

Załącznik nr 3 do wniosku o wszczęcie postępowania habilitacyjnego

AUTOREFERAT HABILITACYJNY

przedstawiający opis kariery zawodowej oraz osiągnięcia i aktywności naukowe

dr inż. Grzegorz Karnas

(stopień naukowy, imię i nazwisko)

Politechnika Rzeszowska im. Ignacego Łukasiewicza

Wydział Elektrotechniki i Informatyki

Katedra Elektrotechniki i Podstaw Informatyki

(miejsce zatrudnienia)

Rzeszów, 07.05.2025 r.

(miejsce, data)

Spis treści

1. Dane wnioskodawcy [\(4\)](#)
2. Posiadane dyplomy, stopnie naukowe lub artystyczne [\(4\)](#)
3. Informacja o dotychczasowym zatrudnieniu w jednostkach naukowych lub artystycznych [\(4\)](#)
4. Omówienie osiągnięć, o których mowa w art. 219 ust. 1 pkt. 2 ustawy z dnia 20 lipca 2018 r. Prawo o szkolnictwie wyższym i nauce (Dz. U. z 2021 r. poz. 478 z późn. zm.) [\(4\)](#)
 - 4.1. Określenie oraz tytuły osiągnięć naukowych (zgodnie z wnioskiem) wraz z wykazami publikacji i patentów dokumentujących osiągnięcia [\(4\)](#)
 - 4.2. Omówienie głównych osiągnięć naukowych stanowiących znaczny wkład w rozwój dyscypliny automatyka, elektronika, elektrotechnika i technologie kosmiczne [\(7\)](#)
 - 4.2.1. Wprowadzenie w zakres tematyki osiągnięć naukowych oraz organizacja autoreferatu [\(7\)](#)
 - 4.2.2. Omówienie cyklu powiązanych tematycznie publikacji naukowych [\(8\)](#)
 - 4.2.3. Omówienie zrealizowanego oryginalnego osiągnięcia projektowego, konstrukcyjnego, technologicznego [\(29\)](#)
 - 4.2.4. Podsumowanie i określenie wkładu w rozwój dyscypliny [\(35\)](#)
 - 4.3. Omówienie pozostałych istotnych osiągnięć naukowo-badawczych [\(37\)](#)
 - 4.3.1. Zaprojektowanie, wdrożenie oraz modernizacja Systemu Rejestracji Wyladowań Atmosferycznych PRz na potrzeby rejestracji zjawisk piorunowych [\(38\)](#)
 - 4.3.2. Modelowanie kształtu i parametrów prądu piorunowego u podstawy kanału piorunowego na potrzeby systemów lokalizacji wyladowań atmosferycznych [\(40\)](#)
 - 4.3.3. Pomiary i modelowanie wielowarstwowych struktur geoelektrycznych gruntu na potrzeby analizy układów uziemień [\(42\)](#)
 - 4.3.4. Analiza rozptyłu prądu udarowego w urządzeniach piorunochronnych i instalacjach elektrycznych budynków z wykorzystaniem generatorów dużej mocy [\(43\)](#)
 - 4.3.5. Badania z wykorzystaniem generatorów przepięć piorunowych indukowanych w układach awioniki [\(45\)](#)
 - 4.4. Literatura pomocnicza dokumentująca aktualny stan wiedzy [\(46\)](#)
5. Informacja o wykazywaniu się istotną aktywnością naukową albo artystyczną realizowaną w więcej niż jednej uczelni, instytucji naukowej lub instytucji kultury, w szczególności zagranicznej [\(48\)](#)
 - 5.1. Współpraca naukowa z International Center for Lightning Research and Testing (ICLRT) należącym do University of Florida [\(48\)](#)
 - 5.2. Współpraca naukowa z Instytutem Geofizyki Polskiej Akademii Nauk [\(50\)](#)
 - 5.3. Współpraca naukowa z Instytutem Systemów Elektronicznych Politechniki Warszawskiej [\(51\)](#)

- 5.4. Współpraca naukowa Instytutem Elektrotechniki Teoretycznej i Systemów Informacyjno-Pomiarowych Politechniki Warszawskiej [\(51\)](#)
- 5.5. Współpraca naukowa z Instytutem Meteorologii i Gospodarki Wodnej – Państwowy Instytut Badawczy [\(52\)](#)
- 5.6. Współpraca z operatorem międzynarodowego systemu lokalizacji wyładowań atmosferycznych LINET (nowcast GmbH, Monachium, Niemcy) [\(53\)](#)

6. Informacja o osiągnięciach dydaktycznych, organizacyjnych oraz popularyzujących naukę lub sztukę [\(53\)](#)

- 6.1. Osiągnięcia dydaktyczne [\(53\)](#)
- 6.2. Osiągnięcia organizacyjne [\(55\)](#)
 - 6.2.1. Organizacja konferencji i seminariów [\(55\)](#)
 - 6.2.2. Działania organizacyjne w grantach badawczych [\(56\)](#)
 - 6.2.3. Działania organizacyjne w Katedrze Elektrotechniki i Podstaw Informatyki oraz na Politechnice Rzeszowskiej [\(57\)](#)
- 6.3. Osiągnięcia popularyzujące naukę [\(58\)](#)
 - 6.3.1. Konferencje popularnonaukowe [\(58\)](#)
 - 6.3.2. Opracowanie materiałów promujących działania badawcze [\(59\)](#)
 - 6.3.3. Kontakt z mediami [\(59\)](#)

7. Oprócz kwestii wymienionych w pkt. 1-6, wnioskodawca może podać inne informacje, ważne z jego punktu widzenia, dotyczące jego kariery zawodowej [\(59\)](#)

- 7.1. Nagrody i wyróżnienia [\(60\)](#)
- 7.2. Kursy, szkolenia rozszerzające kompetencje [\(61\)](#)
- 7.3. Inne [\(61\)](#)

1. Imię i nazwisko.

Grzegorz Sławomir Karnas

2. Posiadane dyplomy, stopnie naukowe lub artystyczne – z podaniem podmiotu nadającego stopień, roku ich uzyskania oraz tytułu rozprawy doktorskiej.

30.05.2011 r. – magister inżynier, Politechnika Rzeszowska im. Ignacego Łukasiewicza, Wydział Elektrotechniki i Informatyki, specjalność: Przetwarzanie i użytkowanie energii elektrycznej, temat pracy magisterskiej: „Wykorzystanie metody geoelektrycznej do badania uwarstwienia gruntu” (obrona z wyróżnieniem)

Promotor: dr hab. inż. Grzegorz Masłowski, prof. PRz

Recenzenci: dr hab. inż. Jerzy Bajorek, prof. PRz; dr hab. inż. Grzegorz Masłowski, prof. PRz

12.07.2019 r. – doktor inżynier, Politechnika Rzeszowska im. Ignacego Łukasiewicza, Wydział Elektrotechniki i Informatyki, temat rozprawy doktorskiej: „Analiza rejestracji pola elektrycznego w warunkach burzowych pod kątem wykorzystania w systemach lokalizacji wyładowań atmosferycznych” (obrona z wyróżnieniem) [\[D1\]](#) ([Załącznik nr 2](#))

Promotor: dr hab. inż. Grzegorz Masłowski, prof. PRz

Recenzenci: prof. dr hab. inż. Tomasz Boczar; dr hab. inż. Marek Olesz, prof. PG

3. Informacja o dotychczasowym zatrudnieniu w jednostkach naukowych lub artystycznych.

15.06.2011 r. do 14.06.2016 r. – asystent naukowy, Politechnika Rzeszowska im. Ignacego Łukasiewicza, Wydział Elektrotechniki i Informatyki, Zakład Podstaw Elektrotechniki i Informatyki

15.06.2016 r. do 31.09.2019 r. – asystent naukowo-dydaktyczny, Politechnika Rzeszowska im. Ignacego Łukasiewicza, Wydział Elektrotechniki i Informatyki, Katedra Elektrotechniki i Podstaw Informatyki

01.10.2019 r. do chwili obecnej – adiunkt naukowo-dydaktyczny, Politechnika Rzeszowska im. Ignacego Łukasiewicza, Wydział Elektrotechniki i Informatyki, Katedra Elektrotechniki i Podstaw Informatyki

4. Omówienie osiągnięć, o których mowa w art. 219 ust. 1 pkt. 2 ustawy z dnia 20 lipca 2018 r. Prawo o szkolnictwie wyższym i nauce (Dz. U. z 2021 r. poz. 478 z późn. zm.).

4.1. Określenie oraz tytuły osiągnięć naukowych (zgodnie z wnioskiem) wraz z wykazami publikacji i patentów dokumentujących osiągnięcia

Główne osiągnięcia naukowe w rozumieniu art. 219 ust. 1 pkt. 2 ustawy z dnia 20 lipca 2018 r. Prawo o szkolnictwie wyższym i nauce (Dz. U. z 2021 r. poz. 478 z późn. zm.), będące podstawą ubiegania się o nadanie stopnia doktora habilitowanego stanowią:

- cykl powiązanych tematycznie artykułów naukowych opublikowanych w czasopismach naukowych pt.:

Współczesne metody detekcji oraz identyfikacji zjawisk piorunowych na potrzeby ochrony odgromowej i przepięciowej

Tabela 1. Lista publikacji wchodzących w skład cyklu powiązanych tematycznie artykułów dokumentujących osiągnięcie (w kolejności chronologicznej na podst. wykazu uzyskanego z bazy dorobku naukowego Biblioteki PRz)

Lp.	Dane bibliograficzne publikacji	IF (MNiSW) Udział
A1	Karnas, G.(65%) , Maslowski, G.(25%), & Baranski, P.(10%) (2020). A novel algorithm for determining lightning leader time onset from electric field records and its application for lightning channel height calculations. <i>Electric Power Systems Research</i> , 178(106021), 106021. https://doi.org/10.1016/j.epsr.2019.106021	3,414 (100 pkt.) 65%
A2	Karnas, G.(60%) , & Filik, K.(40%) (2020). A low-cost ELF-MF orthogonal sensor and preamplifier dedicated for wide range lightning magnetic field registration. <i>Sensors and Actuators. A, Physical</i> , 315(112281), 112281. https://doi.org/10.1016/j.sna.2020.112281	3,407 (100 pkt.) 60%
A3	Karnas, G.(55%) , Barański, P.(30%), & Masłowski, G.(15%) (2022). A new method for modeling and parameter identification of positively charged downward lightning leader based on remote lightning electric field signatures recorded in the ELF/MF range and 3D Doppler radar scanning data. <i>Energies</i> , 15(22), 8566. https://doi.org/10.3390/en15228566	3,2 (140 pkt.) 55%
A4	Karnas, G.(55%) , Maslowski, G.(15%), Baranski, P.(25%), & Gajda, W.(5%) (2023). Spectral domain analysis of preliminary breakdown pulse train activity during leader electric field signatures of positive cloud-to-ground flash incidents recorded during 2019 thunderstorm season in central part of Poland. <i>Electric Power Systems Research</i> , 216(109066), 109066. https://doi.org/10.1016/j.epsr.2022.109066	3,3 (100 pkt.) 55%
A5	Karnas, G.(45%) , Dralus, G.(40%), & Maslowski, G.(15%) (2024). Identification of cloud-to-ground lightning and intra-cloud lightning based on their radiated electric field signatures using different types of neural networks and machine learning classifiers. <i>Applied Soft Computing</i> , 159(111643), 111643. https://doi.org/10.1016/j.asoc.2024.111643	7,2 (200 pkt.) 45%
A6	Karnas, G.(60%) , & Maslowski, G.(40%) (2024). Correlated lightning electric field and high-speed video observations of recoil leaders recorded in Rzeszow, Poland. <i>IEEE Transactions on Electromagnetic Compatibility</i> , 1–10. https://doi.org/10.1109/temc.2024.3477622	2,0 (100 pkt.) 60%
A7	Karnas, G.(100%) , (2025). Design and application of omnidirectional mirror for catadioptric optical system dedicated to high-speed video registration of lightning. <i>Measurement: Journal of the International Measurement Confederation</i> , 242(115806), 115806. https://doi.org/10.1016/j.measurement.2024.115806	5,2 (200 pkt.) 100%
A8	Karnas, G.(100%) , (2025a). Comprehensive calibration of omnidirectional mirror and catadioptric optical system dedicated to high-speed video registration of lightning. <i>Measurement: Journal of the International Measurement Confederation</i> , 242(116137), 116137. https://doi.org/10.1016/j.measurement.2024.116137	5,2 (200 pkt.) 100%
A9	Karnas, G.(60%) , Maslowski, G.(20%), & Rakov, V. A.(20%) (2025). Frequency spectra features of electric field waveforms produced by close and middle-range compact intracloud discharges and their discrimination from cloud-to-ground lightning. <i>Electric Power Systems Research</i> , 243(111498), 111498. https://doi.org/10.1016/j.epsr.2025.111498	3,3 (100 pkt.) 60%

- zrealizowane oryginalne osiągnięcie projektowe, konstrukcyjne, technologiczne pt.:

Stanowisko probierczo-pomiarowe oraz metoda badań wysokonapięciowych impedancji, rezystywności i odporności materiałów kompozytowych

Tabela 2. Lista publikacji i patentów dokumentujących zrealizowane oryginalne projektowe, konstrukcyjne, technologiczne osiągnięcie naukowe (w kolejności chronologicznej na podst. wykazu uzyskanego z bazy dorobku naukowego Biblioteki PRz)

Lp.	Dane bibliograficzne publikacji	IF (MNiSW) Udział
B1	Filik, K.(16,67%), Karnas, G.(16,67%) , Masłowski, G.(16,67%), Oleksy(16,67%), M., Oliwa, R.(16,67%), & Bulanda, K.(16,67%) (2021). Testing of conductive carbon fiber reinforced polymer composites using current impulses simulating lightning effects. <i>Energies</i> , 14(23), 7899. https://doi.org/10.3390/en14237899	3,252 (140 pkt.) 16,7%
B2	Filik, K.(22,5%), Oliwa, R.(10%), Karnas, G.(22,5%) , Masłowski, G.(20%), Bulanda, K.(10%), Oleksy, M.(10%), & Królczyk, J.(5%) (2022). A new method to electrical parameters identification of carbon fiber reinforced composites using lightning disturbances corresponding to subsequent return strokes. <i>Measurement: Journal of the International Measurement Confederation</i> , 199(111546), 111546. https://doi.org/10.1016/j.measurement.2022.111546	5,6 (200 pkt.) 22,5%
B3	Filik, K. (40%), Karnas, G. (30%) , Masłowski, G. (15%), Oliwa, R. (5%), Bulanda, K. (5%), Oleksy, M. (5%) Stanowisko probierczo-pomiarowe do badań wysokonapięciowych impedancji, rezystywności i odporności materiałów kompozytowych oraz sposób badania wysokonapięciowych impedancji, rezystywności i odporności materiałów kompozytowych, 2023, Patent na wynalazek przyznany ewaluowanemu podmiotowi przez Urząd Patentowy Rzeczypospolitej Polskiej, PL243235B1	Nie dotyczy (75 pkt.) 30%

Tabela 3. Zbiorcza statystyka współczynnika Impact Factor (IF) oraz punktów MNiSW dla głównych osiągnięć naukowych

Typ osiągnięcia naukowego	Sumaryczny IF ^{b)}	Sumaryczna liczba punktów MNiSW	Średni IF publikacji ^{b)}	Średnia liczba punktów MNiSW publikacji
Cykl publikacji [A1]-[A9]	36,221	1240 pkt.	4,024	138 pkt.
Osiągnięcie projektowe, konstrukcyjne, technologiczne [B1]-[B3]	8,852	340 pkt. (415 pkt.) ^{a)}	4,426	170 pkt. (138 pkt.) ^{a)}
Osiągnięcia sumarycznie [A1]-[A9] [B1]-[B3]	45,073	1580 pkt. (1655 pkt.) ^{a)}	4,097	144 pkt. (138 pkt.) ^{a)}

^{a)} z uwzględnieniem patentu [B3]

^{b)} IF przyjęty wg roku publikacji

4.2. Omówienie głównych osiągnięć naukowych stanowiących znaczny wkład w rozwój dyscypliny automatyka, elektronika, elektrotechnika i technologie kosmiczne

4.2.1. Wprowadzenie w zakres tematyki osiągnięć naukowych oraz organizacja autoreferatu

Ochrona odgromowa i przepięciowa stanowi istotny element obszaru nauk związanych z automatyką, elektroniką, elektrotechniką, jak również technologiami kosmicznymi. Współczesna ochrona odgromowa nie jest już kojarzona wyłącznie z ochroną budynków mieszkalnych, ale obejmuje znacznie szerszy obszar, często niekonwencjonalnych zastosowań. Na oddziaływanie piorunowe szczególnie narażona jest infrastruktura naziemna lotnisk, sieci elektroenergetycznych, farm wiatrowych, jak również rozległe obszary leśne. Statystycznie przyjmuje się, że każdy samolot pasażerski doświadcza bezpośredniego uderzenia pioruna co 1000-2000 godzin lotu (1-2 razy w ciągu roku). Problem uszkodzeń samolotów na skutek bezpośredniego oddziaływania piorunowego łuku elektrycznego stanowi istotny czynnik wpływający na koszty procedur serwisowych, wymiany zużytych elementów poszycia, jak również bezpieczeństwo pasażerów podczas lotu. Wskazuje to na zasadność prowadzonych przeze mnie badań w celu poprawy własności elektrycznych oraz fizyko-chemicznych nowych materiałów konstrukcyjnych w postaci kompozytów stosowanych w lotnictwie. Postępująca miniaturyzacja awioniki i związany z tym wzrost wrażliwości tego typu urządzeń sprawia, że te same poziomy zaburzeń elektromagnetycznych generowanych przez wyładowania atmosferyczne stanowią coraz większe zagrożenie związane z czasowym lub trwałym uszkodzeniem podzespołów elektronicznych oraz złożonych instalacji elektrycznych statków powietrznych. Najnowsze dane klimatyczne wskazują, że rok 2024 był najcieplejszym w historii. Przyczyniło się to do wzrostu aktywności burzowej w wielu rejonach kuli ziemskiej, nawet o 100 godzin burzowych w ciągu roku (źródło: *Vaisala*). Szacuje się, że jedynie w samych Stanach Zjednoczonych wyładowania atmosferyczne odpowiadają za 56% strat obszarowych na skutek pożarów lasów. To samo źródło podaje, że wyładowania atmosferyczne na terenie USA odpowiadają za około 100 mln dolarów strat związanych z uszkodzeniami elektrowni wiatrowych, w tym 60% wszystkich uszkodzeń stanowią uszkodzenia łopat turbin wiatrowych. Globalna roczna emisja CO₂ związana z pożarami lasów na przestrzeni ostatnich lat stanowi blisko dwukrotność emisji pochodzących z transportu lotniczego oraz około jedną trzecią emisji CO₂ generowaną przez transport samochodowy (źródła: *International Energy Agency, Copernicus Atmosphere Monitoring Service*). Dlatego też badanie i monitoring bezpośrednich oraz pośrednich efektów oddziaływań piorunowych stanowi istotny element w kontekście prewencji i ochrony przeciwko szkodliwym skutkom groźnych zjawisk atmosferycznych. Jednym z podstawowych środków ochronnych stosowanych współcześnie w tym celu są systemy lokalizacji wyładowań atmosferycznych (ang. *LLS – Lightning Location Systems*). Odgrywają one niebagatelną rolę w wielu obszarach ochrony odgromowej i są jednym z podstawowych obszarów moich badań prowadzonych od 14 lat na Politechnice Rzeszowskiej (PRz).

