Prof. dr hab. inż. Jan Sroka
Instytut Elektrotechniki Teoretycznej
i Systemów Informacyjno-Pomiarowych
Politechnika Warszawska

Warszawa, dn. 30.08.2023

Recenzja pracy doktorskiej

Autor:
mgr inż. Kamil Filik

Tytuł:
Przepięcia atmosferyczne indukowane w elektronicznych systemach statków powietrznych

Niniejsza recenzja została przygotowana na zlecenie prof. dr hab. inż. Andrzeja Kołka, Przewodniczącego Rady Dyscypliny Automatyka, Elektronika, Elektrotechnika i Technologie Kosmiczne, Politechniki Rzeszowskiej im. Ignacego Łukasiewicza, pismem z dnia 22.06.2023r.
Recenzja zawiera ocenę spełniania warunków stawianych rozprawom doktorskim, określonych w Ustawie o stopniach naukowych i tytule naukowym oraz o stopniach i tytule w zakresie sztuki" z dnia 14 marca 2003 r. (Dz. U. 2017 r. poz. 1789 z późniejszymi zmianami) oraz wydanego na jej podstawie rozporządzenia Ministra Nauki i Szkolnictwa Wyższego z dnia 19 stycznia 2018 roku (Dz. U. z 2018 poz. 261) w sprawie szczegółowego trybu i warunków przeprowadzania czynności w przewodzie doktorskim, w postępowaniu habilitacyjnym oraz w postępowaniu o nadanie tytułu profesora § 6 ust. 3 Rozdział 1 – Szczegółowy tryb przeprowadzania czynności w przewodzie doktorskim.
Recenzja obejmuje siedem rozdziałów, stanowiących integralną całość. Jest ona spisana na siedmiu stronach maszynopisu.

1. Zagadnienia naukowe i naukowo-techniczne rozprawy

W pracy zajęto się przeanalizowanie wpływu wielokrotnych udarów oraz szybkich zmian pola elektromagnetycznego towarzyszących wyładowaniom atmosferycznym w chmurach, na aparaturę elektryczną i elektroniczną pracujące na pokładzie statku powietrznego.
Pracę można podzielić na sześć części:

1. Opis zjawiska powstawania zaburzeń elektromagnetycznych towarzyszących wyładowaniom piorunowym w chmurach
2. Prezentacja i weryfikacja generatorów impulsów używanych do narażeni zgodnie z normą DO-160, sekcja 22
3. Kompleksowe przebadanie na stanowisku laboratoryjnym, zgodnym z normą DO-160, sekcja 22 konkretnego urządzenia elektronicznego, radiostacji nawigacyjno-komunikacyjnej NAV/COMM model KX 165 firmy Bendix/King wraz z układem pomocniczym, którym jest wskaźnik KI 206
4. Badanie sprzęgania się impulsów zdefiniowanych w normie DO-160 sekcja 22 z

WPŁYNĘŁO
04. WRZ. 2023

modelem instalacji pokładowej.

5. Symulacja komputerowa zjawisk opisanych w punkcie 4.
6. Badanie wpływu udarów piorunowych, zdefiniowanych w normie DO-160 sekcja 22 na jakość materiałów kompozytowych używanych w awionice.

TEZA I TYTUŁ PRACY:

Autor stawia dwie tezy następującej treści:

1. analiza złożonych oddziaływań pośrednich wyładowań atmosferycznych na układy elektroniczne statków powietrznych dokonana na podstawie badań eksperymentalnych i komputerowych z wykorzystaniem zaproponowanych modeli, uwzględniająca specyficzne parametry wyładowań piorunowych oraz warunki pracy aparatury elektronicznej, pozwala na kompleksową ocenę narażeni przepięciowych w systemach awioniki wymaganą podczas projektowania skutecznych systemów ochrony,
2. możliwa jest ocena właściwości elektrycznych i wytrzymałości na niszczące skutki wyładowań atmosferycznych materiałów kompozytowych przeznaczonych dla przemysłu lotniczego z wykorzystaniem udarów prądowych reprezentujących prąd piorunowy wyładowania głównego oraz zaprojektowanego i wykonanego stanowiska badawczego.

W tezie 2 nie wiadomo o jaką wytrzymałość chodzi Autorowi, elektryczną, czy mechaniczną? Lektura dysertacji nie daje odpowiedzi na to pytanie.

