

prof. dr hab. inż. Roman Kubacki  
Wydział Elektroniki  
Wojskowej Akademii Technicznej  
ul. S. Kaliskiego 2, 00-908 Warszawa

Warszawa 02.06.2023

WPLYNĘŁO

dn.....2023 -06- 13.....

### RECENZJA ROZPRAWY DOKTORSKIEJ

dla Rady Naukowej Dyscypliny „Automatyka, Elektronika, Elektrotechnika i Technologie Kosmiczne” Politechniki Warszawskiej

**Tytuł rozprawy:** „Electrostatic analysis of transmitting system and investigation on fully-airborne emission on very low frequencies”

**Autor rozprawy:** mgr inż. Tomasz Aleksander Miś

Recenzja została przygotowana na podstawie uchwały Rady Naukowej Dyscypliny „Automatyka, Elektronika, Elektrotechnika i Technologie Kosmiczne” Politechniki Warszawskiej z dnia 18 kwietnia 2023 (uchwała nr 510/II/2023 r), w sprawie wyznaczenia recenzentów rozprawy doktorskiej w postępowaniu w sprawie nadania stopnia doktora Panu mgr inż Tomaszowi A. Misiowi.

Recenzję przygotowano na podstawie:

- art. 187 ust. 1 i ust. 2 ustawy z dnia 20 lipca 2018 r. Prawo o Szkolnictwie Wyższym i Nauce (Dz. U. z 2018 r, poz. 1668 ze zm.).
- wytycznych i zaleceń Rady Naukowej Dyscypliny.
- Pisma Pana Profesora Tomasza Stareckiego, przewodniczącego Rady Naukowej Dyscypliny.

Recenzję wykonano w oparciu o dostarczoną dokumentację, zawierającą:

- Zbiorczą dokumentację pt.: „Ph.D. Thesis, Tomasz A. Miś” zawierającej tezy rozprawy oraz opublikowane artykuły.

#### 1. Jakie zagadnienie naukowe/badawcze jest rozpatrywane w pracy (cel i teza rozprawy) i czy zostało ono dostatecznie jasno sformułowane przez autora?

Przedstawiona do recenzji rozprawa doktorska jest zawarta w czterech opublikowanych artykułach naukowych i dotyczy badań zaproponowanego przez Doktoranta systemu antenowego wyniesionego do pracy w obszar stratosfery. W przedstawionych pracach zawarto kompleksowe analizy takiego systemu począwszy od badań kompatybilnościowych związanych z narażeniem na indukowane zjawiska elektryczne w niesprzyjających warunkach atmosferycznych po badania skuteczności łączności z wykorzystaniem niedostatecznie zbadanego środowiska propagacyjnego „ziemia-jonosfera”. Doktorant przeprowadził badania w zakresie bardzo niskich częstotliwości VLF, tj. dla zakresu od 3 do 30 kHz.

Ze względu na duże długości anten nadawczo-odbiorczych w tym paśmie częstotliwości stosowanie naziemnych systemów antenowych jest obarczone licznymi problemami technicznymi i elektrycznymi dlatego wyniesiona do stratosfery łączność nadaje się świetnie do uzyskania efektywnej łączności dalekozasięgowej. Niestety, jak to zostało wypunktowane przez Doktoranta, zjawiska elektryczne, które mogą być indukowane w niesprzyjających warunkach w Stratosferze mogą skutecznie degradować łączność, a w skrajnych przypadkach, tj. w przypadku chmur burzowych mogą stanowić realne zagrożenie dla bezpieczeństwa całego systemu. Problem indukowanych efektów elektrycznych, szczególnie w otoczeniu chmur burzowych jest słabo poznany choć jego znaczenie dla efektywnej łączności i bezpieczeństwa systemu antenowego jest bardzo istotne. Z tego powodu zbadanie tych zagadnień uważam za ważne z naukowego punktu widzenia. Godzi się również podkreślić dużą użyteczność praktyczną pojętych badań, gdyż sprawność transmisji w tego typu komunikacji musi być bardzo wysoka, a w przypadku zastosowań militarnych nie może być w żaden sposób zakłócona, gdyż od tego może zależeć powodzenie realizowanych operacji. Stąd, istotnym aspektem pracy było badanie wyniesionego systemu antenowego eksponowanego na zjawiska elektryczne występujące w Stratosferze, a głównie w chmurach burzowych oraz wypracowanie właściwych mechanizmów zabezpieczających.