W celu kompletnego i jednoznacznego omówienia osiągnięć, o których mowa w art. 219 ust. 1 pkt. 2 ustawy z dnia 20 lipca 2018 r. Prawo o szkolnictwie wyższym i nauce (Dz. U. z 2021 r. poz. 478 z późn. zm.), stanowiących jedną z trzech podstawowych przesłanek do nadania stopnia doktora habilitowanego, przyjąłem następującą organizację autoreferatu. We wprowadzeniu (sekcja [4.2.1](#)) omówiłem potrzebę oraz główne motywacje prowadzonej działalności naukowo-badawczej. Moje osiągnięcia naukowe zostały podzielone na **osiągnięcia główne** (sekcja [4.2](#)) – wymienione we wniosku przewodnim oraz **pozostałe istotne osiągnięcia** (sekcja [4.3](#)). Całość stanowi mój kompletny wkład naukowy w rozwój

dyscypliny. We wniosku przewodnim zdefiniowałem dwa główne osiągnięcia naukowe: **jednotematyczny cykl publikacji** oraz **oryginalne osiągnięcie projektowe, konstrukcyjne i technologiczne**. Zostały one omówione w sposób szczegółowy odpowiednio w sekcjach [4.2.2](#) oraz [4.2.3](#). Wkład głównych osiągnięć w rozwój dyscypliny automatyka, elektronika, elektrotechnika i technologie kosmiczne został podsumowany w sekcji [4.2.4](#). Pozostałe istotne osiągnięcia (sekcja [4.3](#)) podzieliłem na pięć niezależnych podsekcji, w których opisałem swój pozostały wkład naukowy usystematyzowany względem istotności tj. rozpoczynając od najbardziej znaczących dokonań. Sekcja [4.4](#) obejmuje syntetyczny wykaz literatury pomocniczej, mający na celu wykazanie nowatorstwa oraz istotności przedstawionych osiągnięć na tle aktualnego stanu wiedzy. Sekcja [5](#) opisuje moją aktywność naukową realizowaną na więcej niż jednej uczelni oraz instytucji naukowej. W tej sekcji wydzieliłem sześć obszarów aktywności. Pozostałe sekcje autoreferatu zostały opracowane stosownie do wytycznych Rady Doskonałości Naukowej (RDN) i z uwagi na mniejszy stopień złożoności nie wymagają dalszego komentarza. Autoreferat posiada charakter interaktywny, umożliwiając tym samym bardziej komfortowy dostęp do poszczególnych sekcji, jak również do zawartości poszczególnych pozycji bibliograficznych. Pozycje literaturowe z mojego dorobku oznaczone literą „D” zostały wykazane w [Załączniku nr 4](#).

4.2.2. Omówienie cyklu powiązanych tematycznie publikacji naukowych

Cykl powiązanych tematycznie publikacji [[A1-A9](#)] zatytułowany „*Współczesne metody detekcji oraz identyfikacji zjawisk piorunowych na potrzeby ochrony odgromowej i przepięciowej*” obejmuje 9 pozycji, z których każda została opublikowana w wysoko punktowanym czasopiśmie o zasięgu międzynarodowym ([Tab. 1](#)). Wszystkie publikacje powstały po doktoracie i jestem ich samodzielnym lub głównym autorem z największym udziałem procentowym. Średnia liczba punktów MNiSW na publikację z cyklu wynosi **138 pkt.**, natomiast **średni IF czasopism** obliczony, jako sumaryczny IF publikacji podzielony przez ich liczbę wynosi **ponad 4** ([Tab. 3](#)). W cyklu publikacji, na potrzeby dalszej analizy, można wyróżnić trzy wzajemnie ze sobą powiązane podobszary badań:

- **Identyfikacja parametrów oraz modelowanie zjawisk piorunowych na podstawie zarejestrowanego pola elektrycznego** [[A1,A3](#)]
- **Nowoczesne środki i metody detekcji wyładowań atmosferycznych** [[A2,A7,A8](#)]
- **Detekcja oraz identyfikacja zjawisk piorunowych z wykorzystaniem analizy spektralnej, sieci neuronowych oraz szybkiej wideorejestracji** [[A4,A5,A6,A9](#)]

W dalszej części opisu przedstawiłem zakres tematyczny każdego z elementów cyklu publikacji ze szczególnym uwzględnieniem swojego osobistego wkładu w powstanie osiągnięcia. Szczegółowa i wnikliwa analiza aktualnego stanu wiedzy została każdorazowo przeanalizowana w sekcjach *Introduction* poszczególnych artykułów wchodzących w skład osiągnięcia [[A1-A9](#)]. Publikacje te zostały dołączone do wniosku habilitacyjnego ([Załącznik nr 5](#)). Z uwagi na znaczącą ilość wszystkich pozycji literaturowych, w autoreferacie zdecydowałem się na wprowadzenie sekcji pomocniczej [4.4](#), w której wybrałem publikacje z literatury krajowej oraz ogólnoswiatowej najistotniejsze z punktu widzenia poszczególnych elementów prezentowanego cyklu. Celem było zsyntetyzowanie odniesień do stanu wiedzy przy jednoczesnym zachowaniu poziomu merytorycznego opisu oraz wykazanie aktualności badań przeprowadzonych w ramach przedłożonego cyklu publikacji. Pomocnicze pozycje literaturowe zostały oznaczone w tekście indeksem „L”. Kolejność omawiania poszczególnych elementów cyklu jest zgodna z przedstawioną w tym akapicie kolejnością trzech głównych kierunków badań cyklu. Poszczególne pozycje cyklu publikacji zostały omówione indywidualnie w dedykowanych akapitach poprzedzonych fragmentem wprowadzającym, w którym wskazałem znaczenie i aktualność danego kierunku badań dla dyscypliny. Bezpośrednio po każdym akapicie, omawiającym poszczególne pozycje cyklu,

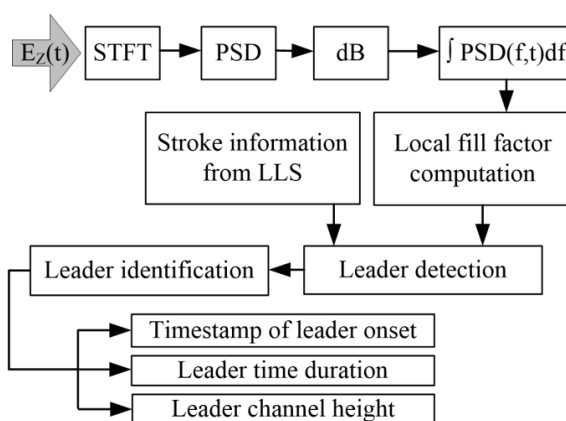
umieściłem również akapit syntetycznie podsumowujący wkład własny oraz innych współautorów w powstanie danej pozycji cyklu. Został on jednocześnie potwierdzony w formie oświadczeń zawartych w [Załączniku nr 6](#).

W celu szybszego i kompleksowego zapoznania z aktualnym stanem wiedzy z zakresu badań związanych z prezentowanym cyklem publikacji, można wykorzystać pozycje książkowe [[L1-L4](#)], w tym [[L5](#)] w języku polskim lub znacznie bardziej syntetyczny opis [[L6](#)], a także pozycję literaturową z bezpośrednim odniesieniem do aspektów badań wyładowań atmosferycznych istotnych z perspektywy ochrony odgromowej i przepięciowej [[L7](#)]. Przedstawiłem również odniesienia do literatury związanej z aparaturą [[L8](#)] oraz metodami rejestracji stosowanymi w obecnych systemach lokalizacji wyładowań atmosferycznych [[L9](#)], jak również zbiorczy przegląd możliwości akwizycyjnych i funkcjonalności systemów LLS działających na całym świecie [[L10](#)] z uwzględnieniem aktualnych modyfikacji i ulepszeń tych systemów [[L11](#)].

Pierwszy kierunek badań cyklu publikacji prowadzonych na potrzeby współczesnych systemów lokalizacji wyładowań atmosferycznych obejmuje dwie pozycje [[A1,A3](#)], w których dokonano identyfikacji parametrów oraz modelowania zjawisk piorunowych na podstawie zarejestrowanego pola elektrycznego fazy lidera, poprzedzającej pierwszy udar główny doziemnego wyładowania atmosferycznego [[L1](#)]. Analizując liczne przypadki rejestracji wyładowań atmosferycznych z obszaru Rzeszowa, zauważyłem znaczącą zależność kształtu piorunowego pola elektrycznego fazy liderowej od odległości oraz wysokości kanału piorunowego i związany z tym niewykorzystany jak dotąd potencjał identyfikacji parametrów wyładowania atmosferycznego, takich jak: wysokość kanału piorunowego, gęstość ładunku w kanale piorunowym, czy charakterystyka zmienności prędkości lidera wzdłuż kanału piorunowego. Każdy z tych parametrów jest ważny z punktu widzenia ochrony odgromowej. Wysokość kanału piorunowego stanowi istotną informację dla ruchu lotniczego, pozwalając określać niebezpieczne strefy w chmurze burzowej oraz pułapy lotów, które samoloty powinny omijać. Gęstość ładunku w kanale lidera pozwala wnioskować o całkowitym ładunku następującego po nim wyładowania głównego, które w znacznym stopniu neutralizuje ładunek elektryczny rozłożony w kanale piorunowym na etapie propagacji lidera skokowego. Z wartością ładunku jest związana energia wyładowania atmosferycznego i m.in. efekty termiczne w obiekcie poddanym bezpośredniemu oddziaływaniu prądu piorunowego. Prędkość przemieszczania się fali prądowej w kanale piorunowym wpływa bezpośrednio na wartości przepięć indukowanych w aparaturze, systemach elektrycznych oraz liniach napowietrznych. Do tej pory faza liderowa nie była efektywnie wykorzystywana przez systemy LLS. Systemy tego typu rejestrują jedynie sygnaturę pola elektromagnetycznego pochodzącą od wyładowania głównego, określając na tej podstawie wartość szczytową prądu piorunowego, lokalizację 2D wyładowania atmosferycznego oraz w niektórych przypadkach wysokość źródła wyładowania. Następnie na tej podstawie klasyfikują wyładowanie atmosferyczne, jako doziemne lub wewnątrzchmurowe. Należy zwrócić uwagę, że znajomość wyłącznie wartości szczytowej prądu piorunowego nie pozwala jednoznacznie określić energii wyładowania atmosferycznego. Uniemożliwia to tym samym poprawne oszacowanie efektów niszczących dla konkretnego incydentu piorunowego. Ponadto wysokość źródła impulsu elektromagnetycznego dla wyładowania atmosferycznego w chmurze burzowej raportowana przez niektóre systemy LLS jest nie do końca wiarygodnym parametrem. Świadczy o tym fakt, że dla każdej zarejestrowanej sygnatury pola elektromagnetycznego stosowany jest ten sam model matematyczny [[L1,L8](#)] podczas, gdy mechanizm i geometria kanału piorunowego wyładowań doziemnych oraz wewnątrzchmurowych zasadniczo się różnią [[L1](#)]. Zaproponowany przeze mnie algorytm obliczania wysokości kanału piorunowego [[A1](#)] bazuje na procedurze dopasowania sparametryzowanego modelu lidera skokowego do zarejestrowanego fragmentu przebiegu czasowego sygnatury piorunowego

pola elektrycznego. Pozwala to uwzględnić znacznie większą ilość próbek sygnału niż w przypadku klasycznych metod LLS, które wykorzystują wyłącznie pojedyncze próbki związane z wartością szczytową sygnatur impulsu elektromagnetycznego. Wpływa to również korzystnie na poprawę dokładności wyznaczenia wysokości kanału piorunowego.

W publikacji [A1] zamodelowałem lider skokowy zarejestrowany w ujemnych wyładowaniach atmosferycznych, które stanowią około 90% wszystkich wyładowań doziemnych. Celem artykułu było docelowe wyznaczenie wysokości kanału piorunowego na bazie uprzedniej identyfikacji markerów czasowych początku i końca fazy liderowej. W artykule w całości bazowałem na danych piorunowego pola elektrycznego, które uzyskałem z bazy wdrożonego przeze mnie Systemu Rejestracji Wyładowań Atmosferycznych PRz. Główny algorytm identyfikacji fazy lidera skokowego (Rys. 1) był również w całości moją inicjatywą.



Rysunek 1. Algorytm detekcji oraz identyfikacji parametrów lidera skokowego [A1]

Jednym z najtrudniejszych elementów procedury identyfikacji początku fazy liderowej było poprawne i efektywne usunięcie wpływu tzw. fazy wyładowań wstępnych (PB) (ang. *Preliminary Breakdown*) obserwowanych na początku fazy lidera i uwidaczniających się głównie, jako szum wysokoczęstotliwościowy. W przypadku sygnałów impulsowych, jakimi są przebiegi piorunowego pola elektrycznego, zastosowanie klasycznych filtrów dolnoprzepustowych np. Butterwortha skutkowałoby niedopuszczalnymi przez systemy LLS opóźnieniami sygnału przefiltrowanego w stosunku do przebiegu zarejestrowanego. W związku z tym zastosowałem w tym celu filtr KZ (ang. Kolmogorov-Zurbenko). Filtr ten powstał m.in. w celu analizy zjawisk przejściowych o charakterze stochastycznym i był już przeze mnie wykorzystywany w rozprawie doktorskiej [D1]. Kluczowym z punktu widzenia dokładności wyznaczania wysokości kanału piorunowego, było określenie markera czasowego początku fazy lidera skokowego. Określenie tego parametru bezpośrednio na podstawie przebiegów pola elektrycznego w dziedzinie czasu było problematyczne, zwłaszcza dla rejestracji z zakresu odległości porównywalnej z wysokością kanału piorunowego. Wynika to z faktu znaczącego wypłaszczenia pola elektrycznego lidera skokowego w tym zakresie odległości (Fig. 5 w [A1]). Dlatego też zaproponowałem rozwiązanie bazujące na transformacji STFT, która po scałkowaniu względem częstotliwości znacząco wzmacniała widoczność fazy liderowej w wynikowym przebiegu. Następnie zdefiniowałem specjalną funkcję pomocniczą (1):

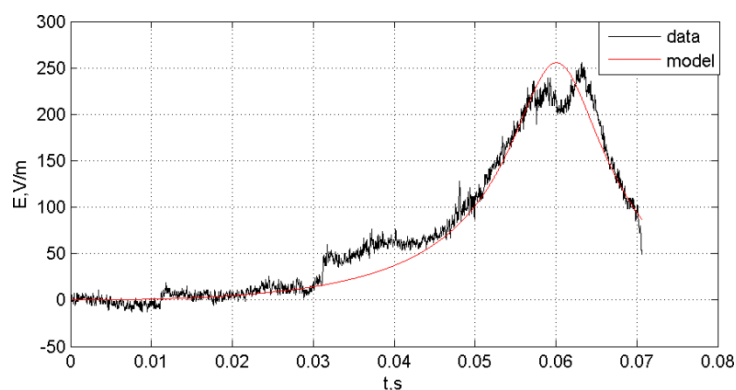
$$P_F(t) = \frac{\int_{t_{RS}}^t P(\tau) d\tau}{t_{RS} - t} \quad (1)$$

gdzie: $P_F(t)$ to tzw. funkcja wypełnienia względem czasu t , t_{RS} to marker czasowy udaru głównego uzyskany z bazy systemu LLS, $P(\tau)$ to scałkowane częstotliwościowo widmo

STFT, natomiast τ to pomocniczy parametr całkowania. Na bazie tej funkcji wprowadziłem tzw. współczynnik wypełnienia (ang. *fill factor*), który pozwalał ostatecznie określić pozycję markera czasowego początku fazy liderowej (Fig. 4e,5e,6e w [A1]). W dalszej części algorytmu, wykorzystując sparametryzowaną zależność opisującą składową pionową piorunowego pola elektrycznego fazy liderowej [L1], dokonałem dopasowania modelu do zarejestrowanego przebiegu pola elektrycznego. Kluczowym zadaniem w tym aspekcie było uprzednie wyrugowanie z modelu fazy liderowej parametru z_t tj. wysokości wierzchołka lidera skokowego nad powierzchnią ziemi obserwowanej w danej chwili czasu t . W tym celu zaproponowałem równanie (2):

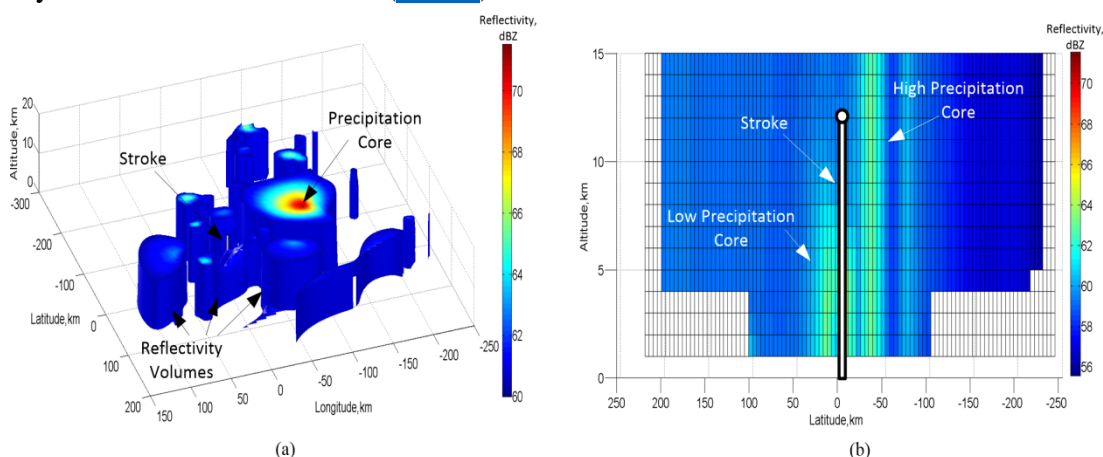
$$z_t = H_m \left(1 - \frac{t}{T_L}\right) \quad (2)$$

gdzie: H_m – poszukiwana wysokość kanału piorunowego, T_L – zidentyfikowany czas trwania fazy liderowej, t – parametr czasu. Procedurę dopasowania przeprowadziłem w programie Matlab z wykorzystaniem dopasowania metodą najmniejszych kwadratów (ang. *least squares method*) (Rys. 2).



Rysunek 2. Efekt dopasowania modelu fazy lidera skokowego do jednego z przebiegów zarejestrowanego piorunowego pola elektrycznego [A1]

Obliczona wysokość kanału piorunowego H_m została zweryfikowana na podstawie danych z radaru Dopplera pracującego w rejonie Rzeszowa (lotnisko Jasionka) uzyskanych w ramach współpracy habilitanta z IMGW-PIB (Rys. 3).



Rysunek 3. Weryfikacja obliczonej wysokości kanału piorunowego z wysokością rdzenia opadowego: (a) wizualizacja danych radarowych w przestrzeni 3D; (b) superpozycja zidentyfikowanego kanału piorunowego na tle rdzenia opadowych [A1]

Dane odbiciowości radarowej pozyskane w postaci surowych binarnych plików wolumetrycznych zostały przetworzone w Matlabie do postaci trójwymiarowej za pomocą opracowanej przeze mnie procedury. Stworzyło to możliwość znacznie bardziej wnikliwej i niemal nieograniczonej analizy geometrii kanału piorunowego na tle poszczególnych rdzeni opadowych. Procedura ta została również wykorzystana w innych publikacjach cyklu [A2,A6].

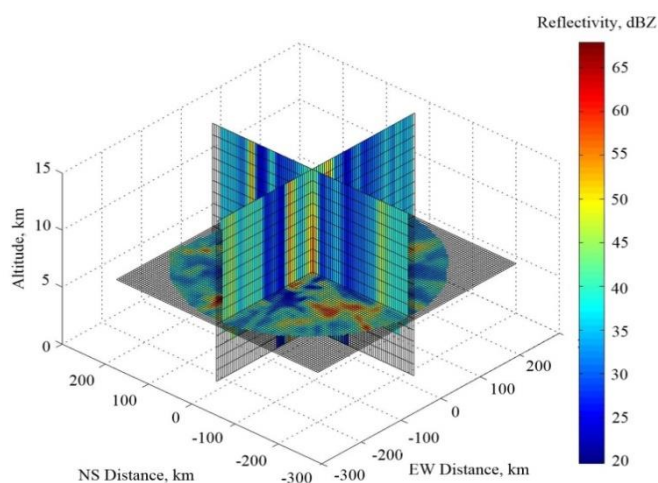
Podsumowując, mój udział w publikacji [A1] oceniam na 65%. Obejmował on: koncepcję całego artykułu, pozyskanie danych z wdrożonego przeze mnie Systemu Rejestracji Wyładowań Atmosferycznych, metodologię badań uwzględniającą stworzenie algorytmu identyfikacji fazy lidera skokowego z wykorzystaniem transformaty STFT oraz oprogramowania Matlab, analizę formalną obejmującą zastosowanie modelu do konkretnych rzeczywistych rejestracji piorunowego pola elektrycznego, weryfikację poprawności otrzymanych rezultatów z wykorzystaniem danych radarowych, opracowanie wersji pierwotnej artykułu oraz elementów graficznych, nanoszenie korekt współautorów oraz nadzorowanie procesu recenzji (*Corresponding Author*). Udział współautorów polegał głównie na merytorycznej weryfikacji zaproponowanej metody w postaci poprawek do kolejnych wersji artykułu, uzupełnieniu studium literaturowego, weryfikacji zgodności modelu z fizyką wyładowania atmosferycznego, jak również monitorowaniu projektu i pozyskaniu funduszy.