W tytule pracy użyto sformułowania „elektroniczne systemy statków powietrznych" natomiast w pierwszej tezie użyte są sformułowania „ układy elektroniczne statków powietrznych", „aparatura elektroniczna" oraz „systemy awioniki". Rozumiem, że Autorowi chodzi o to samo, jednakże pojęcie aparatura, układ i system mają swoje precyzyjne definicje podane w normie DO-160. Bardziej adekwatny do treści pracy byłby tytuł: *„Przepięcia atmosferyczne indukowane w ~~elektronicznych~~ urządzeniach pokładowych statków powietrznych"*
Ze względu na rozdział 5, poświęcony badaniom materiałów kompozytowych pod kątem ochrony przepięciowej i odgromowej zrezygnowałbym w tytule z przymiotnika „elektroniczne".

2. Organizacja i redakcja rozprawy, odniesienia do literatury

Rozprawa obejmuje 210 stron maszynopisu, 267 pozycji literatury, w tym 3 pozycje indywidualne Autora, oraz 9 pozycji, w których Autor rozprawy doktorskiej jest współautorem. W pracach tych zostały zaprezentowane wybrane zagadnienia ujęte w opiniowanej rozprawie. Pozycje literatury są dobrane starannie i adekwatnie do prezentowanej tematyki.
Rozprawa została podzielona na 6 rozdziałów, przy czym ostatni rozdział jest podsumowaniem. Odczuwam brak spisu skrótów użytych w rozprawie.

3. Osiągnięcia naukowe

- Udowodnienie pierwszej tezy pracy.
- Druga teza pracy w części dotyczącej właściwości elektrycznych materiałów kompozytowych jest również udowodniona. Natomiast mam wątpliwości, czy parametr użyty do oceny właściwości elektrycznych (rezystancja udarowa) jest adekwatny do tezy.

- Druga część drugiej tezy nie jest udowodniona. Nie wiadomo jaką „wytrzymałość" materiałów kompozytowych Autor ma na myśli, mechaniczną? elektryczną? termiczną? Czy może jeszcze inną. Lepiej byłoby to sformułowanie usunąć z tezy.

W podsumowaniu zaznaczono, że ograniczenie wpływu zaburzeń elektromagnetycznych wprowadzanych do badanego urządzenia uzyskuje się stosując ekrany dla pojedynczych kabli i wiązek kabli. Użyto sformułowania, że przebadano zdolność ekranowania kabli w zależności od:

1. charakterystyki tłumienia ekranu,
2. pasma częstotliwości zaburzeń
3. warunków uziemienia ekranów.

Potwierdzam, że w pracy przebadano zagadnienia z punktów 2 i 3. Natomiast nie znalazłem w pracy miejsca poświęconego zagadnieniu z punktu 1. Owszem, przyglądając się Rys. 4.70 można się domyślać, że w symulacji ekranów kabli uwzględniono tzw. impedancję transferową, ale zrobione to jest tylko dla konkretnej wartości bez rozpatrywania jak jej wartość, czy raczej charakterystyka częstotliwościowa wpływa na zjawisko sprzęgania się zaburzenia z żyłami wiązki kabli.

Jednym z wniosków pracy jest konieczność uziemiana ekranów kabli na obu końcach. Wykazano, że tak należy robić chcąc ograniczyć propagację zaburzeń radioelektrycznych. Natomiast ochrona przed zaburzeniami niskiej częstotliwości wymaga ekranowania kabli tylko na jednym końcu. Wyjaśniono, że kompromisem może być kabel z podwójnym ekranem, z których każdy jest uziemiony na przeciwległym końcu. Ten wniosek chcę uzupełnić innym, tańszym rozwiązaniem, o którym nie wspomniano w rozprawie, w którym używa się kabla z pojedynczym ekranem łączonym bezpośrednio z masą na jednym końcu oraz przez kondensator na końcu przeciwległym.

4. Zalety pracy

- Budowa stanowiska badawczego zgodnie z normą DO-160 sekcja 22
- Podanie sposobu weryfikacji impulsów wymaganych w normie DO-160 sekcja 22

4.3.4. Model komputerowy analizowanego układu

Na str. 133 opisane jest tworzenie modelu ekranu kabla. Modelem tym jest impedancja transferowa. Pozwala ona uwzględnić materiał i gęstość oczek siatki, z której zbudowany jest ekran. W literaturze oraz w danych katalogowych bardzo rzadko podawany jest ten parametr. Wartość impedancja transferowej decyduje o jakości ekranu kabla. Możliwość przeanalizowania na drodze symulacyjnej różnych wariantów kabli z różnymi impedancjami transferowymi uważam za mocną stronę pracy doktorskiej.
Porównanie przebiegów pomierzonych na stanowisku eksperymentalnym z przebiegami symulowanymi, przedstawione na Rys. 4.75, 4.76, 4.79, 4.80 pokazuje dobrą zbieżność wyników. Potwierdza to, że model symulacyjny jest dobrze zbudowany.
Na Rys. 4.78 pokazane są wyniki symulacji napięcia indukowanego w przewodzie w zależności od rezystancji uziemienia ekranu kabla. Z tego porównania wynika wyraźnie wniosek konieczności uziemiana ekranów jak najmniejszą impedancją przejścia, czyli unikanie „świńskich ogonów".
Na str. 155 sformułowany jest ważny wniosek, wynikający z symulacji, że w celu redukcji przesłuchów zaburzeń radioelektrycznych (powyżej 20 kHz) konieczne jest obustronne uziemiane ekranów kabli.