Magister Miś zaproponował dwie tezy pracy, a mianowicie:

Teza 1: Zaproponowany model elektryfikacji pionowej anteny VLF pozwoli na realistyczny opis mechanizmów elektrycznych, którym podlega antena w czasie lotu/pracy (mechanizmów prowadzących do wzrostu natężenia pola elektrycznego wokół anteny).

Teza 2: W pełni napowietrzny i w pełni działający system nadawczy w zakresie VLF jest fizycznie możliwy do zaprojektowania, wystrzelenia i użytkowania z wykorzystaniem aerostatu klasy lekkiej (<4 kg masy służbowej), przedstawiając nowe rozwiązanie wydajnej emisji sygnałów VLF.

Tezy te zostały jasno sformułowane a do ich udowodnienia niezbędne było wypracowanie nowych analitycznych zależności związanych z przebiciami elektrycznymi oraz wyładowaniami koronowymi, jak również z warunkami propagacji fali elektromagnetycznej w zakresie częstotliwości VHF.

## **2. Czy w rozprawie przeprowadzono w sposób właściwy analizę źródeł, w tym literatury światowej, stanu wiedzy i zastosowań w przemyśle?**

Do bibliografii rozprawy należy zaliczyć pozycje literaturowe zamieszczone w czterech artykułach stanowiących rozprawę doktorską. Dobór literatury jak i przedstawiony przegląd istniejących rozwiązań praktycznych i modeli matematycznych świadczą o dobrym rozpoznaniu tematyki poruszonej w dysertacji. Przywołane są zarówno pozycje książkowe jak i artykuły opublikowane w czasopismach naukowych i specjalistycznych dotyczących zagadnień elektrostatycznych oraz wyładowań atmosferycznych i koronowych. Przywołanych jest w sumie 147 pozycji literaturowych, przy czym w artykule nr 1 przywołano 31 pozycji literaturowych, w artykule nr 2 przywołano 32 pozycje, w artykule nr 3 jest to 20 pozycji a w artykule nr 4 przywołano 64 pozycje literaturowe. Godzi się zauważyć, że w artykułach tych cytowane są liczne prace Doktoranta opublikowane w czasopismach lub wygłoszone jako referaty na konferencjach. Opublikowane cytowania świadczą do dużej aktywności naukowo-badawczej w rozważanych zagadnieniach.

### 3. Czy autor rozwiązał postawione zagadnienia, czy użył właściwej do tego metody i czy przyjęte założenia są uzasadnione?

Do przeprowadzenia analiz i badań eksperymentalnych rozwiązujących postawione tezy pracy został opracowany układ pomiarowy umożliwiający wyniesienie systemu nadawczo-odbiorczego w obszary Stratosfery. Z logistycznego punktu widzenia opracowanie takiego stanowiska, przewidzianego do pracy w ekstremalnych warunkach elektrycznych, jakie występują w chmurach burzowych, jest dużym osiągnięciem. Instalacje antenowe o znacznej długości oraz charakteryzujące się wysoką przewodnością i przemieszczające się przez chmury stanowią wysokie ryzyko dla bezpiecznej pracy z powodu wysokich indukowanych pól elektrycznych i wyładowań koronowych w wyniku elektryzacji statycznej. Doktorant zaproponował skuteczne możliwości zapewnienia bezpieczeństwa użytkownika całego systemu antenowego. Opracowane techniki umożliwiły bezpieczne przeprowadzenie eksperymentów i mogą być w pełni wykorzystane do przyszłych badań, co zapewni spełnienie niezbędnych warunków kompatybilności elektromagnetycznej.