W publikacji [A3] głównym celem było modelowanie oraz identyfikacja fazy liderowej, tym razem w kontekście wyładowań doziemnych typu dodatniego. Wyładowania atmosferyczne o polaryzacji dodatniej stanowią jedynie 10% wszystkich wyładowań doziemnych, jednak są bardziej niebezpieczne od wyładowań atmosferycznych ujemnych. Wynika to ze statystycznie większych wartości szczytowych prądów piorunowych i transferów ładunku dla tego typu wyładowań atmosferycznych [L7]. Jest to również związane z faktem występowania tzw. składowej długotrwałej prądu piorunowego (CC) (ang. *Continuing Current*) po niemal każdym udarze głównym o polaryzacji dodatniej [L1]. Jak dotąd modelowanie fazy liderowej wyładowań atmosferycznych dodatnich nie było w sposób wystarczający przeanalizowane w literaturze. Dostępne są nieliczne pozycje, w których ta tematyka została podjęta [L12]. Należy jednak zauważyć, iż pomimo znaczącego stopnia zaawansowania, istniejące modele skupiają się głównie na wyznaczeniu przebiegów czasowych piorunowego impulsu elektromagnetycznego. Nie jest natomiast podjęty temat znacznie bardziej istotny z punktu widzenia ochrony odgromowej, tj. zagadnienie odwrotne, polegające na obliczeniu parametrów lidera dodatniego na podstawie zarejestrowanych rzeczywistych przebiegów pola elektrycznego. Wieloletnie badania fizyki rozwoju tego typu lidera wskazują na większy stopień złożoności modelu opisującego to zjawisko w odniesieniu do liderów poprzedzających wyładowania ujemne [L1-L3]. Główną różnicą w stosunku do modelu lidera ujemnego [A1], oprócz przeciwnej polaryzacji, jest większa zmienność prędkości propagacji lidera dodatniego. Aby uwzględnić ten efekt, w pracy [A3] zmodyfikowałem zależność (2) do postaci (3):

$$z_t = \frac{H_m - v_g t}{1 + \frac{v_c - v_g}{H_m} t} \quad (3)$$

gdzie: parametry z_t , H_m , t zdefiniowałem w równaniu (2), natomiast v_g oraz v_c oznaczają odpowiednio prędkość lidera w dolnej i górnej części kanału piorunowego. Z uwagi na zwiększenie liczby stopni swobody modelu, znacznie bardziej istotne stało się prawidłowe określenie warunków początkowych dla procedury optymalizacyjnej dopasowującej model do danych rzeczywistego pola elektrycznego fazy liderowej. W związku z tym w artykule [A3] poświęciłem temu osobną sekcję, w której zdefiniowałem w sposób jawny wartości początkowe: liniowej gęstości ładunku w kanale piorunowym ρ_{L0} , wysokości kanału H_{m0} oraz

prędkości v_{g0} i v_{c0} . W symulacji, którą przeprowadziłem w Matlabie, wykorzystałem 7 przypadków własnych rejestracji piorunowego pola elektrycznego z rejonu Rzeszowa oraz 9 przypadków z obszaru Warszawy, otrzymanych do symulacji od współautora z IGF PAN. Uzyskane wyniki uwiarygodniły w wielu przypadkach istotną zmienność prędkości propagacji lidera dodatniego oraz znaczące ilości całkowitego ładunku elektrycznego w kanale piorunowym zwiększającego prawdopodobieństwo wystąpienia fazy CC. Weryfikację otrzymanych rezultatów przeprowadziłem ponownie w sposób numeryczny z wykorzystaniem swojej autorskiej procedury Matlab dla wolumetrycznych danych radarowych uzyskanych z IMGW-PIB ([Rys. 4](#)).



Rysunek 4. Weryfikacja obliczonej wysokości kanału piorunowego z wysokością rdzenia opadowego dla przypadku lidera dodatniego o wyznaczonej wysokości $H_m=5,9$ km na podstawie danych wolumetrycznych odbiciowości radarowej przetworzonych w Matlabie [[A3](#)]. Lokalizacja 2D kanału piorunowego w początku układu współrzędnych

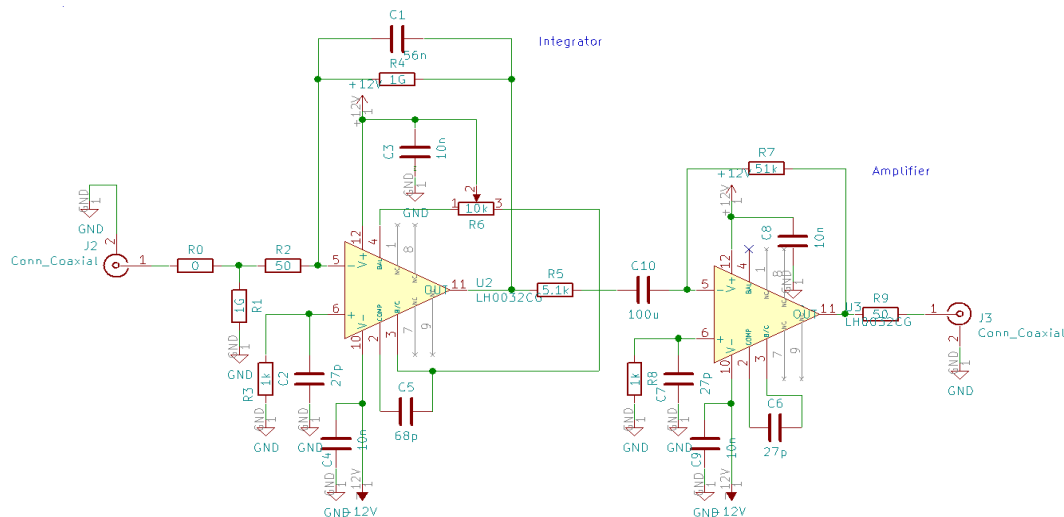
Podsumowując, mój udział w publikacji [[A3](#)] oceniam na **55%**. Obejmował on: w części koncepcję całego artykułu, pozyskanie około połowy ilości danych z wdrożonego przeze mnie Systemu Rejestracji Wyładowań Atmosferycznych, w całości metodologię badań uwzględniającą stworzenie algorytmu identyfikacji fazy lidera dodatniego z wykorzystaniem transformaty STFT oraz oprogramowania Matlab, analizę formalną obejmującą zastosowanie modelu do rzeczywistych rejestracji piorunowego pola elektrycznego, weryfikację poprawności otrzymanych rezultatów z wykorzystaniem danych radarowych oraz własnych procedur Matlab, opracowanie wersji pierwotnej artykułu oraz elementów graficznych, nanoszenie korekt współautorów oraz nadzorowanie procesu recenzji (*Corresponding Author*). Udział współautorów polegał głównie na określeniu koncepcji możliwości modelowania wyładowań atmosferycznych typu dodatniego, pozyskaniu części danych badawczych, merytorycznej weryfikacji zaproponowanej metody w postaci poprawek do kolejnych wersji artykułu, uzupełnieniu studium literaturowego, weryfikacji zgodności modelu z fizyką wyładowania atmosferycznego, jak również monitorowaniu projektu i pozyskaniu funduszy.

Drugi kierunek badań cyklu publikacji prowadzonych na potrzeby współczesnych systemów lokalizacji wyładowań atmosferycznych obejmuje trzy pozycje [[A2,A7,A8](#)], w których przedstawiono nowoczesne środki i metody detekcji wyładowań atmosferycznych w postaci: ortogonalnej anteny piorunowego pola magnetycznego o zakresie ELF-MF (ang. *Extremely Low Frequency – Medium Frequency*) [[A2](#)] oraz dookólnego systemu optycznego zwierciadeł wraz z systemem kalibracji dedykowanych do szybkiej rejestracji zjawisk piorunowych [[A7,A8](#)]. Analizując przytoczone studia literaturowe [[L1,L8-L11](#)] można

stwierdzić, że współczesne systemy lokalizacji wyładowań atmosferycznych nie zmieniły się znacząco w obszarze funkcjonalnym na przestrzeni kilkudziesięciu ostatnich lat. Powszechnie stosowane w systemach LLS sensory piorunowego pola elektromagnetycznego, nadal pracują głównie w paśmie VLF-LF (ang. Very Low Frequency – Low Frequency) (3 kHz – 300 kHz), w którym wypromieniowywana jest największa część energii wyładowania atmosferycznego. Tak wąskie pasmo częstotliwościowe pozwala na odwzorowanie głównie jednej z trzech podstawowych składowych piorunowego pola elektromagnetycznego tzw. składowej radiacyjnej. Pozostałe składowe, elektrostatyczna oraz indukcyjna (lub jedynie składowa indukcyjna w przypadku pola magnetycznego), promieniujące w zakresie ELF-SLF (ang. *Extremely Low Frequency – Super Low Frequency*) (3 Hz – 300 Hz) nie są poprawnie rejestrowane. Jest to intencjonalne działanie konstruktorów systemów LLS. Główną przyczyną jest prostota wyznaczenia wartości szczytowej prądu piorunowego. Niestety wprowadza to jednocześnie istotne ograniczenia współczesnych systemów rejestracji wyładowań atmosferycznych, dla których wszystkie bliskie rejestracje piorunowego pola elektromagnetycznego (zazwyczaj poniżej 50 km) nie są uwzględniane w procesie wyznaczania wartości szczytowej prądu piorunowego. Jest to spowodowane zakłócaniem wartości szczytowej składowej radiacyjnej przez składową elektrostatyczną oraz indukcyjną, które dominują w bliskim polu elektrycznym. Decyzja o tym, które rejestracje powinny być odrzucone w większości przypadków nie może być podjęta a priori. Wpływa na to na znacząca i jednoczesna zależność wartości szczytowej piorunowego pola elektromagnetycznego od odległości oraz od wartości szczytowej prądu piorunowego. Generuje to dodatkowe obciążenia serwerów obliczeniowych oraz spowalnia algorytmy detekcji systemów LLS. Zaproponowane przeze mnie rozwiązanie anteny magnetycznej o poszerzonym dolnym paśmie częstotliwości może być istotną alternatywą w kwestii akwizycji i przetwarzania danych piorunowego pola elektromagnetycznego. Ponadto należy zauważyć, że jednym z głównych trendów rozwojowych współczesnych systemów LLS są prace nad możliwością wykrywania składowej prądu długotrwałego (CC) [L1,L13]. Aktualna infrastruktura i specyfikacja anten systemów LLS uniemożliwia wykrywanie tego typu prądu piorunowego na podstawie rejestrowanego impulsu elektromagnetycznego. Składowa ta jest skutecznie filtrowana zaporowo w zakresie ELF-SLF już na etapie sensora i przedwzmacniacza anteny LLS. Obecnie trwają zaawansowane prace konstruktorów komercyjnych systemów LLS nad możliwością efektywnego wykrywania składowej CC z wykorzystywaniem optycznych systemów satelitów geostacjonarnych [L14] oraz optycznych podsystemów wspomagających LLS [L14]. Podstawowym problemem konstrukcyjnym w tym zakresie jest dookólny tryb rejestracji obrazu konieczny dla wysokiej efektywności detekcji tego typu systemów. Dodatkowym wymogiem jest, aby taki system monitorował głównie obszar bezpośrednio nad horyzontem, gdzie następuje bezpośrednia interakcja wyładowań atmosferycznych z infrastrukturą naziemną. Wychodząc naprzeciw temu zapotrzebowaniu, w swojej pracy naukowej zdecydowałem podjąć się zadania konstrukcji dookólnego układu optycznego przeznaczonego do rejestracji wyładowań atmosferycznych z wykorzystaniem szybkiej kamery wideo. Moje działania przeprowadzone w ramach projektu NCN uzyskanego w konkursie *MINIATURA 6* (nr. DEC-2022/06/X/ST10/00684) (sekcja. 4.2.2) zostały udokumentowane w publikacjach [A7] oraz [A8], prezentujących odpowiednio konstrukcję takiego systemu oraz jego kalibrację.

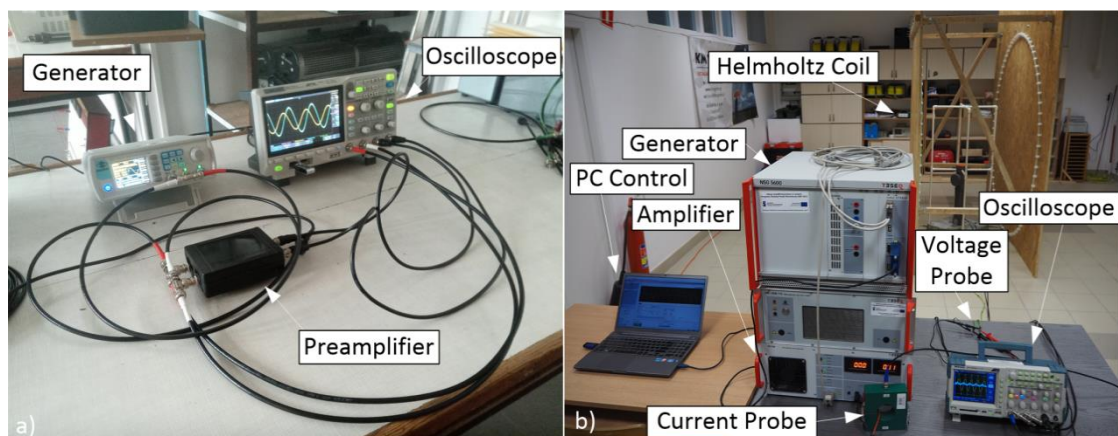
W publikacji [A2] głównym celem było stworzenie niskobudżetowego sensora piorunowego pola magnetycznego wraz z układem przedwzmacniacza pracującego w paśmie ELF-MF od 23 Hz do 1 MHz, lub po uwzględnieniu programowej korekcji wykorzystującej obliczony przeze mnie współczynnik kalibracji, nawet w zakresie od 10 Hz do 10 MHz. Konstrukcja anteny powstała na bazie własnych doświadczeń zdobytych w ramach współpracy z *International Center for Lightning Research and Testing, University of Florida*,

gdzie stosowany był jednokierunkowy sensor pola magnetycznego. Zaproponowałem możliwość dodania drugiej pętli pomiarowej w układzie ortogonalnym, jak również zmodyfikowania konstrukcji przedwzmacniacza, co umożliwiło rozszerzenie pasma anteny. Projekt płytki elektronicznej (PCB) wykonałem samodzielnie, jak również samodzielnie zbudowałem układ elektroniczny ([Rys. 5](#)).



Rysunek 5. Opracowany układ elektroniczny przedwzmacniacza antenowego dedykowany do pomiaru pola magnetycznego w układzie ortogonalnym [[A2](#)]

Przedwzmacniacz przetestowałem w paśmie do 60 MHz z wykorzystaniem generatora funkcyjnego JDS6600 oraz oscyloskopu SDS 1104X-E ([Rys. 6a](#)). Konstrukcja sensora pola magnetycznego została przebadana w laboratorium pod względem przesłuchu oraz wzmocnienia poszczególnych kanałów z wykorzystaniem anteny referencyjnej. W tym celu zbudowałem układ cewek Helmholtza o średnicy 2 m, który został sfinansowany z pozyskanych przeze mnie środków badawczych dla młodych naukowców (DSM) ([Rys. 6b](#)).



Rysunek 6. Kalibracja wdrożonej ortogonalnej anteny piorunowego pola magnetycznego ELF-MF: (a) kalibracja przedwzmacniacza; (b) kalibracja anteny umieszczonej w układzie cewek Helmholtza [[A2](#)]

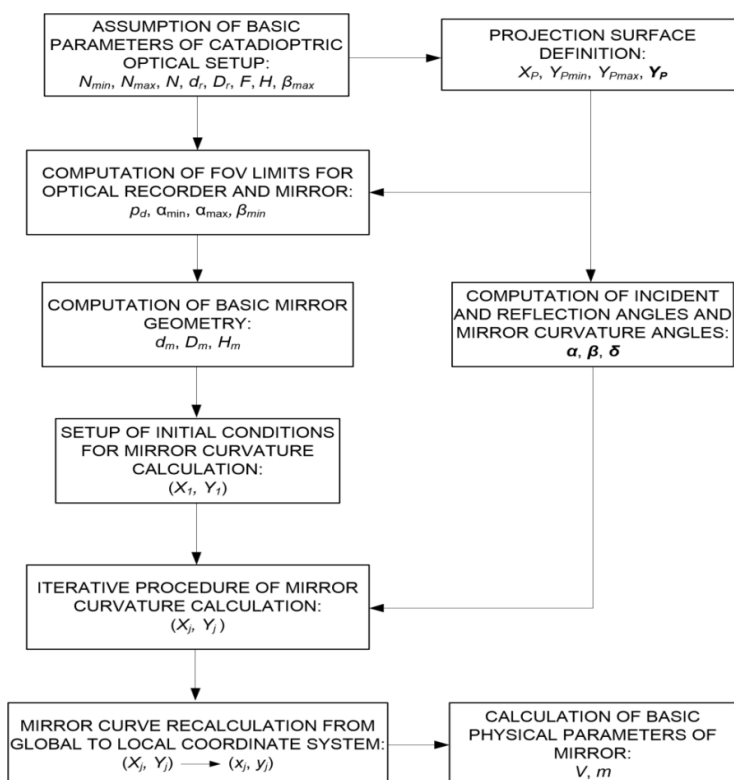
Docelowa kalibracja w miejscu pracy anteny, tj. na dachu jednego z budynków PRz, została przeprowadzona względem skalibrowanych już anten piorunowego pola elektrycznego oraz z wykorzystaniem rejestracji pola elektromagnetycznego w polu dalekim. Na podstawie danych pola magnetycznego uzyskanych w sezonach burzowych 2019-2020 oraz modeli empirycznych [[L1](#)], dla własnego systemu wyprowadziłem formułę matematyczną pozwalającą wyznaczyć wartość szczytową prądu piorunowego ([4](#)):

$$I = 0.925 \cdot \frac{2\pi cR}{v} H \quad (4)$$

gdzie: I – wartość szczytowa prądu piorunowego, H – wartość szczytowa pola magnetycznego, R – odległość 2D od kanału piorunowego, v – prędkość fali prądowej w kanale piorunowym $v=1.5 \cdot 10^8$ m/s, c – prędkość światła. Niewielki koszt wytworzenia sensora przy zachowaniu założonych parametrów rejestracji był jednym z priorytetów projektu. Obecnie oceniam koszt wytworzenia jednego egzemplarza anteny na około 200 zł, co stanowi znacząco mniejszą wartość w stosunku do kosztu typowych anten piorunowego pola magnetycznego stosowanych w systemach LLS. W 2021 r. wdrożyłem również drugą ortogonalną antenę magnetyczną, która zwiększyła potencjał pomiarowy uruchomionej przeze mnie kilka lat wcześniej mobilnej stacji rejestracji wyładowań atmosferycznych.

Podsumowując, mój udział w publikacji [A2] oceniam na **60%**. Obejmował on: koncepcję całego artykułu, pozyskanie danych piorunowego pola elektromagnetycznego z wdrożonego przeze mnie Systemu Rejestracji Wyładowań Atmosferycznych, metodologię badań uwzględniającą stworzenie koncepcji układu badawczego cewek Helmholtza, analizę formalną obejmującą projekt anteny, przedwzmacniacza oraz ich kalibrację, opracowanie wersji pierwotnej artykułu oraz większości elementów graficznych, nanoszenie korekt współautorów oraz nadzorowanie procesu recenzji (*Corresponding Author*), jak również pozyskanie funduszy. Udział współautora polegał głównie na pomocy w zbudowaniu i udziale w badaniach laboratoryjnych w układzie cewek Helmholtza i związanym z tym pozyskaniu części danych badawczych, ich wstępnej obróbce, merytorycznej weryfikacji treści artykułu, części studium literaturowego oraz weryfikacji poprawności metody pomiarowej.