5. Uwagi krytyczne i polemika

1. W nazewnictwie parametrów charakteryzujących impuls istnieje chaos i duża dowolność ich używania bez podania definicji. Przykłady: *czas trwania* na str. 23, *szerokość impulsu* na str. 27, *szybkość narastania czoła* na str. 43, *stromość czoła* na str. 43, *czas narastania czoła* na str. 51. Ponadto na Rys. 3.1 na str. 51pokazane jest, że impulsy czerwony i niebieski mają mierzone *czasie narastania czoła* odpowiednio T_1 = 0,1 μs T_1 = 6,4 μs jako upływ czasu między wartościami szczytową (100%), a zerową (0%) impulsu. Chaos ten ma swoje źródło w odmiennym opisie impulsów w normach dotyczących wyładowań piorunowych np. EN 62305, EN 61000-4-5 oraz w normie dotyczącej statków powietrznych, czyli normie DO-160 sekcja 22. O ile w normach dotyczących wyładowań piorunowych używa się pojęcia wirtualnego czoła impulsu *virtual front time*, obliczanego z wartości prądu mierzonej dla 90 % i 10 % wartości szczytowej, o tyle w normie DO-160 używa się wyłącznie pojęcia czasu narastania impulsu między 100%, a 0 % wartości szczytowej. Inną sprawą jest na ile definicja czasu narastania 100 % - 0 % jest precyzyjna. Wartość szczytowa (100 %), impulsu jest mierzalna, natomiast uchwycenie chwili czasu, w której impuls się zaczyna (0 %) jest obarczone dużym błędem. Praca poświęcona jest zagadnieniom związanymi ze statkami powietrznymi. Dlatego zalecałbym posługiwanie się wyłącznie parametrami przynależącymi do tego świata. Równoczesne używanie parametrów ze świata norm dotyczących wyładowań piorunowych i ze świata awioniki uznaję za duży mankament opiniowanej pracy.
2. Podobnie jest z nazewnictwem przebiegów z oscylacjami. Czym jest *czas trwania oscylacji,* o którym jest mowa na str. 84 i 85?

2.4.2. Badanie z wymuszeniami harmonicznymi

W rozdziale tym opisane jest wykorzystanie wektorowego analizatora obwodów, zwanego po angielsku *Vector Network Analyser VNA*, do wyznaczenia transmitancji badanych układów. Rozdział ten zawiera tylko rozważania teoretyczne bez weryfikacji ich eksperymentem pomiarowym.

Chcę zwrócić uwagę Autorowi, że *VNA* mierzy współczynnik transmisji czwórnika, czyli S_{21} lub S_{12}, który jest odwrotnością stratności wtrąceniowej. Transmitancja czwórnika, jako stosunek sygnału wejściowego do wyjściowego jest to stratność napięciowa, która jest wielkością względną, określoną dla konkretnej impedancji odniesienia. Większość *VNA* dają możliwość pomiaru w odniesieniu do rezystancji 50 Ω. Owszem stratność napięciową można wyznaczyć pośrednio z pomiarów parametrów rozproszeniowych czwórnika, ale potrzebne są do tego parametry S_{11} oraz S_{21}.

3.1.3. Konfiguracja układów dla różnych metod sprzęgania zaburzeń elektromagnetycznych

Na Rys. 3.6 blok oznaczony numerem 2 ma nazwę urządzenie odsprzęgające. Jest to dla mnie niezrozumiałe. Jak w torze między generatorem generującym impuls, a EUT może być urządzenie odsprzęgające. Tutaj musi być urządzenie sprzęgające!

Na Rys. 3.7 i 3.8 w torze między EUT, a LISN umieszczone jest urządzenie dodatkowe AUX. Ono nie może się tu znajdować.

3.2.3. Zastosowanie SPD w ochronie awioniki

W tekście pod Rys. 3.10 mowa jest o separacji galwanicznej, jako sposobie zapobiegania propagacji zaburzeń. Chcę zaznaczyć, że separacja galwaniczna tłumi jedynie składową

asymetryczną zaburzeń, będąc transparentną dla składowych symetrycznych.

