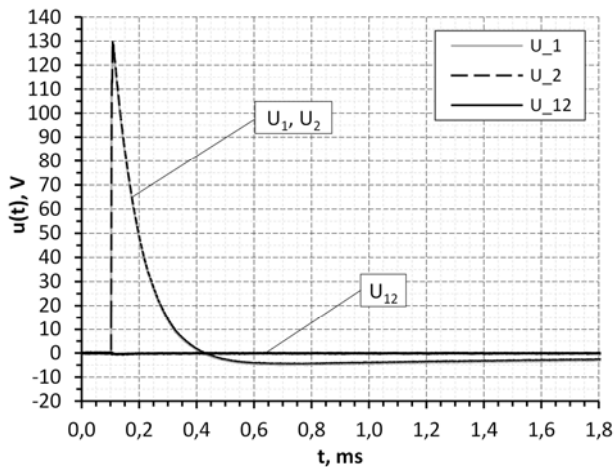
szczytowej w ciągu $6,4 \mu s$ i opadającego do połowy tej wartości w czasie $69 \mu s$. Różniły się jedynie o dodatkową składową stałą i lekkie oscylacje na zboczu narastającym. Świadczy to o efekcie sumowania się napięcia linii, występującego w warunkach normalnej pracy, z przebiegiem udarowym. W przypadku różnicowego napięcia U_{DC} , mierzonego między początkami linii zasilania, zaobserwowano oscylacyjne zmiany jego wartości chwilowej. Z początkowej, równej $26 V$ wzrosła ona do $50 V$, aby po upływie $10 \mu s$ ustabilizować się na pierwotnym poziomie. Działanie sieci sztucznej w układzie zasilania badanego systemu sprawiło, że chwilowa wartość napięcia U_{PS} na wyjściu zasilacza DC nie przekroczyła $27 V$. Dodatkowe uziemienie końca ekranów w wiązce W_1 po stronie zasilania – zmiana konfiguracji z D na E – skutkowało znacznym obniżeniem wartości szczytowych napięć, co przedstawiono na rysunku 6.



Rys. 6. Przebiegi napięć obwodzie zasilania dla konfiguracji E (oznaczenia jak na rysunku 5)

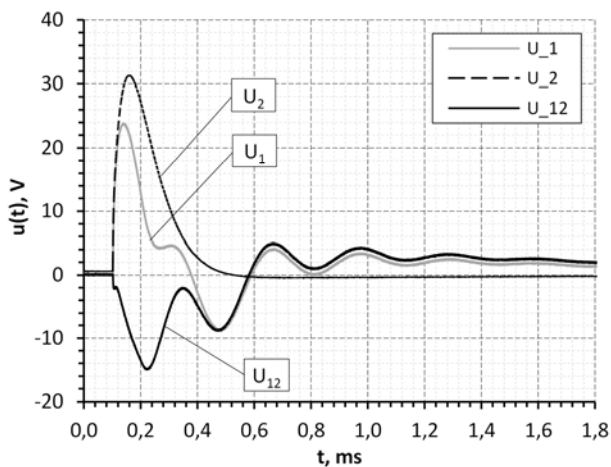
W przypadku napięcia $U_{A/C GND}$ na początku przewodu masowego redukcja była nawet czterokrotna. Zmienił się też kształt przebiegów. Czas narastania do wartości szczytowej zwiększył się ponad trzykrotnie. Szybkość narastania zbocza w początkowej fazie była porównywalna jak przy konfiguracji D, natomiast później widoczne było jej zmniejszenie i złagodzenie kształtu przy szczycie. Wiązać się to może ze zmniejszeniem udziału składowych o wyższych częstotliwościach w przebiegach rejestrowanych napięć, co też wpłynęło na spadek poziomu ich wartości szczytowych. Decydujący wpływ uziemienia ekranów w wiązce W_1 po stronie zasilania na kształty i wartości rejestrowanych przebiegów można też stwierdzić na podstawie dużych podobieństw przebiegów napięciowych, obserwowanych przy odpowiednich konfiguracjach uziemienia ekranu. Wyniki pomiarów przy opcjach połączeń A i F nieznacznie różnią się od uzyskanych przy konfiguracji D. Podobne spostrzeżenie dotyczy rezultatów pomiarów w przypadku wariantów: B, C i E.