W publikacji [A7] przedstawiłem metodę projektowania zwierciadeł dookólnych dedykowanych do szybkiej rejestracji wideo wyładowań atmosferycznych. Wraz z publikacją [A8], w której opracowałem układ i procedurę kalibracji dla tego typu zwierciadła, artykuł [A7] stanowi kompletny zasób wiedzy pozwalający przeprowadzić kompleksowy proces wdrażania takiego systemu obserwacji w dowolnej aplikacji wykorzystującej dookólną rejestrację optyczną, począwszy od zaprojektowania krzywizny zwierciadła aż do jego instalacji i kalibracji w docelowym miejscu pracy. Jak wykazałem w sekcji 4.1, publikacje te zawierają mój 100% wkład, powstały w wyniku samodzielnego kierownictwa i realizacji grantu NCN. Z uwagi na kontekst przeprowadzonych badań, zaangażowanie i współpracę z przemysłem, nakład pracy, poziom naukowy oraz wkład w rozwój dyscypliny udokumentowany dwiema publikacjami w wysokopunktowanym czasopiśmie *Measurement*, uważam to za jedno z **najbardziej znaczących osiągnięć badawczych w całej karierze naukowej**. Proces projektowy krzywizny zwierciadła (Rys. 7) opracowany w publikacji [A7] przeprowadziłem przy założeniach wejściowych odniesionych do zadanych parametrów rejestracji wyładowań atmosferycznych typu doziemnego, takich jak m.in.: planowana odległość rejestracji, wysokość kanału piorunowego (wysokość obserwacji), wysokość budynku, na którym docelowo będzie zainstalowany układ katadioptryczny złożony ze zwierciadła dookólnego oraz szybkiej kamery wideo.



Rysunek 7. Opracowana procedura projektowania krzywizny zwierciadła dookólnego dedykowanego do obserwacji wyładowań atmosferycznych typu doziemnego [A7]

Model zwierciadła pozwala zdefiniować przez użytkownika nie tylko zakres obserwacji w płaszczyźnie pionowej, ale także pełną charakterystykę obserwacji w tym kierunku. W ten sposób można optycznie dostosować rozdzielczość rejestracji i tym samym zoptymalizować jakość obrazu dla obszaru, który jest najbardziej interesujący z punktu widzenia danej aplikacji. Pozwala to w konsekwencji na znaczące uproszczenie i przyspieszenie dalszych procedur związanych z przetwarzaniem obrazu. Jednym z najważniejszych etapów zaproponowanego algorytmu było zdefiniowanie lokalnego kąta δ nachylenia płaszczyzny zwierciadła do poziomu ziemi. Kąt ten umożliwił w dalszej części algorytmu wprowadzenie rekurencyjnej procedury obliczania kolejnych punktów krzywizny zwierciadła. W ramach projektu NCN zaprojektowałem 3 prototypy zwierciadeł (Rys. 8), których zadane numerycznie krzywizny oraz warstwa refleksyjna zwierciadła zostały wykonane we współpracy z przemysłem.



Rysunek 8. Układ rejestracji dookólnej wyładowań atmosferycznych: (a) prototypy zwierciadeł dookólnych wykonanych w technologii CNC; (b) system rejestracji dookólnej zainstalowany na dachu PRz [A7]

Metoda technologiczna obróbki skrawaniem powierzchni zwierciadła wykonanego w bloku aluminium jest nowatorskim i nietypowym podejściem do procesu konstrukcyjnego, który na każdym etapie konsultowałem z firmą wykonawczą. Parametry procesu technologicznego opisane w pracy [A7] pozwalają odtworzyć całą procedurę produkcyjną również dla innych zwierciadeł tego typu. Procedura projektowania zwierciadła dookólnego została przeze mnie zgłoszona za pośrednictwem rzecznika patentowego do urzędu patentowego RP (nr zgłoszenia **P.448398 Sposób prototypowania zwierciadła dookólnego o wertykalnej charakterystyce obserwacji**). Aktualnie zgłoszenie uzyskało pozytywną wstępną opinię urzędu patentowego ([Załącznik nr 9](#)).

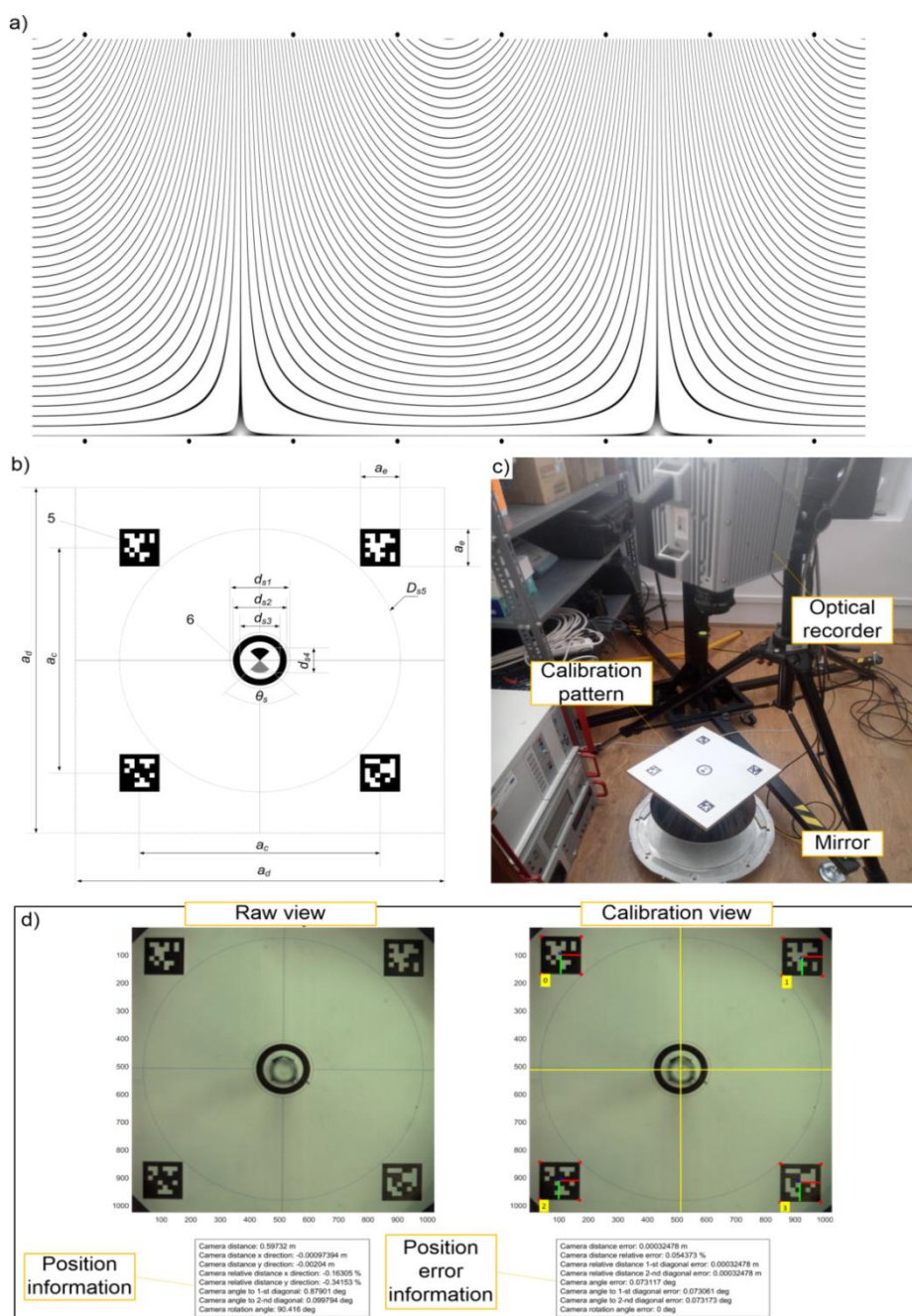
Podsumowując, mój udział w publikacji [A7] oceniam na **100%**, natomiast mój wkład w powstanie osiągnięcia został opisany merytorycznie w poprzedzającym akapicie.

W publikacji [A8] skupiłem się na kalibracji opracowanego modelu zwierciadła dookólnego [A7]. Procedura kalibracji przedstawiona w artykule [A8] wykorzystuje na swoim początkowym etapie dwie podstawowe metody kalibracyjne stosowane dla klasycznych obiektywów typu *pinhole* [L15] oraz obiektów szerokokątnych typu dookólnego tzw. *fisheye* [L16]. Niestety żadna z tych metod, jak również innych metod spotykanych w literaturze, nie mogła zostać bezpośrednio zastosowana do kalibracji wytworzonych prototypów zwierciadeł dookólnych [A7]. Wynika to z faktu, że metoda *fisheye* może być wykorzystywana wyłącznie do kalibracji zwierciadeł dookólnych (np. eliptycznych, hiperbolicznych), w których przedłużenia promieni odbitych przecinają się dokładnie jednym punkcie przestrzeni (spełniają tzw. równanie *fixed viewpoint constraint equation*). Opracowany przeze mnie model krzywizny zwierciadła [A7] jest znacznie bardziej ogólny i nie narzuca tego warunku, dając tym samym znacznie większą swobodę projektowania charakterystyki projekcji zwierciadła dookólnego. W pracy [A8] zaproponowałem nowy model kalibracji (5), który nazwałem *semi-fisheye*.

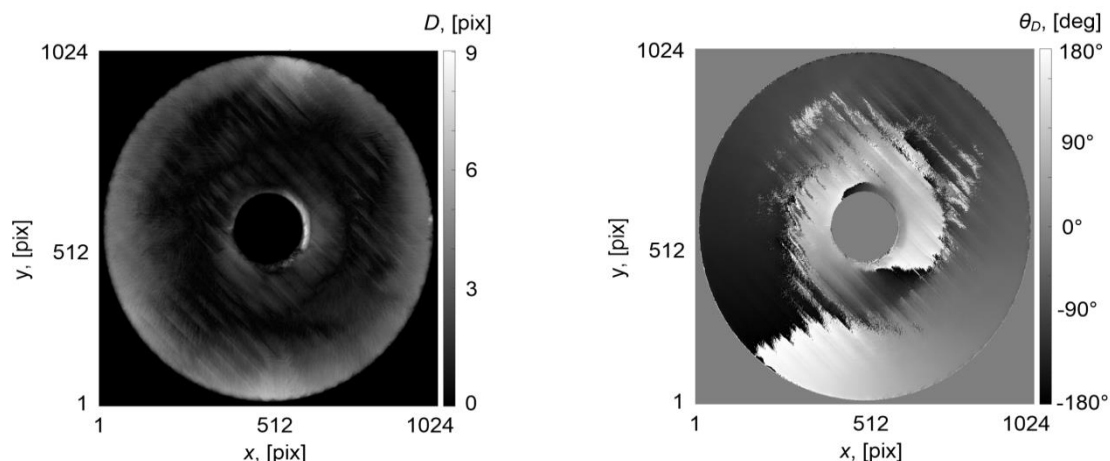
$$\begin{bmatrix} X_c \\ Y_c \\ Z_c \end{bmatrix} = \lambda_{tp} \begin{bmatrix} x \\ y \\ a_{t0} + a_{t1}r \end{bmatrix} \quad (5)$$

gdzie: X_c, Y_c, Z_c – współrzędne punktu obrazu w przestrzeni 3D, x, y – współrzędne punktu obrazu na matrycy rejestratora w pikselach, r – odległość punktu (x,y) od centrum optycznego obrazu, $\lambda_{tp}, a_{t0}, a_{t1}$ – zmienne współczynniki kalibracji. Model *semi-fisheye* jest znacznie bardziej ogólny od modelu kalibracji *fisheye*, ponieważ może być zastosowany do niemal wszystkich typów zwierciadeł dookólnych, zwłaszcza tych o krzywiznie zadanej numerycznie i nie możliwej do opisu w sposób analityczny. W celu przeprowadzenia kompleksowej procedury kalibracyjnej zaprojektowałem również dedykowany układ kalibracji ([Rys. 9](#)) w postaci specjalnej tuby obrotowej, który został wykonany we współpracy z partnerami z branży CNC. Jest to unikatowa w skali światowej konstrukcja, która została przeze mnie zgłoszona do urzędu patentowego RP (nr zgłoszenia **P.448401 Urządzenie do kalibracji zwierciadeł dookólnych**). Aktualnie zgłoszenie uzyskało pozytywną wstępną opinię urzędu patentowego ([Załącznik nr 9](#)). Dodatkowo zaprojektowałem specjalny szablon kalibracyjny ([Rys. 9b-c](#)), wykorzystujący precyzyjne markery typu *aprilTag* oraz napisałem dedykowaną procedurę w Matlabie ([Rys. 9d](#)) niezbędną do precyzyjnego pozycjonowania zwierciadła względem kamery. Unikatowym osiągnięciem jest również kształt zaprojektowanego przeze mnie i opisanego w sposób analityczny szablonu kalibracyjnego umieszczanego wewnątrz tuby kalibracyjnej ([Rys. 9a](#)). W procedurze kalibracyjnej wyznaczana jest również krzywizna zwierciadła, co umożliwiło przeprowadzenie procesu reprojekcji obrazu z układu dookólnego do układu panoramicznego. Druga część publikacji [A8] została poświęcona bardzo ważnemu, w moim przekonaniu, aspektowi tj. określaniu stopnia deformacji obrazu, jaki wprowadza do układu optycznego zaprojektowane zwierciadło. Unikalność tego rozwiązania

polega na tym, że deformacja obrazu zdefiniowana, jako stopień i kierunek przesunięcia danego piksela obrazu w stosunku do obrazu zwierciadła idealnego o niezdeformowanej charakterystyce, została wyznaczona dla każdego piksela indywidualnie i opisana dwuwymiarową macierzą zespoloną w sposób numeryczny. Takie podejście stanowi przewagę w stosunku do funkcjonujących w literaturze analitycznych typów opisu deformacji obrazu tj. deformacji stycznej i radialnej. Zaproponowana metoda umożliwi uwzględnienie lokalnych asymetrycznych zniekształceń zwierciadła będących efektem zjawisk występujących m.in. podczas procesu technologicznego ([Rys. 10](#)). Pozwala to tym samym na ocenę jakości i optymalizację takiego procesu.

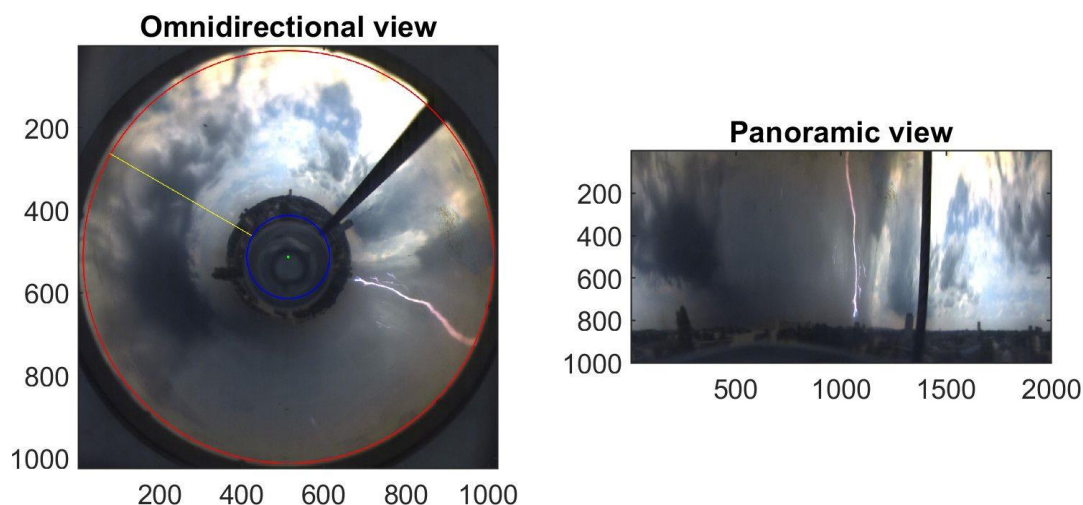


Rysunek 9. Proces kalibracji zwierciadła dookólnego na potrzeby szybkiej rejestracji wyładowań atmosferycznych: (a) szablon kalibracyjny zwierciadła; (b) szablon do pozycjonowania zwierciadła; (c) procedura kalibracji; (d) widok aplikacji pozycjonującej zwierciadło opracowanej w Matlabie [[A8](#)]



Rysunek 10. Deformacja obrazu zwierciadła obliczona w procesie kalibracji z wykorzystaniem procedury Matlaba. Stopień deformacji (lewy panel), kierunek deformacji (prawy panel) [A8]

Na bazie macierzy deformacji wyznaczyłem również macierz korekcji obrazu, która kompensuje w znacznym stopniu nieidealności technologii wykonania zwierciadła i pozwala w sposób programowy zwiększyć jego precyzję, obniżając tym samym sumaryczny koszt produkcji i wdrożenia całego układu dookólnej rejestracji w stosunku do zwierciadeł wykonanych klasycznymi technologiami na podłożu szklanym. Podstawową bezpośrednią korzyścią procesu kalibracji na potrzeby badań z zakresu dyscypliny jest możliwość przeprowadzenia procedury fotogrametrii kanału piorunowego, co wykonałem w pracy [A8] na bazie rejestracji szybką kamerą Photron SA5 z sezonu burzowego 2023 (Rys. 11).



Rysunek 11. Reprojektacja obrazu kanału piorunowego z układu dookólnego (lewy panel) do układu panoramicznego (prawy panel) [A8]

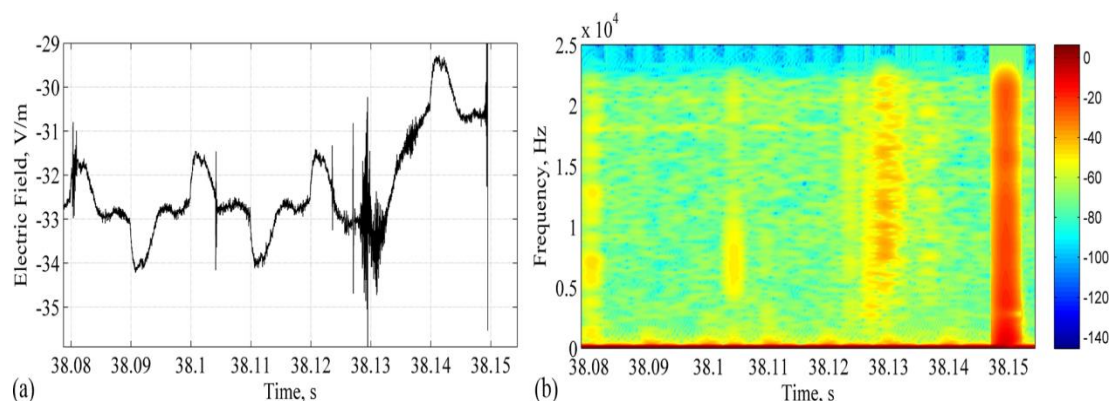
Podsumowując, mój udział w publikacji [A8] oceniam na **100%**, natomiast osobisty wkład został opisany w sposób merytoryczny w poprzedzającym akapicie. Należy zauważyć, że badania przeprowadzone w ramach publikacji [A7,A8] posiadają charakter interdyscyplinarny i stanowią również istotny wkład do innych dziedzin i dyscyplin nauki ściśle powiązanych z automatyką, elektroniką, elektrotechniką i technologiami kosmicznymi.