4.2.1. Charakterystyka badanego układu

Na Rys. 4.6 widać wyraźnie, że badana wiązka W_1 jest prowadzona poza płytą metalową, będącą masą odniesienia dla stanowiska pomiarowego. Jest to błąd w sztuce, który może skutkować pogorszeniem powtarzalności wyników badań. Wiązka ta musi być ułożona nad płytą stanowiącą masę odniesienia dla stanowiska badawczego.

W tekście jest mowa o tym, że kontakt EUT i AUX z masą odniesienia na stanowisku badawczym jest zrealizowany przez położenie ich bezpośrednio na płycie metalowej. Potwierdza to Rys. 4.7. EUT i AUX muszą mieć zdefiniowany i powtarzalny kontakt z masą odniesienia. Jeżeli producent nie przewidział specjalnego przyłącza w tym celu, to trzeba obudowę przycisnąć do płyty ściskaczem, bądź połączyć taśmą miedzianą po uprzednim upewnieniu się, że powierzchnia obudowy urządzenia jest przewodząca (anodyzacja obudów aluminiowych).

4.2.3. Badanie zaburzeń wprowadzanych bezpośrednio do złącz zasilania urządzenia

Na zdjęciu zamieszczonym na Rys. 4.39 pokazany jest element 5, z wyjaśnieniem, że jest to element sprzęgająco-odsprzęgający. Kłóci się to z blokiem 2 pokazanym na Rys. 3.6, który jest tylko odsprzęgający.

Mianem osi y na Rys. 4.47 i 4.49 powinien być Amper, a nie Volt.

4.3.2. Rezultaty badan eksperymentalnych

Na str. 118 jest sugestia, że oscylacje na zboczu narastającym zaindukowanych impulsów są wynikiem niedopasowania falowego na końcach linii. Powątpiewam w takie wytłumaczenie. Linie mają 2 m długości. Dla sygnałów o częstotliwościach do ok. 5 MHz można je traktować jako obwody o parametrach skupionych. Wymuszenie o czasie narastania 6,4 μs ma widmo częstotliwości sięgające ok 160 kHz. Takie wymuszenie nie spowoduje wędrowania fal w obwodzie. Jak pokazuje zbliżenie impulsu wymuszającego i_3 na Rys. 4.55 ma ono zafalowanie na początku zbocza narastającego. To jest raczej przyczyną powstawania oscylacji w indukowanych napięciach, bo one sprzęgają się na drodze indukcyjnej i pojemnościowej, a więc poprzez pochodną.

4.3.3. Badania komputerowe indukowanych przepięć

Rys. 4.68 przedstawia zależność od częstotliwości napięcia indukowanego w przewodzie na drodze sprzężenia magnetycznego. Linia niebieska przerywana ma odpowiadać napięciu zaindukowanemu w przewodzie z jednostronnie uziemionym ekranem. Rysunek ten jest zaczerpnięty z książki Henry W,. Ott pt „Electromagnetic compatibility engineering" z roku 2009. Nie mam dostępu do tej książki, ale w książce tegoż autora pt " Noise reduction techniques in electronic systems" z roku 1988 linia ta odpowiada napięciu zaindukowanemu w przewodzie nieekranowanym (Fig. 2.17). Wzory towarzyszące wykresom są również takie same.
We wspomnianej książce przedstawiono analogiczną zależność dla sprzężenia na drodze pojemnościowej (Fig. 2.3). Szkoda, że wykres ten nie znalazł się w rozprawie.

4.3.4. Model komputerowy analizowanego układu

Na str. 144 jest wzmianka, że nie dostrzeżono żadnych odbić fali na końcach linii. To jest spójne z wyjaśnieniem przedstawionym w poprzedniej uwadze.

Wyznaczanie przesłuchów w badanym układzie

Współczynniki transmisji Sij, przedstawione na Rys. 4.93 mają zafalowania dla częstotliwości powyżej 10 MHz. Jest to zaznaczone w tekście na str. 153 bez próby wyjaśnienia tego zjawiska. Wydaje mi się, że przewód o długości 2 m użyty w symulowanym modelu dla tych częstotliwości staje się linią długą, a więc przesłuchy mogą mieć charakter falowy.