Otrzymane wyniki eksperymentalne jak również ich naukowe opracowanie zostały opublikowane w postaci czterech artykułów w wysoko punktowanych czasopismach naukowych, tj. Electronics oraz Energies. Zaprezentowane wyniki badań oraz opracowane opisy analityczne zjawisk elektrycznych znalazły uznanie w oczach recenzentów w tych czasopismach. Opublikowane artykuły mają następujące tytuły.

1. 'In-Flight Electromagnetic Compatibility of Airborne Vertical VLF Antennas',
2. 'Model investigations on electric discharges over balloon-borne stratospheric VLF antennas',
3. 'Electrical phenomena on fully-airborne vertical electric antennas in extreme weather conditions',
4. 'Risk assessment and experimental light-balloon deployment of a stratospheric vertical VLF transmitter'.

Opublikowane artykuły są pracami zbiorowymi, przy czym wkład pracy Doktoranta był zasadniczy i dotyczył określenia koncepcji prac, opracowania metod badań i ich walidacji jak również przeprowadzenia badań i ich formalnej analizy. Istotnym wkładem naukowym było opracowanie i zaproponowanie opisu analitycznego zjawisk elektryzacji w Stratosferze jak również badania propagacji fali elektromagnetycznej emitowanej z wyniesionego systemu antenowego. Są to zatem kluczowe zagadnienia dokumentujące istotny wkład naukowo-badawczy Doktoranta.

W pierwszym artykule zatytułowanym "In-Flight Electromagnetic Compatibility of Airborne Vertical VLF Antennas" zostały przedstawione opracowane modele elektryzacji napowietrznej anteny liniowej przechodzącej przez różne warstwy chmur, a tym chmur burzowych. Opracowane modele matematyczne będą przydatne w praktyce gdyż umożliwiają analityczne prognozowanie rozkładu natężenia pola elektrycznego wokół przewodu antenowego, co ma istotne znaczenie z punktu widzenia kompatybilności elektromagnetycznej, jak również bezpieczeństwa takiej instalacji.

Z kolei w artykule nr 2 przedstawiono symulacje anteny podwieszanej do balonu i wolno przemieszczającej się przez warstwy chmur, z uwzględnieniem zwiększonego ryzyka wyładowań atmosferycznych. Badania były w głównej mierze ukierunkowane na ocenę przydatności talku do zmniejszenia ryzyka tych wyładowań. W wyniku tych badań stwierdzono, że talk znacznie zwiększa

wartość napięcia przebicia, zwiększając ochronę całego zestawu anteny i balonu. Udało się wypracować mechanizm oddziaływania ładunków elektrycznych na drobiny talku. W pracy opracowano zależności analityczne opisujące mechanizm elektryzacji. Bardzo przydatnym wątkiem prac było określenie najbardziej podatnych fragmentów instalacji antenowej na wyładowania i efekty koronowe.

Artykuł nr 3 będący kontynuacją badań z poprzednich prac umożliwił wypracowanie modelu elektryzacji anteny, a to z kolei pozwoliło opracować faktyczny opis mechanizmów elektrycznych anteny przemieszczanej w ekstremalnych warunkach pogodowych. Wartość poznawcza opracowanego modelu jest bardzo wysoka, gdyż w proponowanym modelu udało się uwzględnić dodatkowo efekty koronowe. W tych pracach spełniona została pierwsza teza rozprawy.