Trzeci kierunek badań cyklu publikacji prowadzonych na potrzeby współczesnych systemów lokalizacji wyładowań atmosferycznych obejmuje cztery pozycje [A4,A5,A6,A9], w których dokonano detekcji oraz identyfikacji zjawisk piorunowych z wykorzystaniem analizy spektralnej, sieci neuronowych oraz szybkiej wideorejestracji. Te środki detekcji oraz metody identyfikacji zjawisk piorunowych są od dawna szeroko wykorzystywane w wielu

innych dziedzinach nauki, natomiast z punktu widzenia obecnych systemów LLS stanowią one nowatorskie podejście i posiadają znaczący potencjał analityczny. **Analiza spektralna** jest jednym z najczęściej wykorzystywanych przeze mnie narzędzi do badania rejestracji piorunowego pola elektromagnetycznego. W literaturze związanej z obszarem wyładowań atmosferycznych występuje w zasadzie tylko jedna, bardzo dawno opublikowana praca, gdzie krótkoczasowa transformata Fouriera (STFT) została wykorzystana do przedstawienia impulsu elektromagnetycznego pioruna [L17]. Istnieje wprawdzie nieco większa liczba publikacji ze zbliżonego zakresu analizy spektralnej tj. transformacji falkowej [L18-L19]. Należy jednak zauważyć, że wyniki analiz przeprowadzonych z wykorzystaniem transformaty STFT, bazującej w swej istocie na klasycznej transformacie Fouriera, mogą być w sposób łatwiejszy zaimplementowane w wielu zagadnieniach ochrony odgromowej bazujących w wielu przypadkach na charakterystykach częstotliwości impedancji urządzeń i systemów elektrycznych. Z uwagi na złożoność obliczeniową, transformata STFT, jak dotąd nie znalazła powszechnego zastosowania w algorytmach LLS. Zauważyłem ten problem również na etapie korzystania z wbudowanej w Matlaba procedury STFT. Była ona wymagająca numerycznie, zwłaszcza w przypadku ustawienia dużego stopnia zachodzenia okien czasowych transformaty (parametr *overlap*), stosowanego w celu poprawy jakości wizualizacji transformaty. Z tego względu, jak również na potrzeby prowadzonych i przyszłych analiz, napisałem własną procedurę dla tej transformaty. Jest to algorytm zoptymalizowany pod względem złożoności obliczeń w trybie czasu rzeczywistego (ang. *real-time*), czyli trybu zazwyczaj wykorzystywanego przez systemy LLS do ciągłej analizy piorunowego pola elektromagnetycznego w warunkach burzowych. Wraz z postępującym w szybkim tempie rozwojem technologicznym procesorów obliczeniowych stwarza to w niedalekiej przyszłości możliwość implementacji komercyjnej zaproponowanych przeze mnie rozwiązań [A1,A3]. Algorytmy sztucznej inteligencji i sieci neuronowe są stosowane w analizie danych burzowych od wielu lat, przy czym odbywa się to zazwyczaj na potrzeby predykcji lokalizacji miejsca wystąpienia wyładowań atmosferycznych i innych groźnych zjawisk burzowych. Zastosowanie tych narzędzi do identyfikacji wyładowań atmosferycznych i ich składowych stanowi stosunkowo niedawny trend badawczy. Świadczy o tym niewielka liczba publikacji z tego zakresu [L20-L22]. Zastosowanie algorytmów sztucznej inteligencji pozwala na znaczące przyspieszenie i automatyzację analiz przeprowadzanych w systemach LLS, jak również zapewnia uzyskanie wysokiego stopnia efektywności identyfikacji [A6]. Jak wykazano we wcześniejszej części autoreferatu [A7,A8], inny rodzaj analizy tj. szybka rejestracja wideo stanowi znaczące źródło danych z punktu widzenia badania zjawisk fizycznych towarzyszących wyładowaniom atmosferycznym. Kolejnym aspektem zastosowania szybkiej rejestracji wideo jest weryfikacja dokładności działania systemów LLS [L23]. Obecnie, obok kosztowych technik interferometrii, jest to jedyna metoda pozwalająca precyzyjnie określić miejsce uderzenia pioruna. Znaczący postęp w obszarze konstrukcji szybkich sensorów obrazu, ich coraz niższa cena oraz związana z tym większa dostępność tego typu rozwiązań sprawia, że zainteresowanie konstruktorów obecnych systemów LLS tego typu rozwiązaniami systematycznie wzrasta [L13].

W publikacji [A4] wykorzystałem transformatę STFT do analizy spektralnej sygnatur piorunowego pola elektrycznego z rejonu Warszawy. Podobnie, jak w publikacji [A3], w tym artykule skupiono się na analizie zjawisk piorunowych poprzedzających wyładowania doziemne typu dodatniego. Artykuł wypełnia pewną lukę w aktualnym stanie wiedzy związaną z niewielką ilością opracowań literaturowych dotyczących analiz fazy wyładowań wstępnych (PB) oraz lidera, poprzedzających dodatnie wyładowania atmosferyczne typu doziemnego. W pracy [A4] przeanalizowano trzy przypadki dodatnich udarów głównych poprzedzonych różnymi typami faz PB. Artykuł powstał przy współudziale trzech jednostek naukowych: PRz, IGF PAN oraz IMGW-PIB. Osobiście odpowiadałem za przeprowadzenie

analizy spektralnej z wykorzystaniem transformaty STFT. Otrzymane widma spektralnej gęstości mocy (ang. *PSD* – *Power Spectrum Density*) pozwoliły na określenie cech widma PSD charakterystycznych dla fazy PB ([Rys. 12](#)).



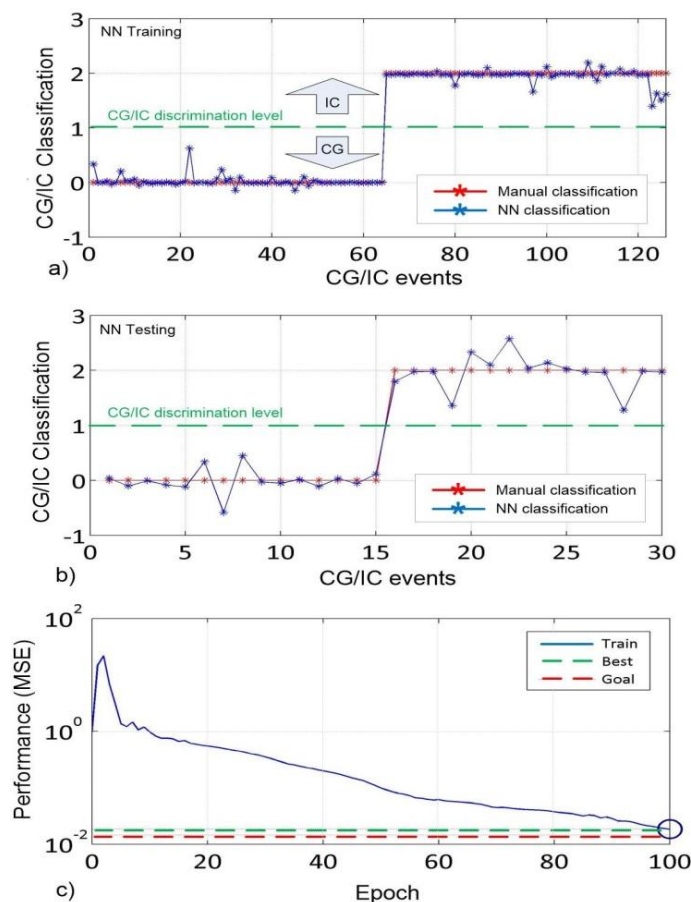
Rysunek 12. Analiza spektralna fazy wyładowań wstępnych poprzedzającej wyładowanie atmosferyczne doziemne typu dodatniego: (a) widmo spektralne sygnatury czasowej piorunowego pola elektrycznego z panelu (b) [\[A4\]](#)

Stosując różne ustawienia STFT skutecznie odseparowałem zakłócenia pochodzące m.in. od sieci elektroenergetycznych i wydzieliłem charakterystyczne części widma PB w zakresie 5 kHz do 20 kHz. Dokonałem również analizy zmienności parametrów spektrum częstotliwościowego w funkcji czasu, co nie byłoby to możliwe z wykorzystaniem klasycznej transformaty FFT.

Podsumowując, mój udział w publikacji [\[A4\]](#) oceniam na **55%**. Obejmował on: częściowo koncepcję całego artykułu, metodologię badań uwzględniającą zastosowanie i nastawy analizy STFT, opracowanie wersji pierwotnej artykułu oraz większości elementów graficznych, nanoszenie korekt współautorów oraz nadzorowanie procesu recenzji (*Corresponding Author*). Udział współautora z IGF PAN polegał głównie na pozyskaniu i udostępnieniu danych piorunowego pola elektrycznego z systemu LLDN (*Local Lightning Detection Network*) funkcjonującego w rejonie Warszawy, merytorycznej weryfikacji treści artykułu oraz części studium literaturowego. Udział współautora z IMGW-PIB polegał na selekcji i analizie danych z systemu lokalizacji wyładowań atmosferycznych PERUN na podstawie otrzymanych markerów czasowych dla analizowanych sygnatur pola elektrycznego. Udział współautora z PRZ obejmował głównie merytoryczną weryfikację treści artykułu oraz pozyskanie funduszy.

W publikacji [\[A5\]](#) wykorzystano algorytmy sztucznej inteligencji (*AI* – *Artificial Intelligence*) oraz różne typy sieci neuronowych (*NN* – *Neural Network*) do identyfikacji wyładowań atmosferycznych typu doziemnego (*CG* – *Cloud-to-Ground lightning*) oraz wewnątrzmurowego (*IC* – *Intra-Cloud lightning*) na podstawie zarejestrowanych sygnatur piorunowego pola elektrycznego. W pracy w całości wykorzystano bazę rejestracji pola elektrycznego z Systemu Rejestracji Wyładowań Atmosferycznych w Rzeszowie. Bazę tę przeszukałem pod kątem selekcji najbardziej wartościowych sygnatur piorunowego pola elektrycznego. Moją indywidualną inicjatywą było również wyselekcjonowanie do procesu uczenia sieci NN porównywalnej ilości rejestracji zawierających fazy PB, CC oraz fazę lidera. Są to fazy charakterystyczne wyłącznie dla wyładowań atmosferycznych typu CG, co pozytywnie wpłynęło na proces uczenia sieci neuronowych. W związku z sugestią jednego z recenzentów czasopisma *Applied Soft Computing*, opracowałem również przeglądową analizę różnych typów piorunowego pola elektrycznego [Fig. 2 w [\[A5\]](#)]. Moją inicjatywą było również uwzględnienie w analizie składowej elektrostatycznej piorunowego pola elektrycznego [\[L1\]](#). Jest to składowa występująca głównie w obszarze rejestracji w bliskim

polu elektromagnetycznym. Ponadto, w odróżnieniu od nielicznych podobnych analiz spotykanych w literaturze [L20-L22], zaproponowałem przeprowadzenie procesu uczenia nie tylko na bazie fragmentów pola elektrycznego odpowiadających głównemu wyładowaniu atmosferycznemu, ale w znacznie szerszym, 2 sekundowym, zakresie rejestracji. Umożliwiło to uwzględnienie w procesie uczenia sieci NN składowych PB, CC, fazy lidera, charakterystycznych dla wyładowań typu doziemnego, jak również innych faz typowych jedynie dla wyładowań atmosferycznych wewnątrzchmurowych (faza *J* – *Junction*). Uzyskane wyniki dokładności sieci MLP (*Multilayer Perceptron*), RBF (*Radial Basis Function*), CNN (*Convolutional Neural Network*), LSTM (*Long Short-Term Memory*) oraz wielu klasyfikatorów maszynowych ML (*Machine Learning*) potwierdziły słuszność moich przewidywań (Rys. 13).



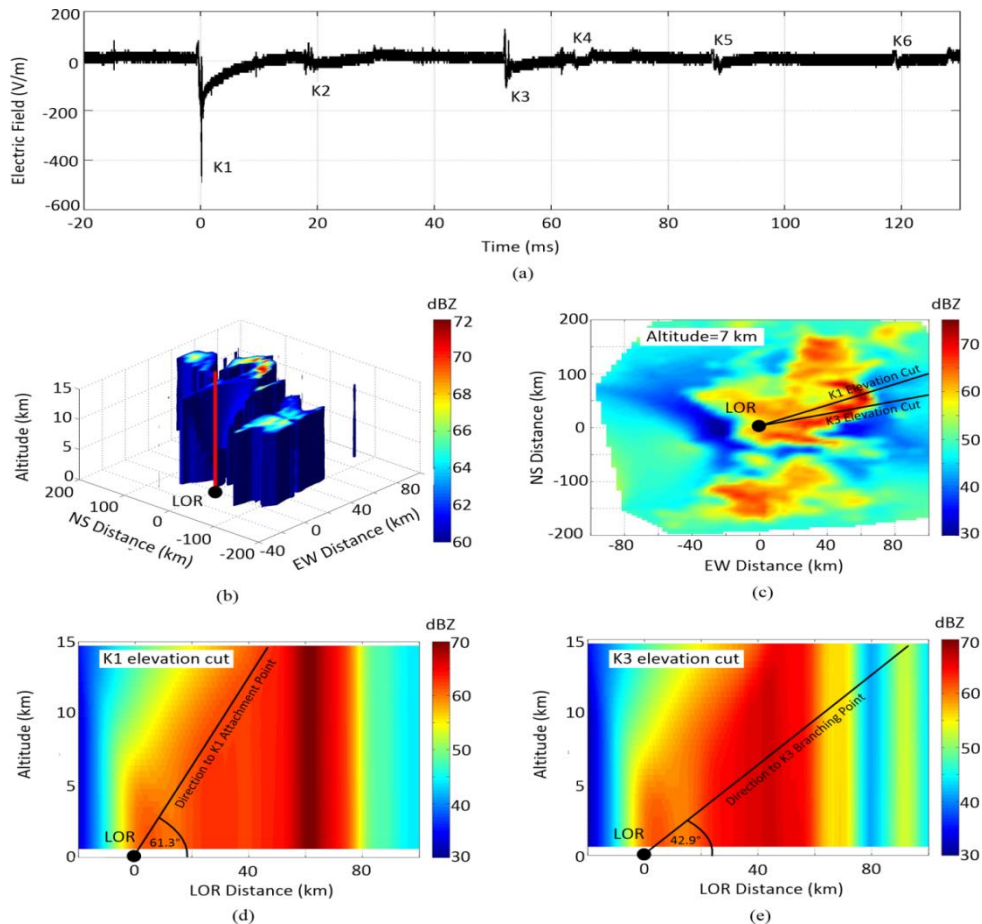
Rysunek 13. Rezultaty uczenia dla najbardziej efektywnej 3-warstwowej sieci neuronowej MLP 150-3 ukrytych neuronów z zastosowaniem danych uczących o częstotliwości próbkowania 5 kHz: (a) proces uczenia; (b) proces testowania; (c) błąd średniokwadratowy [A5]

W artykule [A5] zaproponowałem także możliwość obniżenia częstotliwości sygnału próbkowania przebiegu pola elektrycznego w celu poprawy wydajności czasowej algorytmu identyfikacji bez istotnego pogorszenia procesu uczenia. Ma to ważne praktyczne znaczenie w kontekście implementacji tej metody w trybie pracy czasu rzeczywistego systemów LLS. Opracowałem również samodzielnie osobną sekcję poświęconą analizie określającej, które cechy piorunowego pola elektrycznego wyładowań atmosferycznych typu CG oraz IC stanowią największe wyzwanie w procesie uczenia algorytmów AI. Oprócz zadań związanych z przygotowaniem zestawu danych uczących mój udział w publikacji dotyczył również wielu aspektów bezpośrednio związanych z analizą NN. W szczególności przygotowałem w Matlabie skrypt pomocniczy wczytujący dane uczące i formujący je w specjalne macierze wymagane przez algorytmy AI Matlab. Następnie z wykorzystaniem narzędzia Matlab

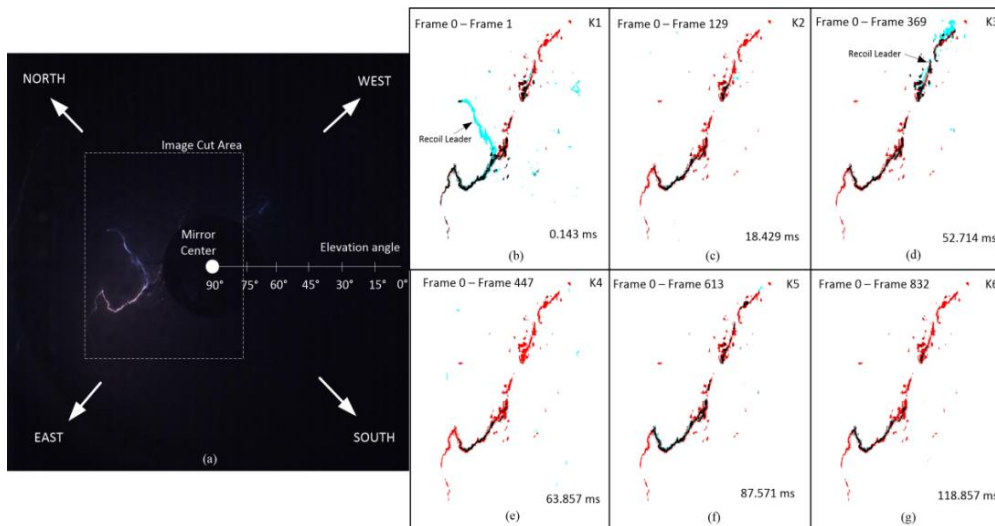
Classification Learner przeprowadziłem wstępną analizę w celu wytypowania najbardziej efektywnych sieci neuronowych. Przygotowałem również dedykowany skrypt dla procesu uczenia sieci LSTM, który następnie skonfigurowałem dla współautora zajmującego się główną analizą NN. Cechą charakterystyczną publikacji [A5] jest również kompleksowość przeprowadzonej analizy AI. Nie obejmowała ona jedynie sieci typu konwolucyjnego (CNN), stosowanych typowo przez inne zespoły badawcze [L20-L22], ale również szerokie spektrum innych sieci i metod sztucznej inteligencji. Drugim istotnym aspektem dla aktualnego stanu wiedzy z obszaru dyscypliny jest otrzymana bardzo wysoka skuteczność identyfikacji wyładowań atmosferycznych CG/IC dla sieci neuronowych typu MLP. Z punktu widzenia mojego dorobku naukowego, czasopismo *Applied Soft Computing* (IF=7,2, MNiSW=200 pkt.), gdzie ukazał się artykuł [A5] jest najbardziej wartościowym, w jakim publikowałem do tej pory.

Podsumowując, mój udział w publikacji [A5] oceniam na 45% i stanowi to największy udział procentowy spośród wszystkich współautorów. Obejmował on: częściowo koncepcję całego artykułu, szczególnie w kontekście selekcji danych uczących, w 50% metodologię badań uwzględniającą typologię zastosowanych sieci neuronowych i klasyfikatorów ML wraz z analizą wstępną i przygotowaniem interfejsu dla sieci NN w Matlabie, opracowanie wersji pierwotnej artykułu oraz większości elementów graficznych, nanoszenie korekt współautorów oraz nadzorowanie procesu recenzji (*Corresponding Author*). Udział pozostałych współautorów to częściowa koncepcja artykułu, przeprowadzenie analizy AI i NN, merytoryczna weryfikacja treści artykułu, część studium literaturowego, pozyskanie funduszy.