Drugim obwodem, w którym obserwowano indukowane udarowe przebiegi napięciowe, był tor audio. Wybrane wyniki badań pokazano na rysunkach 7 – 9. Przy nieuziemionych końcach ekranu, otaczającego przewody masowy i sygnałowy tej linii, oraz nieobciążonym jej wyjściu, napięcia U_1 i U_2 na końcach przewodów względem głównego uziemienia były identyczne i wynikały z indukowania się wspólnego (ang. *common mode voltage*) zaburzenia napięciowego WF4 w każdym z przewodów. Wobec tego napięcie różnicowe U_{12} na wyjściu audio było praktycznie zerowe (rysunek 7).



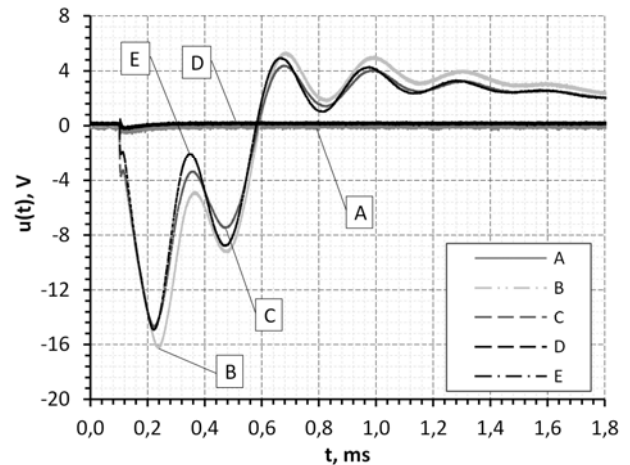
Rys. 7. Przebiegi napięć w torze audio, zmierzonych na końcach C_{11} , przy konfiguracji A: U_1 – na końcu przewodu sygnałowego 1 względem uziemienia; U_2 – na końcu przewodu masowego 2 względem uziemienia; U_{12} – różnicowe na końcu linii audio

Przy uziemieniu wszystkich dostępnych końców ekranów (rys. 8) uwidoczniło się oddziaływanie sprzężenia magnetycznego ekranu z wewnętrznymi przewodami linii audio, przy przepływie prądu przez ekran. Napięcia w obserwowanych przewodach, zależne od prądu płynącego w ekranie oraz wartości indukcyjności wzajemnych między ekranem a przewodami, były skierowane przeciwnie do wprowadzanych poprzez transformator sprzęgający udarowych napięć o kształcie 6,4/69 μ s.



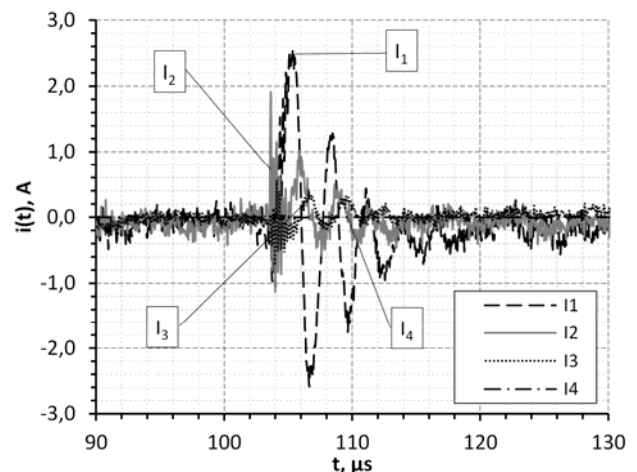
Rys. 8. Przebiegi napięć w liniach audio, zmierzonych na końcach C_{11} , przy konfiguracji E (oznaczenia zgodne z rys. 7)

Stąd napięcia U_1 i U_2 na końcach przewodów względem płaszczyzny uziemienia były zredukowane i miały różne kształty, co uwidoczniło się w przebiegu napięcia U_{12} . Na rysunku 9 dokonano porównania napięcia różnicowego linii audio dla wybranych wariantów ekranowania. Zachowanie się przebiegów dla wariantów B, C i E, związanych z uziemieniem końca ekranów w wiązce kablowej W_1 od strony źródła zasilania, jest zbliżone. Wszystkie przebiegi mają charakter oscylacyjny i bliskie sobie wartości chwilowe. Z kolei odizolowanie końca ekranów od strony zasilania, realizowane w wariantach konfiguracji A i D, skutkowało praktycznie brakiem napięcia różnicowego przy pojawieniu się indukowanego zaburzenia.