Wyniesienie do Stratosfery anten do łączności jonosferycznej pociąga za sobą bardzo dużo problemów natury technicznej, organizacyjnej ale głównie elektrycznej. Analiza i rozwiązania tych problemów zaproponowanych w tezie drugiej zostało przedstawionych w artykule nr 4 zatytułowanym „Risk assessment and experimental light-balloon deployment of a stratospheric vertical VLF transmitter”. W artykule tym zaprezentowano uwarunkowania napowietrznego stratosferycznego systemu antenowego VLF oraz wskazano mechaniczne, termiczne, elektryczne i operacyjne ryzyka związane z eksploatacją takiego zestawu. W ramach weryfikacji przedstawiony został zrealizowany lot testowy wykorzystujący lekki balon. Oprócz tego w artykule tym zawarto istotne analizy dotyczące propagacji fali emitowanej z anteny VLF wyniesionej do Stratosfery. Analizę propagacyjną przeprowadzono w funkcji wysokości anteny nad poziomem ziemi, ale również biorąc pod uwagę uwarunkowania związane z niekorzystnymi warunkami atmosferycznymi takimi jak inwersja temperatury czy rozbudowane chmury burzowe.

W badaniach propagacyjnych przedstawiono analizę wzbudzonych modów w przewodnicy falowej jaką jest przestrzeń między powierzchnią ziemi oraz Jonosferą. Analizując poziomy tłumienia poszczególnych wzbudzonych modów udało się wypracować argumentację na występujące obniżanie częstotliwości nazwanej jako „pozorne obniżenie częstotliwości”. Analiza tego zjawiska będzie dużym wspomogieniem przy analizie warunków propagacyjnych do efektywnej łączności jonosferycznej. W przedstawionej analizie tłumienia wzbudzonych modów przyjęto wysokości wyniesionej anteny od zera (tj. powierzchnia ziemi) do wysokości 40 km npz. Wysokość tą przyjęto jako połowę wysokości, od której rozpościera się Jonosfera, która jak się powszechnie przyjmuje, występuje na wysokościach od 80 do 800 km npz. W analizie przyjęto zatem założenie, że mamy do czynienia z przewodnicą falową o wysokości 80 km, o symetrycznych własnościach w funkcji wysokości, co jest według mnie założeniem nazbyt upraszczającym. Wobec przyjętej symetrii przeprowadzono analizę tłumienia modów w zakresie od zera do 40 km. W rzeczywistości ścianki przewodnicy falowej „ziemia-jonosfera” różnią się diametralnie zarówno geometrią jak i przewodnością. O ile powierzchnia ziemi, ze swoim stanem skupienia może być przyjęta jako zero metrów npz., o tyle górna ścianka tej przewodnicy, określona przez dolną warstwę jonosfery jest znacznym uproszczeniem gdyż powinna być przyjęta znacznie wyżej aniżeli 80 km. Skuteczna wysokość warstwy odbijającej silnie zależy od stanu jonizacji Jonosfery, która ulega silnym wahaniom w dużej mierze w zależności od aktywności słońca, np. „dzień-noc”. Mimo wszystko przedstawione badania można uznać za bardzo wartościowe pierwsze przybliżenie problemu propagacji fali w kanale propagacyjnym „ziemia-jonosfera”.

**4. Na czy polega oryginalność rozprawy, co stanowi samodzielny i oryginalny dorobek autora, jaka jest pozycja rozprawy w stosunku do stanu wiedzy i poziomu techniki reprezentowanych przez literaturę światową?**

W ramach dysertacji opracowane zostały modele teoretyczne zjawisk elektrycznych wynoszonych układów antenowych, które w sposób kompleksowy opisują elektryzację takich układów określając zjawiska wyładowań oraz efektów koronowych w szczególnie niesprzyjających warunkach atmosferycznych czyli w rozbudowanych chmurach burzowych. Ważnym elementem rozprawy były również praktyczne badania opracowanych modeli w warunkach silnych wyładowań. Opracowane modele elektryzacji systemu antenowego oraz ich weryfikacja w warunkach praktycznych, w dodatku w skrajnie niesprzyjających warunkach atmosferycznych, stanowią o oryginalności rozprawy doktorskiej.