W publikacji [A6] wykorzystano jednocześnie cztery niezależne metody analizy wyładowań atmosferycznych do obserwacji cech tzw. liderów odrzutu (ang. *Recoil Leader - RL*) występujących w chmurze burzowej. Zjawiskom tego typu, rozwijającym się w zjonizowanych pozostałościach poprzedzających kanałów piorunowych, towarzyszy znaczna intensywność promieniowania elektromagnetycznego rejestrowana również na powierzchni ziemi. Z uwagi na swoją lokalizację w chmurze burzowej, zjawiska RL stanowią istotne zagrożenie dla obiektów latających, w tym w szczególności samolotów pasażerskich. W artykule [A6] przedstawiono różne techniki detekcji tego zjawiska wykorzystujące: rejestrację naziemną piorunowego pola elektrycznego, analizę spektralną, analizę trójwymiarowych danych z radaru Dopplera, jak również szybką wideorejestrację. Wszystkie wymienione typy analizy zostały przeprowadzone przeze mnie z wykorzystaniem Matlab (Rys. 14). Dane radarowe uzyskałem z bazy IMGW-PIB w postaci nieprzetworzonej, po czym zostały one przekonwertowane do postaci 3D z wykorzystaniem opracowanej aplikacji Matlab. Rejestracje z szybkiej kamery wideo zostały przedstawione w sposób różnicowy (klatka do klatki obrazu), co umożliwiło analizę dynamiki rozwoju kanału piorunowego (Rys. 15). Jest to bardzo ważna informacja z punktu widzenia analizy mechanizmu zjawiska RL. Stanowi to jednocześnie uzupełnienie aktualnego stanu wiedzy fizyki wyładowań atmosferycznych w tym zakresie [L24-L25]. Porównanie danych radarowych z wynikami analizy wideo pozwoliły określić dla jakich wartości i profili odbiciowości radarowej zazwyczaj występuje zjawisko RL. Było to możliwe dzięki zastosowaniu specjalnego dookólnego układu optycznego dedykowanego dla szybkiej kamery wideo [A7-A8]. Wiedzę przedstawioną w [A6] można wykorzystać do predykcji najniebezpieczniejszych stref aktywności piorunowej w chmurze burzowej wykorzystując dane z radaru Dopplera. Moją inicjatywą była również analiza spektralna przebiegów pola elektrycznego lidera odrzutu, w skali mili- oraz mikrosekundowej. Pozwoliło to zaobserwować niespotykane, jak dotąd w literaturze przebiegi mikrosekundowe impulsu elektromagnetycznego RL towarzyszącego procesowi połączenia lidera odrzutu z kanałem piorunowym, a także nakreślić obraz spektralny zjawiska RL.



Rysunek 14. Wielowymiarowa analiza zjawiska lidera odrzutu RL przeprowadzona z wykorzystaniem Matlab: (a) analiza piorunowego pola elektrycznego w dziedzinie czasu; (b) analiza 3D odbiciowości radarowej; (c) - (e) analiza 2D odbiciowości radarowej odpowiednio w przekroju poziomym i dwóch przekrojach pionowych [A6]

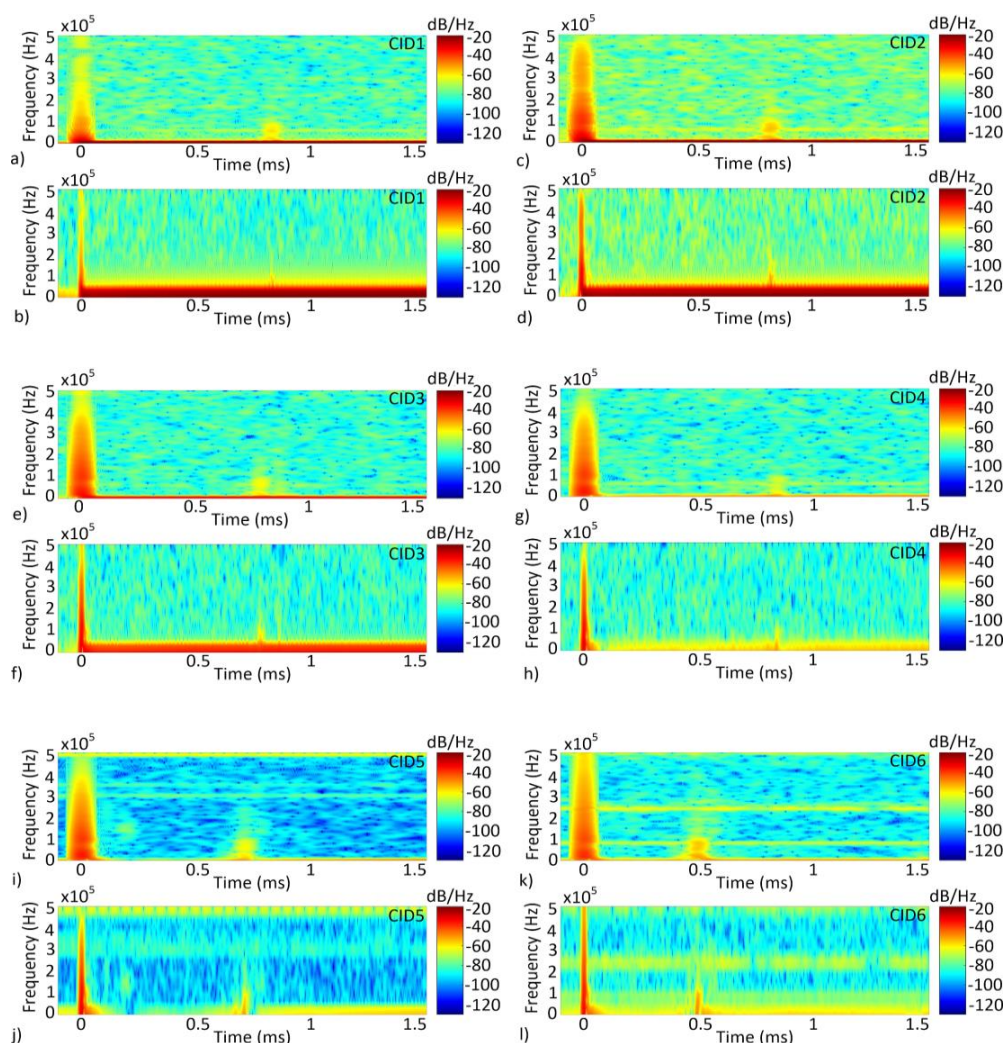


Rysunek 15. Różnicowa analiza rejestracji z szybkiej kamery wideo dla zjawisk RL: (a) pełna klatka wideorejestracji z zaznaczonym fragmentem poddanym dalszej analizie na panelach (b)-(g) oraz skalowaniem dookólnego układu optycznego; (b)-(g) analiza różnicowa klatek poszczególnych faz wyładowania atmosferycznego w chmurze burzowej odniesionych do pierwszej klatki rejestracji (Frame 0). Zanikające fragmenty kanału piorunowego (kolor czerwony), fragmenty o tej samej intensywności (kolor czarny) oraz kanał rozwijający się (kolor niebieski) [A6]

Podczas analizy udało się również zaobserwować tzw. zjawisko *needle*, które nie ma aktualnie swojego zdefiniowanego odpowiednika w terminologii języka polskiego. W istocie jest to zjawisko o charakterze elektrycznym występujące w chmurze burzowej inicjujące lider ujemny rozwijający się z pozostałości dodatniego kanału piorunowego. Obecnie jest to jeden z głównych kierunków badań fizyki wyładowania atmosferycznego z wykorzystaniem technik interferometrii i szybkiej rejestracji wideo. Artykuł powstał na bazie moich analiz oraz doświadczeń zdobytych podczas stażu odbytego w *International Center for Lightning Research and Testing* na Florydzie w 2023 r..

Podsumowując, mój udział w publikacji [A6] oceniam na 60%. Obejmował on: koncepcję całego artykułu, w szczególności wielowymiarowej analizy zjawiska lidera odrzutu, pozyskanie danych badawczych w postaci piorunowego pola elektrycznego oraz obrazu z dookólnego układu optycznego, metodologię badań uwzględniającą przetwarzanie danych radarowych, analizę spektralną przeprowadzoną w Matlabie, opracowanie wersji pierwotnej artykułu oraz większości elementów graficznych, nanoszenie korekt współautorów oraz nadzorowanie procesu recenzji (*Corresponding Author*). Udział współautora to częściowa koncepcja artykułu, merytoryczna weryfikacja treści artykułu, część studium literaturowego, pozyskanie funduszy.

W publikacji [A9] wykorzystałem transformaty FFT oraz STFT do analizy przebiegów wyładowań atmosferycznych wewnątrzchmurowych typu kompaktowego (ang. *Compact Intracloud Discharge lightning – CID lightning*). Jest to bezpośrednie nawiązanie i rozszerzenie analizy zawartej w publikacji [L26]. W [L26] przedstawiono analizę FFT zjawiska CID na podstawie rejestracji piorunowego pola elektrycznego zebranych w polu dalekim powyżej kilkudziesięciu kilometrów od źródła wyładowania tj. gdy obserwowana jest jedynie składowa radiacyjna pola elektrycznego, a składowe elektrostatyczna i indukcyjna są pomijalnie małe. W przytoczonej publikacji [L26] dokonano również identyfikacji impulsów odpowiadających wyładowaniom atmosferycznym typu CID oraz typu doziemnego CG. Zdefiniowano w tym celu specjalny współczynnik identyfikacji wyładowań atmosferycznych CG/CID. Temat analizy zjawisk wyładowań atmosferycznych typu CID był jednym z wiodących tematów mojego stażu na *University of Florida* w 2023 r.. Zauważyłem, że w literaturze brak studium na temat analizy spektralnej zjawisk CID w polu bliskim tj. w zakresie kilku do kilkudziesięciu kilometrów (około 20 km) od kanału piorunowego. Ponadto współczynnik identyfikacji wyładowań CG/CID wprowadzony w [L26] generował niepoprawne wyniki w tym zakresie odległości. W artykule [A9] skupiłem się na rozwiązaniu tych zagadnień i problemów badawczych. W literaturze występuje bardzo niewiele opisów wyładowań atmosferycznych typu CID w bliskim polu elektromagnetycznym [L27-L28], dlatego zdecydowałem się poprosić zespół badawczy z *University of Mississippi* o dane badawcze do analizy [L29]. Pozostałą część danych piorunowego pola elektrycznego wyładowań atmosferycznych typu doziemnego CG zaczerpnąłem z własnej bazy rejestracji. Początkową część analizy przebiegów pola elektrycznego przeprowadziłem dla tych samych ustawień FFT oraz współczynnika identyfikacji wyładowań atmosferycznych CG/CID, jak opisano w publikacji [L26]. Analiza potwierdziła zbieżność wyników przedstawionych w [A9] z wynikami [L26] w dalekim polu elektromagnetycznym. Przeprowadzona następnie analiza spektralna przebiegów bliskiego piorunowego pola elektrycznego wykazała, że widmo FFT jest zdominowane przez wolnozmienną składową elektrostatyczną pola elektrycznego oraz składowe pola elektrycznego związane z prądem długotrwałym (CC) płynącym w kanale piorunowym.

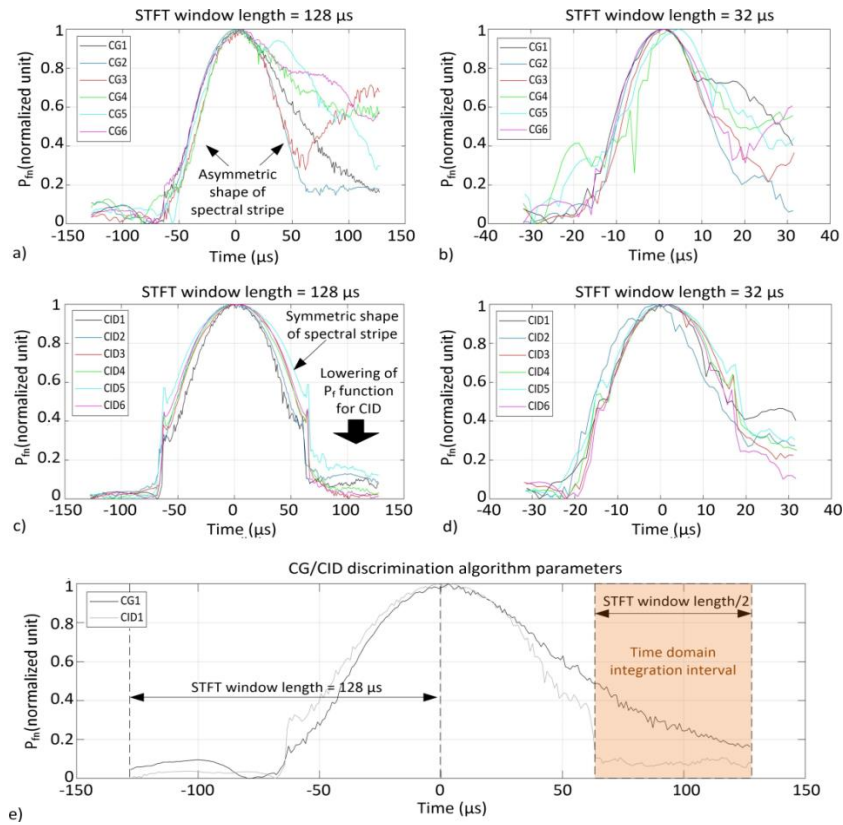


Rysunek 16. Analiza spektralna wyładowań atmosferycznych kompaktowych typu CID dla dwóch zaproponowanych okien czasowych STFT: 128 μ s (panel górny) oraz 32 μ s (panel dolny) w funkcji odległości od źródła wyładowania, odpowiednio: 2 km, 6,8 km, 11,9 km, 18,2 km, 25,2 km oraz 55,6 km dla paneli (a)-(l), wysokość źródła CID 13,9 km [A9]

Zidentyfikowałem to, jako podstawową przyczynę błędów identyfikacji wyładowań atmosferycznych CG/CID w publikacji [L26]. Wykorzystując wyniki analizy FFT, zaproponowałem modyfikację tego współczynnika polegającą na odniesieniu go do częstotliwości widma FFT równej 15 kHz, a nie jak pierwotnie zaproponowano 100 kHz [L26]. Zwiększyło to istotnie selektywność identyfikacji, ale w dalszym ciągu nie była ona jednoznaczna w całym zakresie odległości od źródła piorunowego pola elektrycznego. W związku z tym, wykorzystując moje wcześniejsze doświadczenia w zakresie analizy spektralnej, przeprowadziłem alternatywną dwuwymiarową analizę STFT. Pozwoliło to efektywnie rozdzielić składową radiacyjną oraz elektrostatyczną piorunowego pola elektrycznego (Rys. 16). Następnie w celu uzyskania jednoznacznej identyfikacji wyładowań atmosferycznych typu CG/CID, przetworzyłem widmo spektralne w sposób zbliżony do procedur zastosowanych w pracy [A1], definiując tym samym nowy współczynnik identyfikacji (6):

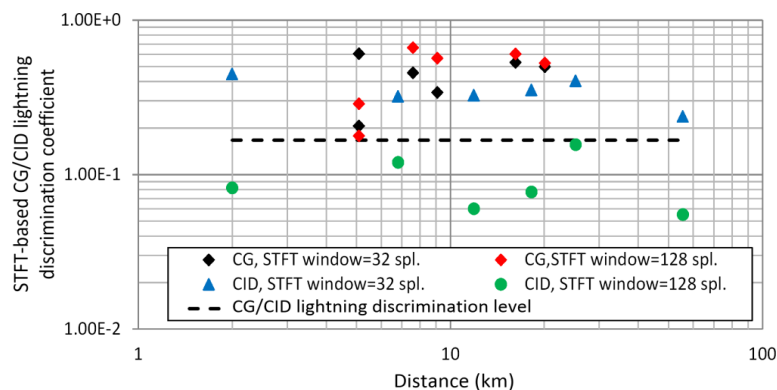
$$F_D = \frac{\int_{t_1}^{t_2} [P_{fn} - \min(P_{fn})] dt}{[\max(P_{fn}) - \min(P_{fn})](t_2 - t_1)} \quad (6)$$

gdzie: F_D to współczynnik identyfikacji wyładowań atmosferycznych CG/CID, $t_1=t_{STFT}/2$, $t_2=t_{STFT}$ to limity całkowania funkcji P_{fn} odpowiadającej scałkowanemu częstotliwościowo widmu PSD, natomiast t_{STFT} to długość okna STFT. Współczynnik (6) zdefiniowałem na bazie różnic własności widm spektralnych wyładowań atmosferycznych typu CG oraz CID dla okna STFT o długości 128 μs , które okazało się być najbardziej efektywne z wszystkich analizowanych typów okien tej transformaty ([Rys. 17](#)).



Rysunek 17. Analiza scałkowanego częstotliwościowo widma STFT przebiegów piorunowego pola elektrycznego wyładowań atmosferycznych doziemnych (panel (a) oraz (c)) oraz wyładowań wewnątrzmurowych typu CID (panel (b) oraz (d)) wraz z graficzną definicją sposobu wyznaczania współczynnika identyfikacji CG/CID (panel (e)) [[A9](#)]

W wyniku analizy uzyskano w pełni selektywną wartość graniczną współczynnika identyfikacji zaproponowaną równą $F_D=0,17$, poniżej której wyładowanie atmosferyczne było identyfikowane, jako typ CID, natomiast powyżej jako typ CG ([Rys. 18](#)).



Rysunek 18. Porównanie wyników nowego sposobu identyfikacji wyładowań typu doziemnego oraz wewnątrzmurowego kompaktowego [[A9](#)]

Opracowany oraz zweryfikowany przeze mnie współczynnik identyfikacji posiada istotne znaczenie w kontekście wykrywania szczególnie niebezpiecznego typu wyładowań wewnątrzmurowych (CID). Wyładowania te charakteryzują się stosunkowo niewielkim rozmiarem kanału piorunowego (około 1 km), przy jednocześnie najwyższych wartościach szczytowych prądu piorunowego spotykanych w naturze, znacznie powyżej 300 kA [L28]. Z tego względu stanowią one szczególne zagrożenie dla ruchu lotniczego, jak również obiektów naziemnych. W wielu przypadkach impulsy elektromagnetyczne rejestrowane dla tego typu wyładowań atmosferycznych przewyższają swoją wartością szczytową impulsy udarów głównych wyładowań doziemnych obserwowanych w podobnej odległości od źródła impulsu elektromagnetycznego.

Podsumowując, mój udział w publikacji [A9] oceniam na **60%**. Obejmował on: koncepcję całego artykułu, w szczególności analizy wyładowań atmosferycznych typu CID w bliskiej odległości od źródła, jak zdefiniowanie bardziej selektywnego współczynnika identyfikacji wyładowań atmosferycznych doziemnych CG i CID, częściowe pozyskanie danych badawczych w postaci piorunowego pola elektrycznego wyładowań doziemnych, metodologię badań uwzględniającą różne typy analizy spektralnej FFT i STFT przeprowadzonych w Matlabie, zdefiniowanie współczynnika identyfikacji wyładowań atmosferycznych CG/CID na potrzeby systemów LLS działającego poprawnie w całym zakresie odległości od kanału piorunowego, opracowanie wersji pierwotnej artykułu oraz większości elementów graficznych, nanoszenie korekt współautorów oraz nadzorowanie procesu recenzji (*Corresponding Author*). Udział pozostałych współautorów to częściowa koncepcja artykułu, merytoryczna weryfikacja treści artykułu, w szczególności analiza wyładowań typu CG oraz CID w dziedzinie czasu, część studium literaturowego oraz pozyskanie funduszy.