Rys. 9. Przebiegi napięcia U_{12} - różnicowego pomiędzy przewodami 1 a 2 na końcu linii audio, przy różnych konfiguracjach uziemienia ekranu

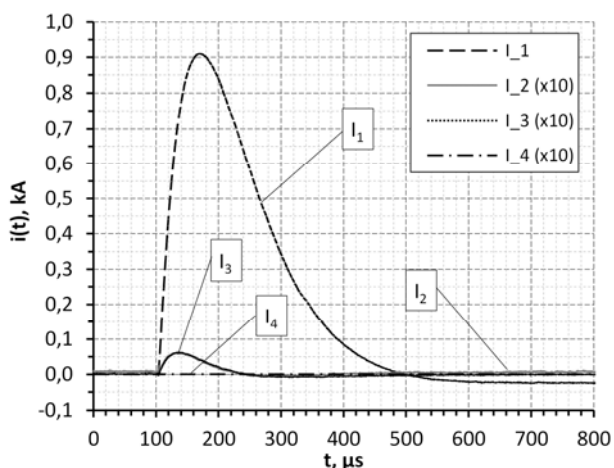
Kolejnym etapem badań była analiza rozplywu prądów udarowych w badanym układzie. W większości przypadków, na całkowity prąd wiązki kablowej wpływ miały głównie prądy płynące w oplotach ekranujących przewody. Dlatego prądy, zarejestrowane przy konfiguracji A, są znikome w porównaniu z sytuacją E, co pokazano na rysunkach 10 i 11.



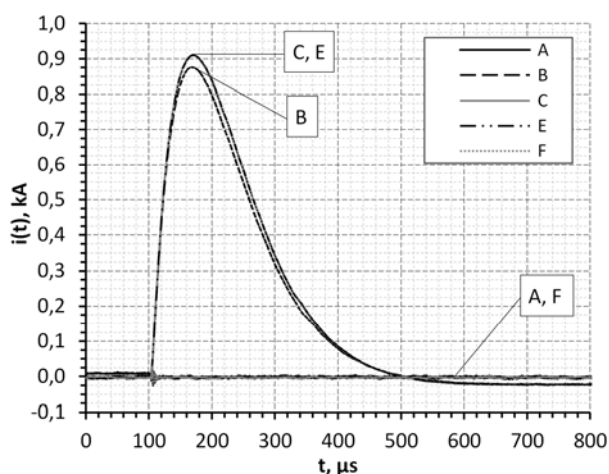
Rys. 10. Przebiegi prądów w wiązce przewodów przy konfiguracji A: I_1 – w wiązce W_1 ; I_2 – w wiązce W_2 ; I_3 – łączny w wiązce W_{21} i W_{31} ; I_4 – w wiązce W_3

Przy zwarciu wszystkich wyprowadzeń ekranów z uziemieniem największą wartość szczytową miał przebieg prądu pierwszej wiązki kablowej. Wynosiła ona powyżej 910 A. Czas narastania do wartości szczytowej był porównywalny z czasem dla przebiegu prądowego w pętli kalibracyjnej, zarejestrowanym na początku badań i wynosił około 60 μ s. Kształt i wartość maksymalna, wynosząca blisko 6 A, prądu wiązki W_2 były porównywalne z parametrami łącznego prądu linii W_{21} i W_{31} .

Uziemienie obudowy radiostacji w trakcie badań spowodowało, że łączenie z uziemieniem końców ekranów od strony urządzenia nie wywoływało znacznych zmian w rejestrowanych przebiegach udarowych. Widać to na rysunku 12, gdzie zestawiono prąd wiązki W_1 dla różnych opcji ekranowania.



Rys. 11. Przebiegi prądów w wiązkach przewodów przy konfiguracji E (oznaczenia zgodne z rys. 10)



Rys. 12. Przebieg prądu I_1 wiązki W_1 przy różnych konfiguracjach połączenia ekranów

Spowodowane było to głównie połączeniem ekranu po stronie radiostacji z masą zasilania, która dołączona była do obudowy poprzez niewielką impedancję. Dlatego wartość szczytowa prądu I_1 przy odizolowaniu końca ekranów od strony radiostacji (przypadek B) niewiele zmalała w porównaniu z sytuacją pełnego uziemienia. Jeszcze mniejszy wpływ na rozptył prądów miał stan uziemienia końców ekranów wiązek W_{21} i W_{31} .