W ramach rozprawy przeprowadzono badania analityczne i praktyczne zjawisk elektrycznych anten całkowicie oderwanych od ziemi, co jest nowym podejściem w analizie tych zagadnień. Dotychczas badania prowadzone były ale w takiej konfiguracji, że anteny były połączone z powierzchnią ziemi. Takie podejście, powodowane trudnościami technicznymi, prowadziło do mało realistycznych modeli i praktycznie nie odzwierciedlało zjawisk związanych z antenami na dużych wysokościach. Przeprowadzone eksperymenty z wyniesionymi antenami otwierają nowe możliwości badania zjawisk elektrycznych ale głównie antenowych i propagacyjnych. Badanie kanału propagacyjnego „ziemia-jonosfera” jest obecnie badane wieloaspektowo i opracowane przez Doktoranta wyniki stanowią istotny wkład to tych badań.

**5. Czy autor wykazał umiejętność poprawnego i przekonującego przedstawienia uzyskanych przez siebie wyników (zwięzłość, jasność, poprawność redakcyjna rozprawy)?**

Biorąc pod uwagę specyfikę badań długich anten wyniesionych do Stratosfery w skrajnie niesprzyjające warunki atmosferyczne oraz uzyskane wyniki badań należy uznać, że przyjęte założenia i metody badawcze są właściwe do rozwiązania badanych zagadnień. Dodatkowo, przeprowadzone eksperymenty potwierdziły poprawność opracowanych zależności. W opublikowanych pracach uzyskane wyniki badań symulacyjnych oraz ich weryfikacje praktyczne są przedstawione poprawnie.

**6. Jaka jest przydatność rozprawy dla nauk inżynierjno-technicznych ?**

Przedstawiona praca Doktoranta, opublikowana w czterech artykułach naukowych, ma duże znaczenie naukowe ale również i aplikacyjne. Przeprowadzone symulacje oraz wyniki praktycznych badań wykazały, że jest możliwe techniczne i elektryczne wynoszenie długich anten do stratosfery i przy zastosowaniu właściwych technik można zminimalizować negatywne skutki uszkodzeń nawet w warunkach silnych chmur burzowych.

Obecna wojna na Ukrainie wykazała jak doniosłe znaczenie ma skuteczna łączność i jak łatwo można ją obezwładnić. Dodatkowo, groźba uszkodzenia kabli pod-oceanicznych łączących kontynenty stawia w nowym świetle zapotrzebowanie na dalekozasięgową łączność jonosferyczną, mniej podatną na zakłócenia. Przedstawione przez Doktoranta metody badawcze oparte na wynoszonych antenach mogą być zatem dobrym sposobem na usprawnienie łączności

jonosferycznej. Warto również zauważyć dodatkową możliwość praktycznego zastosowania zaproponowanego systemu antenowego wynoszonego do Stratosfery, a mianowicie do badań tzw „dynamicznych elektrycznych profili Jonosfery”. Obecne badania jonizacji Jonosfery prowadzone z ziemi obarczone są licznymi trudnościami. Przedstawione w artykułach Doktoranta badania wykazały pełną możliwość wykorzystania aerostatów do wynoszenia anten bez obawy uszkodzenia takiego zestawu pomiarowego w niesprzyjających warunkach atmosferycznych. Wykorzystanie opracowanych technik do badania jonizacji Jonosfery umożliwi efektywniejsze dynamiczne oszacowanie wysokości warstwy odbijającej Jonosfery, wzmiankowanej przez Doktoranta.

#### **REASUMUJĄC**

**Stwierdzam, że recenzowana rozprawa doktorska spełnia wymagania z wyraźnym nadmiarem określone w obowiązującej ustawie Prawo o szkolnictwie wyższym i nauce. W związku z powyższym wnioskuję o dopuszczenie rozprawy mgr. inż. Tomasza A. Misia do publicznej obrony.**

*Kubacki*