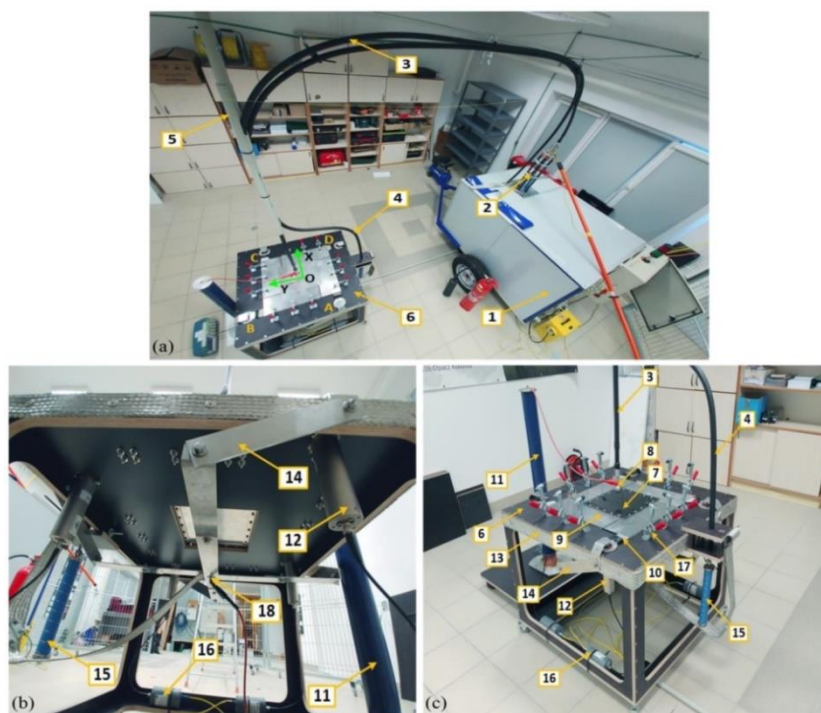
4.2.3. Omówienie zrealizowanego oryginalnego osiągnięcia projektowego, konstrukcyjnego, technologicznego

Zrealizowane oryginalne osiągnięcie projektowe, konstrukcyjne, technologiczne zatytułowane „*Stanowisko probierczo-pomiarowe oraz metoda badań wysokonapięciowych impedancji, rezystywności i odporności materiałów kompozytowych*” zostało udokumentowane trzema pozycjami [B1-B3], z których dwie [B1-B2] stanowią artykuły opublikowane w wysoko punktowanych czasopismach o zasięgu międzynarodowym, natomiast pozycja [B3] to przyznany patent pt. „*Stanowisko probierczo-pomiarowe do badań wysokonapięciowych impedancji, rezystywności i odporności materiałów kompozytowych oraz sposób badania wysokonapięciowych impedancji, rezystywności i odporności materiałów kompozytowych*” (PL243235B1) na wynalazek i metodę (Tab. 2). Osiągnięcie to powstało po doktoracie i jestem w nim jednym z głównych autorów z największym udziałem procentowym równym udziałowi pierwszego współautora ([B1-B2]) lub drugim po pierwszym współautorze ([B3]). Średnia liczba punktów MNiSW publikacji dokumentujących osiągnięcie [B1-B2] wynosi **170 pkt.**, natomiast **średni IF czasopism** obliczony, jako sumaryczny IF poszczególnych publikacji podzielony przez ich liczbę wynosi **ponad 4,4** (Tab. 3). Przedstawienie drugiego osiągnięcia zostało omówione na zasadach analogicznych, jak w przypadku osiągnięcia pierwszego (4.2.2).

Osiągnięcie powstało w ramach mojego udziału w **grancie Podkarpackiego Centrum Innowacji** pt. „*Ognioodporne kompozyty przewodzące stosowane, jako elementy konstrukcyjne statków powietrznych (F3 71)*”. Projekt miał na celu opracowanie stanowiska i metody badań materiałów kompozytowych przeznaczonych na potrzeby lotnictwa, jak również zoptymalizowanie konstrukcji materiału kompozytowego (jego własności elektrycznych oraz fizyko-chemicznych) pod względem jego zastosowania w konstrukcjach samolotów. Kompozyty, będące w istocie połączeniem polimeru wraz z zatopionymi w nim

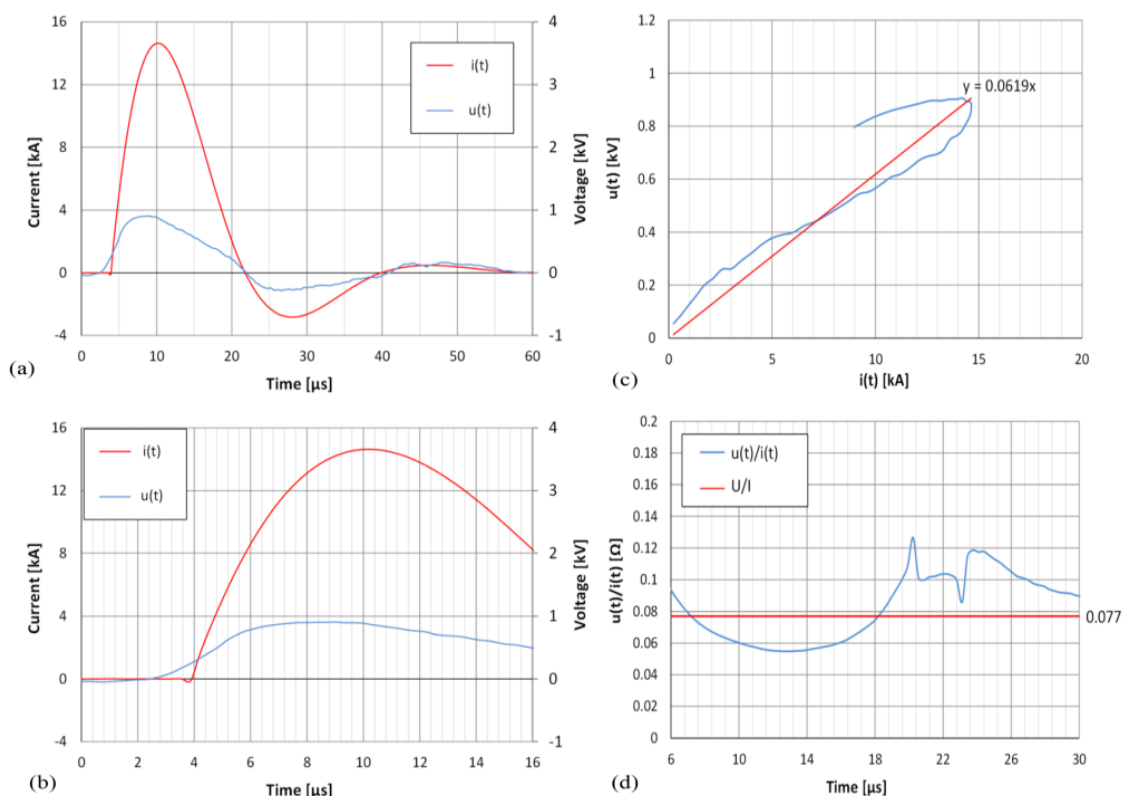
taśmami z włókien węglowych, stanowią obecnie coraz częstszą alternatywę dla materiałów metalowych w kontekście ich zastosowania do budowy poszycia statków powietrznych. Podstawową przewagą w stosunku do materiałów metalowych jest ich niewielka masa, jak również bardzo dobra odporność na naprężenia. Jak wynika z danych statystycznych, bezpośrednie oddziaływanie prądu piorunowego na samolot jest praktycznie niemożliwie do uniknięcia. Przyczynia się to do uszkodzeń poszycia statków lotniczych oraz generuje wysokie roczne koszty procedur serwisowych. Wpływ na to mają specyficzne fizykochemiczne właściwości substancji polimerowych, których odporność na działanie łuku elektrycznego oraz wysokiej temperatury, występujących podczas uderzenia pioruna, jest stosunkowo niewielka. Stworzone stanowisko do badania kompozytów miało z założenia umożliwiać nie tylko poddawanie próbek tych materiałów testom niszczącym, ale również jest wyposażone w szereg narzędzi pomiarowych, które pozwoliły na określenie udarowych elektrycznych właściwości kompozytów. Kolejną unikalną cechą badań było poszukiwanie optymalnego, pod względem dobrej przewodności elektrycznej oraz niepalności, domieszkowania materiału polimerowego uzyskiwanego z wykorzystaniem specjalnych proszków przewodzących. W wyniku badań, wspólnie z *Katedrą Kompozytów Polimerowych PRz*, udało się opracować rozwiązanie [D4,D22], które również zostało opatentowane pt. „*Samogasnąca kompozycja żywicy epoksydowej o zwiększonym przewodnictwie elektrycznym oraz sposób otrzymywania samogasnącej kompozycji żywicy epoksydowej o zwiększonym przewodnictwie elektrycznym*” (PL245088B1).

W publikacji [B1] przedstawiono konstrukcję stanowiska do bezpośredniego testowania materiałów kompozytowych prądem piorunowym. Stanowisko składa się z generatora prądu piorunowego GUP-8-10 o wartości szczytowej prądu udarowego do 50 kA, stołu testowego, w którym umieszczona jest próbka kompozytu oraz oprzyrządowania pomiarowego w postaci czterech boczników prądowych ISM 5P/10 zainstalowanych w konstrukcji stołu, sondy wysokonapięciowej oraz wielokanałowego układu światłowodowego (Rys.19a).



Rysunek 19. Stanowisko pomiarowe do badania materiałów kompozytowych na potrzeby lotnictwa: (a) stół testowy wraz z generatorem prądu piorunowego; (b) stół testowy z widoczną taśmą otokową (13) symetryzującą stanowisko badawcze; (c) widok stołu testowego z krzyżowym układem odprowadzenia prądu piorunowego (14) [B1]

Konstrukcja stołu jest częściowo nawiązaniem do badań prowadzonych przez NASA [L29], co umożliwiło późniejsze odniesienie własnych wyników badań do literatury. Pomimo podobieństw, stanowisko opracowane z moim udziałem, różni się znacząco od stosowanych do tej pory rozwiązań [L29]. Podstawową różnicą w stosunku do konstrukcji [L29] jest zaproponowana przeze mnie symetryzacja części obwodu elektrycznego, przez który prąd piorunowy odpływa z próbki kompozytu. W tym celu zaproponowałem zastosowanie specjalnej taśmy otokowej biegnącej wzdłuż rantu stołu testowego (Rys. 19b), do której bezpośrednio podłączono boczniki prądowe. Dodatkową symetryzację obwodu elektrycznego uzyskano poprzez zastosowanie specjalnej konstrukcji krzyżowej płaskowników podłączonych do taśmy otokowej (Rys. 19c). Umożliwiło to wyrównanie impedancji poszczególnych obwodów odpływowych prądu piorunowego. Dzięki temu uzyskano lepsze wyrównanie wartości szczytowych prądów rozprzyskających się w kompozycie w odniesieniu do rozwiązania [L29]. W przekonaniu wnioskodawcy, pozostała niewielka dysproporcja prądów wynika z własności anizotropowych kompozytu, jak również efektów indukowanych przez pętlę powrotną przewodu łączącego generator ze stołem testowym. Aspekt ten będzie dalszym kierunkiem badań w zakresie pełnej symetryzacji stanowiska w przyszłości. Kolejnym zaproponowanym przeze mnie rozwiązaniem konstrukcyjnym było wzajemne zbliżenie przewodu zasilającego stół testowy oraz przewodu powrotnego. Pozwoliło to na minimalizację rejestrowanych efektów indukowanych oraz zakłóceń pomiarowych, jak również zminimalizowanie ryzyka uszkodzenia instalacji i urządzeń budynku, w którym wykorzystywano stanowisko badawcze. Moją inicjatywą było również dostosowanie własnej aplikacji obsługującej łącza światłowodowe, którą od podstaw napisałem w Matlabie. Aplikacja ta była również wykorzystywana podczas wcześniejszych testów na poligonie badawczym w Hucie Poręby realizowanych w ramach mojego udziału w grantie NCN (Nr 3138/B/T02/2011/40). Zastosowanie układu światłowodowego wraz z układem boczników prądowych znacząco wpłynęło na poprawę jakości rejestrowanych danych, jak również było korzystniejszym rozwiązaniem z punktu widzenia pasma przenoszenia sygnału od stosowanych do tej pory cewek Rogowskiego [L29]. Moim pomysłem było również umieszczenie elektrody udarowej stycznie oraz bezpośrednio w centrum próbki kompozytu, jak również jednoczesne umieszczenie sondy napięciowej pomiędzy wyjściem tej elektrody udarowej a jednym z boków kompozytu. Takie podejście umożliwiło kompensację spadku napięcia od łuku elektrycznego i tym samym poprawne określenie spadku napięcia w samym kompozycie. Było to umotywowane celem badań, w którym istotą były efekty związane z przepływem prądu w kompozycie oraz własności elektryczne samego kompozytu, a nie efekty związane z oddziaływaniem łuku elektrycznego. Pomimo znacznego zminimalizowania oddziaływania łuku elektrycznego oraz procesów rozładowczych generatora w trakcie testów niszczących, na czole sygnału napięciowego nadal uwidaczniały się pozostałe efekty indukowane. W celu kompensacji tego niekorzystnego zjawiska opracowałem specjalną procedurę kondycjonującą sygnał pomiarowy w Matlabie (Rys. 20a). Dalsza kompensacja wpływu efektów indukowanych w pętli pomiarowej sygnału napięciowego została zaproponowana przeze mnie w publikacji [B2]. W publikacji [B1] odpowiadałem również za wyznaczenie charakterystyk napięciowo-prądowych kompozytu (Rys. 20b), jak również jego rezystancji chwilowej zdefiniowanej na potrzeby analizy, jako stosunek wartości chwilowych napięcia i prądu (Rys. 20c).

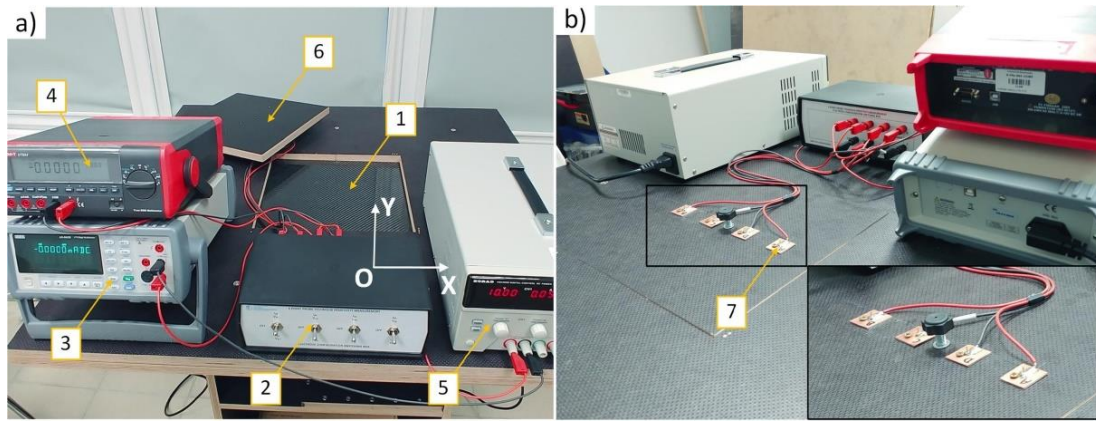


Rysunek 20. Analiza uderowych własności elektrycznych materiału kompozytowego: (a) prąd piorunowy rozplywający się w kompozycie oraz sygnał spadku napięcia w kompozycie; (b) początkowa faza fali prądowej z panelu (a); (c) wyznaczenie uderowej charakterystyki napięciowo-prądowej dla wybranej próbki testowej; (d) wyznaczenie rezystancji chwilowej [B1]

Podczas wyznaczania i wizualizacji impedancji uderowej nawiązałem do metod, które są powszechnie stosowane w ochronie odgromowej na potrzeby określania uderowych własności elektrycznych gruntu [D5,D26-D27] (Rys. 20c).

Podsumowując, mój udział w publikacji [B1] oceniam na **16.67%** (lub **33%** uwzględniając współautorów wyłącznie z dyscypliny wnioskodawcy) i jest on równy udziałowi wszystkich współautorów. Równomierny udział procentowy wszystkich współautorów wynika ze znacznego zakresu badań oraz ich interdyscyplinarności. Mój udział obejmował: koncepcję oraz wykonanie niektórych elementów stołu testowego (udział po 50% wspólnie z pierwszym współautorem), przeprowadzenie kondycjonowania sygnału pomiarowego napięcia, metodologię badań polegającą na zdefiniowaniu oraz wyznaczeniu impedancji uderowej oraz rezystancji chwilowej kompozytu, jak również merytorycznej weryfikacji treści artykułu. Udział pozostałych współautorów to koncepcja artykułu, nanoszenie korekt współautorów oraz nadzorowanie procesu recenzji (*Corresponding Author*), opracowanie elementów graficznych, a także wytworzenie i weryfikacja próbek kompozytowych (współautorzy z Wydziału Chemicznego PRz), weryfikacja merytoryczna treści artykułu oraz przeprowadzenie studium literaturowego oraz pozyskanie funduszy.

W publikacji [B2] wykorzystano opracowane stanowisko testowe badań uderowych kompozytów [B1] do docelowej poprawy własności elektrycznych oraz fizyko-chemicznych materiałów kompozytowych. Publikacja [B2] przedstawia również konstrukcję drugiego stanowiska do badania niskonapięciowych rezystancji i rezystywności próbek kompozytowych, w budowie którego miałem również swój udział (Rys. 21).



Rysunek 21. Stanowisko do badań niskonapięciowych własności elektrycznych kompozytów: (a) stół testowy z zainstalowaną próbką kompozytu; (b) niskonapięciowy test próbki metodą czteroelektrową [B2]

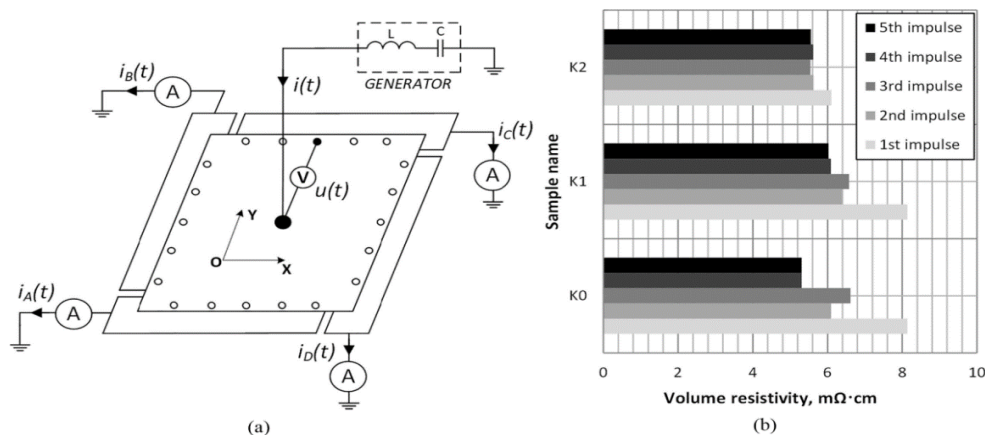
Swój udział w budowie oraz eksploatacji tego stanowiska oceniam na 50% i jest on równy udziałowi pierwszego współautora publikacji [B2]. Stanowisko umożliwia badanie własności elektrycznych kompozytów co najmniej dwiema metodami: czteroelektrową oraz metodą Van der Pauw. Jego oryginalność polega przede wszystkim na konstrukcji stołu testowego oraz sposobie wykonania i umieszczania elektrod pomiarowych na próbce kompozytu. Mój udział merytoryczny w artykule [B2] polegał głównie na samodzielnym opracowaniu metody określania udarowych własności próbki kompozytowej, takich jak: impedancja udarowa Z_S (7), rezystywność powierzchniowa ρ_S (8) oraz rezystywność objętościowa ρ_V (9):

$$Z_S = \frac{\max(|u(t)|)}{\max(|i(t)|)} \quad (7)$$

$$\rho_S = \pi Z_S \quad (8)$$

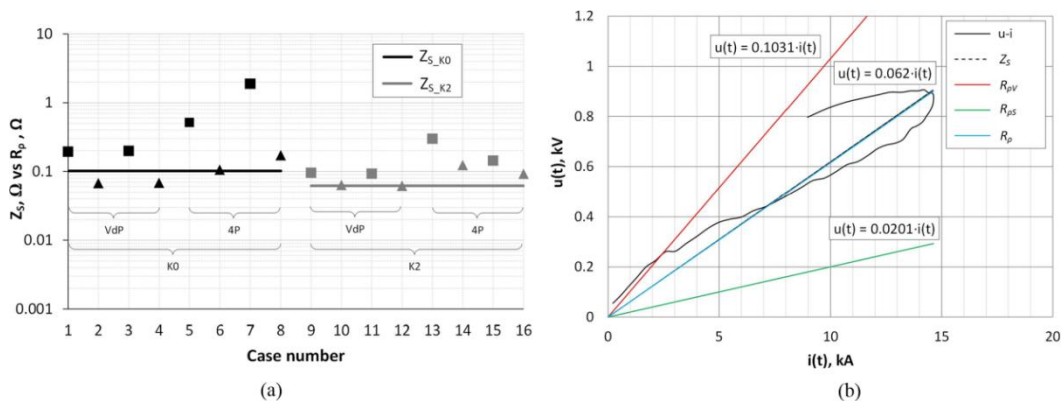
$$\rho_V = \pi \frac{(B \frac{d}{4})^2}{t} \cdot Z_S \quad (9)$$

gdzie: $u(t)$ oraz $i(t)$ oznaczają odpowiednio sygnały spadku napięcia w kompozycie oraz całkowity prąd piorunowy wstrzyknięty do próbki (Rys. 22), B – współczynnik efektywności powierzchniowej, d – średnicę zastępczą próbki kompozytowej, natomiast t to grubość próbki.