Ciekawe też są przebiegi dla układu z obustronnie uziemionym ekranem linii sygnałowych, przedstawione na Rys. 4.94.
Przebiegi te mają część narastającą liniowo w dolnym zakresie częstotliwości, przechodząc w część poziomą, aby dla dużych częstotliwości wznosić się znowu liniowo. Widać to wyraźnie, zwłaszcza dla współczynników S_{35} i S_{45}. Moim zdaniem wytłumaczeniem tego jest zjawisko sprzężenia indukcyjnego, przedstawione na Rys. 4.68 oraz sprzężenia pojemnościowego, dla którego nie ma odpowiedniego wykresu w dysertacji, ale jak zaznaczyłem wcześniej w recenzji, jest to przedstawione w książce Henry W,. Ott pt "Noise reduction techniques in electronic systems" z roku 1988 na Fig. 2.3. Częstotliwości załamania przebiegów napięć zaindukowanych na drodze indukcyjnej i pojemnościowej są różne. Stąd prawdopodobnie złożony przebieg charakterystyki, w sytuacji gdy mamy do czynienia z oboma mechanizmami sprzężenia.

5. Badania nowych materiałów kompozytowych przeznaczonych dla przemysłu lotniczego pod kątem ochrony przepięciowej i odgromowej

W rozdziale tym przyjęto rezystancję udarową za parametr określający jakość materiału kompozytowego. Narażanie materiału kompozytowego szeregiem impulsów udarowych powoduje degradację struktury materiału oraz równocześnie zmniejszenie rezystancji udarowej, co jak pisze Autor skutkuje indukowaniem się w płatowcu większych prądów od wyładowania atmosferycznego. Idąc tym tropem rozumowania, im większa rezystancja udarowa materiału kompozytowego, tym mniejsze impulsy indukują się w płatowcu. Wobec tego należałoby używać materiałów o jak największej rezystancji udarowej, a więc bez jakichkolwiek domieszek przewodzących.
Wobec powyższego musi być jakiś powód, dla którego używa się domieszek przewodzących, ale Autor nie odnosi się do tego. Wobec tego może rezystancja udarowa jest niewłaściwym lub niewystarczającym kryterium oceny jakości materiału? Może trzeba dodać inną wielkość do oceny jakości np. skuteczność ekranowania pola elektromagnetycznego?

5.2.3. Metoda Van der Pauw

Podana na str. 168 niepewność pomiarowa dla pomiaru rezystywności skrośnej jest niepełna. Poziomowi ufności p = 0.95 musi zawsze towarzyszyć współczynnik rozszerzenia k = ?
Na tej samej stronie użyto sformułowania „ błąd systemowy" Czy chodzi tu o błąd systematyczny, czyli typu B?

6. Przydatność rozprawy dla nauk technicznych

Badanie sprzęgania się impulsów zdefiniowanych w normie DO-160 sekcja 22 z modelem instalacji pokładowej oraz symulacja komputerowe zjawisk im towarzyszących wskazuje na dobrą zbieżność uzyskanych wyników. Wykorzystanie wiarygodnych symulacji komputerowych potania proces projektowania i rozwoju nowych urządzeń pozwalając na redukcję czasu spędzonego w laboratorium badawczym kompatybilności elektromagnetycznej i skraca czas projektowania.
Ponadto istotną zaletą pracy jest zgłoszenie patentowe stanowiska i metody pomiarowej do badania materiałów kompozytowych.

7. Wniosek końcowy

Pomimo wszystkich krytycznych i polemicznych uwag dotyczących różnorodności definicji impulsów, niedoskonałości w budowie stanowiska badawczego, wątpliwej interpretacji uzyskanych wyników w kilku miejscach oraz nadmiarowe sformułowanie drugiej tezy uznaję, iż rozprawa doktorska mgr. inż. Kamila Filika zatytułowana ***Przepięcia atmosferyczne indukowane w elektronicznych systemach statków powietrznych*** spełnia wymagania określone w ustawie o stopniach naukowych i tytule naukowym oraz o stopniach i tytule w zakresie sztuki" z dnia 14 marca 2003 r. (Dz. U. 2017 r. poz. 1789 z późniejszymi zmianami) oraz wydanego na jej podstawie rozporządzenia Ministra Nauki i Szkolnictwa Wyższego z dnia 19 stycznia 2018 roku (Dz. U. z 2018 poz. 261) w sprawie szczegółowego trybu i warunków przeprowadzania czynności w przewodzie doktorskim, w postępowaniu habilitacyjnym oraz w postępowaniu o nadanie tytułu profesora § 6 ust. 3 Rozdział 1 – Szczegółowy tryb przeprowadzania czynności w przewodzie doktorskim.

Wobec powyższego wnoszę o dopuszczenie jej do publicznej obrony.

Jan Sroka

Prof. dr hab. inż. Jan Sroka