Podsumowanie

Prezentowano wstępne rezultaty badań eksperymentalnych zaburzeń indukowanych w zasilanym systemie radiostacji nawigacyjno-komunikacyjnej statku powietrznego, będących skutkiem oddziaływania wyładowań atmosferycznych.

Dokonane rejestracje wykazały duży wpływ nie tylko źródła zewnętrznego, ale również własności samego układu, na indukowane podczas burzy w przewodzących instalacjach statku powietrznego napięcia i prądy. W trakcie

badania radiostacji okazało się, zgodnie z oczekiwaniami, że brak obustronnego uziemienia ekranów w głównej wiązce przewodów W_1 skutkuje dużymi wartościami indukowanych napięć wspólnych i pomijalnie małymi napięciami różnicowymi. Kształt napięć w przewodach był bardzo zbliżony do wprowadzanego udaru. Uziemienie tych ekranów powodowało kilkukrotne obniżenie wartości szczytowych indukowanych napięć oraz zmianę kształtów tych zakłóceń. Było to głównie spowodowane redukcją składowych wysokoczęstotliwościowych. Pojawiły się natomiast zakłócenia różnicowe w liniach audio. Ponadto w nieekranowanych liniach zasilających biegnących wzdłuż linii ekranowanych zarejestrowano przebiegi indukowane prądami, płynącymi w uziemionych ekranach, które redukowały zaburzenia wprowadzane z generatora przez transformator sprzęgający.

Wartości szczytowe przebiegów prądowych, mierzonych w wiązkach przy nieuziemionych ekranach, były znikome w porównaniu z sytuacją ich obustronnego uziemienia. Zależały one głównie od prądów płynących w zwartych ekranach. Decydujący wpływ na ich poziom miało uziemienie końca ekranów w tej wiązce od strony zasilania.

Planowane są dalsze badania wpływu zaburzeń atmosferycznych na wewnętrzne układy elektryczne i elektroniczne statków powietrznych w różnych konfiguracjach układów wiązek przewodów przy wykorzystaniu udarów napięciowych i prądowych, reprezentujących oddziaływanie wyładowań bezpośrednich i w chmurach, w pobliżu statku powietrznego.

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; dr hab. inż. Grzegorz Masłowski, prof. PRZ, Politechnika Rzeszowska, Wydział Elektrotechniki i Informatyki, Katedra Elektrotechniki i Podstaw Informatyki, E-mail: masloprz@prz.edu.pl

LITERATURA

- [1] Fisher F. A., Plumer J. A., Perala R. A., Aircraft Lightning Protection Handbook, DOT/FAA/CT-89/22, (September 1989)
- [2] Laroche P., Blanchet P., Dellanoy A., Issac F., Experimental Studies of Lightning Strikes to Aircraft, Lightning Hazards to Aircraft and Launchers, *AerospaceLab Journal*, n.5 (2012)
- [3] Filik K., Badanie odporności zespołów awioniki statków powietrznych na narażenia LEMP, *Przegląd Elektrotechniczny*, 90 (2014), nr.10, 60-63
- [4] Filik K., Karnas G., Masłowski G., Wyderka S., Ziemia R., Badania funkcjonalne generatora udarów do prób odporności awioniki, *Przegląd Elektrotechniczny*, 90 (2014), nr.1, 144-148
- [5] RTCA/DO-160G, *Environmental Condition and Test Procedures for Airborne Equipment Section 22: Lightning Induced Transient Susceptibility*, (December 8, 2010)
- [6] Honeywell Inc., *Bendix/King KX 165 A NAV/COMM Transceiver*, Maintenance Manual, 006-15610-0000, (June 2000)
- [7] Honeywell Inc., *Bendix/King KI 202, KI 206, KI 207 Navigation Indicators*, Maintenance Manual, 006-05137-0005, (August 2002)
- [8] Lutz. M., Henz, R., *Aircraft Electronic Tester MIG0600 MS or SS*, EMC Partner AG, Laufen, Switzerland, (2010)