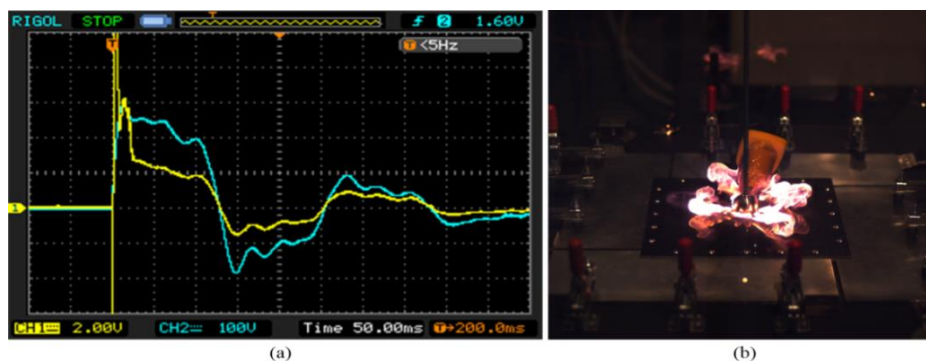
Rysunek 22. Testy materiałów kompozytowych prądem piorunowym składowej głównej: (a) schemat układu badawczego; (b) przykładowy wynik testu obrazujący zmniejszenie rezystywności udarowej dla kolejnych udarów piorunowych wstrzykniętych do próbki kompozytu [B2]

Moją inicjatywą była bardziej zaawansowana niż w [B1] korekcja wpływu efektów indukowanych w pętli pomiarowej i związanego z tym spadku napięcia na kompozycie. Umożliwiło to poprawny pomiar tego sygnału, jak również w konsekwencji poprawne określenie impedancji udarowej dla badanej próbki. Zaproponowałem również możliwość wykorzystania wysokonapięciowej impedancji udarowej kompozytu (7) w miejsce rezystancji niskonapięciowej (DC) w zależnościach (8) oraz (9), jak również przejście z układu próbki o kształcie cylindrycznym, stosowanego w literaturze [L30], do układu prostokątnej geometrii próbki kompozytu. Metoda ta stała się wprost przedmiotem patentu (PL243235B1). Ponadto umożliwiła ona ilościową ocenę własności kompozytu w kontekście bezpośredniego oddziaływania prądu udarowego o wartości szczytowej porównywalnej z udarami piorunowymi występującymi w naturze (Rys. 23).



Rysunek 23. Analiza i porównanie własności elektrycznych materiałów kompozytowych: (a) porównanie wartości impedancji udarowej (7) oraz rezystancji niskonapięciowych (DC) dla różnych próbek wyznaczonych metodami Van der Pauw oraz czteroelektrodową; (b) porównanie impedancji udarowej, rezystancji DC ze zmierzoną udarową charakterystyką napięciowo-prądową kompozytu [B2]

Drugim osiągnięciem badawczym związanym z opracowanym stanowiskiem testowym [B2] jest fakt możliwości wykorzystania rezystancji niskonapięciowej kompozytu do wstępnego oszacowania jego własności udarowych (Rys. 23b). W praktyce pozwala to na bardzo szybką wstępną ocenę własności elektrycznych i tym samym przydatności danego materiału kompozytowego do konkretnych zastosowań, m.in. na potrzeby lotnictwa. Opracowane stanowisko oraz metoda do testów niszczących kompozytów została również zmodyfikowana z moim udziałem w kontekście oddziaływania składowej długotrwałej prądu piorunowego (CC), gdzie podczas pierwszych testów z wykorzystaniem szybkich kamer wideo zaobserwowano znacznie bardziej intensywne efekty niszczące niż dla głównego udaru piorunowego (Rys. 24).



Rysunek 24. Pierwsze testy stanowiska do badań niszczących kompozytów z zastosowaniem generatora długotrwałego prądu piorunowego: (a) przebieg napięcia oraz prądu próbki kompozytowej; (b) fragment szybkiej wideorejestracji próby udarowej

Podsumowując, mój udział w publikacji [B2] oceniam na 22.5% (lub 35% uwzględniając współautorów wyłącznie z dyscypliny wnioskodawcy) i jest on równy udziałowi pierwszego współautora. Zdeklarowana wartość udziału procentowego wynika ze znacznego zakresu badań oraz ich interdyscyplinarności. Obejmował on: koncepcję oraz wykonanie niektórych elementów stołu testowego do niskonapięciowych testów kompozytów (udział po 50% wspólnie z pierwszym współautorem), jak również 50% udział w badaniach niskonapięciowych parametrów próbek kompozytowych przed i po próbach niszczących prądem udarowym, metodologię badań polegającą na samodzielnym zdefiniowaniu procedury badawczej obejmującej wyznaczenie impedancji udarowej oraz rezystywności próbek kompozytowych, jak również merytoryczną weryfikację treści artykułu. Udział pozostałych współautorów to koncepcja artykułu, nanoszenie korekt współautorów oraz nadzorowanie procesu recenzji (*Corresponding Author*), opracowanie elementów graficznych, analizy statystycznej, a także wytworzenie i weryfikacja własności fizyko-chemicznych próbek kompozytowych (współautorzy z Wydziału Chemicznego PRz), weryfikacja merytoryczna wraz z przeprowadzeniem studium literaturowego oraz pozyskanie funduszy.

W patencie [B3] przedstawiono wynalazek oraz powiązaną metodę badawczą pt. „*Stanowisko probierczo-pomiarowe do badań wysokonapięciowych impedancji, rezystywności i odporności materiałów kompozytowych oraz sposób badania wysokonapięciowych impedancji, rezystywności i odporności materiałów kompozytowych*” (PL243235B1). Metodę opisaną równaniami (7)–(9) udokumentowano sześcioma przykładami realizacji z wykorzystaniem generatora prądu udarowego. Wyróżniono również 17 zastrzeżeń patentowych, z których w każdym miałem swój udział, natomiast zastrzeżenia nr. 2, 3, 7, 8, 14, 15 oraz 16 są moim indywidualnym osiągnięciem. Mój udział w patencie jest zbieżny z osiągnięciami przedstawionymi podczas omawiania publikacji [B1] oraz [B2] i nie wymaga dalszego komentarza.

Podsumowując, mój udział w patencie [B3] oceniam na 30% (lub 35% uwzględniając współautorów wyłącznie z dyscypliny wnioskodawcy). Wartość niższa o 10% od udziału pierwszego współautora wynika z mniejszego zaangażowania w formalny proces opracowywania zgłoszenia patentowego. Udziały merytoryczne współautorów zostały wykazane podczas omawiania publikacji [B1-B2], jak również w załączonych oświadczeniach (Załącznik nr 6).

4.2.4. Podsumowanie i określenie wkładu w rozwój dyscypliny

Podsumowując, przedstawiono dwa główne osiągnięcia naukowe w postaci: jednotematycznego cyklu publikacji [A1-A9] oraz oryginalnego zrealizowanego osiągnięcia projektowego, konstrukcyjnego, technologicznego [B1-B3] omówione w sekcjach 4.2.2 oraz 4.2.3. Obejmują one zagadnienia współczesnej ochrony odgromowej i przepięciowej będącej istotnym elementem dyscypliny automatyka, elektronika, elektrotechnika i technologie kosmiczne. Wynika to bezpośrednio z charakteru badań udokumentowanego publikacjami i patentami w różnorodnych i wysokopunktowanych czasopismach o zasięgu międzynarodowym. Wydzielone obszary badań są ze sobą ściśle powiązane i tworzą jednotematyczną całość, o czym świadczą liczne wzajemne odwołania do poszczególnych pozycji w cyklu publikacji. Przedstawione badania mogą zostać kompleksowo wykorzystane we współczesnych systemach lokalizacji wyładowań atmosferycznych stosowanych do monitoringu zjawisk burzowych, jak również określania wielu parametrów zjawisk piorunowych stosowanych wprost w normach ochrony odgromowej. Przedstawione oryginalne rozwiązania konstrukcyjne, m.in. w postaci dwukierunkowego sensora piorunowego pola magnetycznego ELF-MF oraz dookólnego układu optycznego szybkiej rejestracji wideo wyładowań atmosferycznych, wpisują się w aktualne trendy rozwojowe

systemów LLS, zwłaszcza w kontekście detekcji składowej długotrwałej prądu piorunowego. Wykorzystanie sieci neuronowych oraz algorytmów sztucznej inteligencji do identyfikacji typu wyładowań atmosferycznych na podstawie piorunowego impulsu elektromagnetycznego jest również jednym z głównych kierunków rozwoju współczesnych systemów LLS. Wiele zaproponowanych rozwiązań, m.in. dookólny układ optyczny, może zostać również wykorzystanych w wielu innych obszarach nauki i przemysłu takich, jak: medycyna, robotyka, fotografia, czy przemysł zbrojeniowy.

Za swój wkład w rozwój dyscypliny automatyka, elektronika, elektrotechnika i technologie kosmiczne uważam:

Identyfikację parametrów oraz modelowanie zjawisk piorunowych na podstawie zarejestrowanego pola elektrycznego [A1,A3]:

- opracowanie modelu matematycznego lidera skokowego poprzedzającego wyładowania doziemne typu ujemnego, umożliwiającego określenie wysokości kanału piorunowego na podstawie zarejestrowanego piorunowego pola elektrycznego, służącego do wczesnej detekcji niebezpiecznych stref aktywności piorunowej w chmurze burzowej [A1],
- opracowanie modelu matematycznego lidera poprzedzającego wyładowania doziemne typu dodatniego, umożliwiającego określenie wysokości kanału piorunowego, gęstości ładunku w kanale piorunowym oraz całkowitego ładunku od którego zależy energia wyładowania atmosferycznego, jak również prędkości fali prądowej w kanale piorunowym, która w istotny sposób wpływa na wartość przepięć indukowanych od wyładowań atmosferycznych [A3].

Opracowanie nowoczesnych środków i metod detekcji wyładowań atmosferycznych [A2,A7,A8]:

- zaprojektowanie, zbudowanie i kalibracja konstrukcji ortogonalnej anteny piorunowego pola magnetycznego ELF-MF oraz przedwzmacniacza, charakteryzujących się rozszerzonym dolnym pasmem częstotliwościowym w porównaniu do obecnie stosowanych sensorów, co umożliwia rejestrację m.in. składowej długotrwałej prądu piorunowego odpowiadającej za niszczące skutki termiczne wyładowań atmosferycznych [A2],
- zaprojektowanie i zbudowanie dookólnego układu optycznego dedykowanego do detekcji wyładowań atmosferycznych, w szczególności monitoringu obszaru przy powierzchni ziemi, gdzie następuje bezpośrednia interakcja pioruna z infrastrukturą budowlaną oraz elektroenergetyczną, jak również możliwość adaptacji charakterystyki projekcji zwierciadła dookólnego, co pozwala na jego zastosowanie w wielu obszarach nauki i przemysłu [A7],
- zaprojektowanie i zbudowanie układu oraz metody kalibracji dedykowanych dla dookólnego układu optycznego, umożliwiającego fotogrametrię kanału piorunowego oraz bardziej precyzyjne niż w przypadku obecnych systemów LLS, określenie miejsca połączenia kanału piorunowego z obiektami naziemnymi, jak również ocenę jakości wykonania zwierciadeł dookólnych, co wpływa na obniżenie kosztów i optymalizację procesu produkcji całego systemu [A8].

Detekcję oraz identyfikację zjawisk piorunowych z wykorzystaniem analizy spektralnej, sieci neuronowych oraz szybkiej wideorejestracji [A4,A5,A6,A9]:

- przeprowadzenie analizy spektralnej z wykorzystaniem transformaty STFT, umożliwiającej filtrację zakłóceń oraz poprawne określenie własności impulsu elektromagnetycznego generowanego przez wyładowania wstępne w chmurze burzowej, w tym określenie składowych częstotliwościowych związanych z tym zjawiskiem, umożliwiających oszacowanie wpływu tego typu piorunowego impulsu elektromagnetycznego na urządzenia elektryczne, elektroniczne oraz systemy elektroenergetyczne modelowanych w ochronie odgromowej poprzez impedancje w dziedzinie częstotliwościowej [A4],
- określenie struktur sieci neuronowych oraz klasyfikatorów sztucznej inteligencji, dla których możliwa jest efektywna identyfikacja wyładowań typu doziemnego oraz wewnątrzmurowego wykorzystująca piorunowe pole elektryczne na potrzeby detekcji i identyfikacji tych zjawisk przez systemy LLS [A5],
- przeprowadzenie wielowymiarowej analizy wyładowań wewnątrzmurowych (lidera odrzutu) z wykorzystaniem analizy w dziedzinie czasu, analizy spektralnej, szybkiej rejestracji wideo oraz danych z radaru Dopplera, pozwalającej na rozszerzenie wiedzy na temat tego zjawiska, metod jego lokalizacji, jak również określenie wartości i profili odbiciowości radarowej charakterystycznych dla obszarów występowania tego typu wyładowań atmosferycznych wewnątrzmurowych, co umożliwia predykcję oraz określenie stref aktywności burzowej w chmurze istotnych dla ochrony odgromowej statków powietrznych [A6],
- określenie cech widm częstotliwościowych dla wyładowań wewnątrzmurowych typu kompaktowego (CID), charakteryzujących się największymi wartościami szczytowymi prądów piorunowych oraz zlokalizowanymi na wysokościach typowych dla pułapów lotów samolotów pasażerskich, określenie efektywnej metody detekcji oraz identyfikacji tego typu zjawisk w pełnym zakresie odległości od źródła piorunowego pola elektrycznego [A9].

Opracowanie stanowiska probierczo-pomiarowego oraz metody badań wysokonapięciowych impedancji, rezystywności i odporności materiałów kompozytowych [B1,B2,B3]

- zaprojektowanie i zbudowanie układu badawczego do bezpośredniego testowania materiałów kompozytowych z wykorzystaniem generatorów prądu piorunowego o wartościach szczytowych do 50 kA [B1],
- zaprojektowanie i zbudowanie układu do badań niskonapięciowych parametrów elektrycznych materiałów kompozytowych oraz opracowanie metody obliczania impedancji udarowej kompozytu, jego rezystywności powierzchniowej oraz rezystywności objętościowej dla prądu piorunowego, przeprowadzenie testów i optymalizacja struktury materiału kompozytowego pod względem jego odporności termicznej oraz przewodności elektrycznej [B2],
- opatentowanie stanowiska oraz metody do badań niszczących materiałów kompozytowych z wykorzystaniem generatorów prądu piorunowego [B3].

4.3. Omówienie pozostałych istotnych osiągnięć naukowo-badawczych

W tej sekcji autoreferatu zostały omówione pozostałe istotne osiągnięcia naukowo-badawcze oraz konstrukcyjne wnioskodawcy. Wyróżniono pięć osiągnięć badawczych, takich jak: wdrożenie pierwszego w kraju i jednego z niewielu na świecie systemów rejestracji wyładowań atmosferycznych wykorzystującego anteny piorunowego pola

elektromagnetycznego oraz szybką wideorejestrację, modelowanie matematyczne prądu w kanale piorunowym, badania struktury geoelektrycznej gruntu, analizy rozptyłu prądu piorunowego w instalacjach budynku mieszkalnego oraz badania z wykorzystaniem generatorów dedykowanych do symulacji efektów prądów indukowanych w statkach lotniczych. Wszystkie te osiągnięcia wpisują się w trzy główne obszary badawcze realizowane od początku mojej działalności naukowej:

- *badanie piorunowego impulsu elektromagnetycznego i szybka rejestracja wideo procesu rozwoju kanału piorunowego (sekcje [4.3.1](#), [4.3.2](#)),*

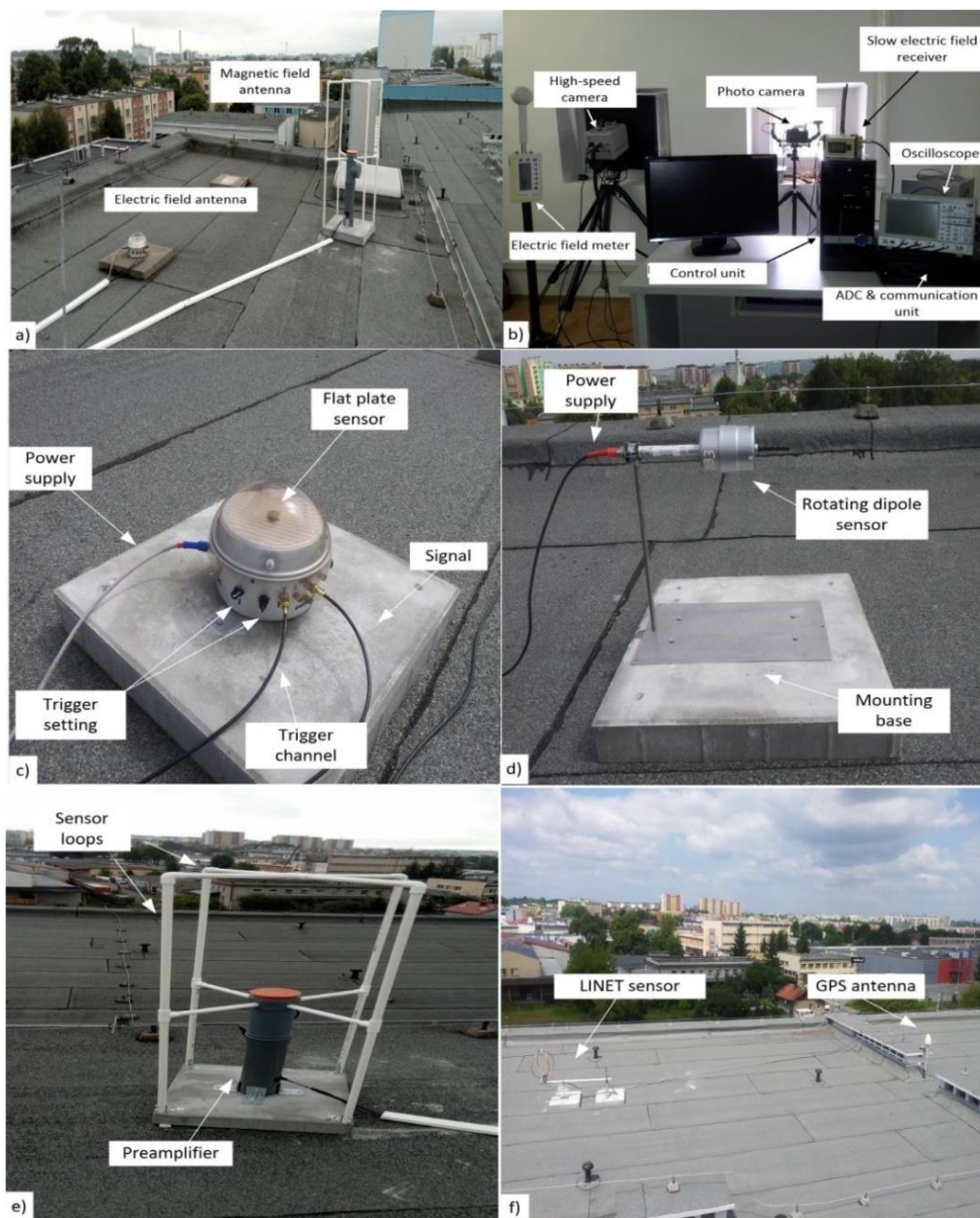
- *badania poligonowe i laboratoryjne instalacji oraz urządzeń elektrycznych z wykorzystaniem generatorów prądów piorunowych (efekty bezpośrednie oddziaływania wyładowań atmosferycznych) (sekcje [4.3.3](#), [4.3.4](#)),*

- *badania z wykorzystaniem generatorów prądów piorunowych indukowanych w awionice (efekty pośrednie oddziaływania wyładowań atmosferycznych) (sekcja [4.3.5](#)).*

Celem opisu jest uzupełnienie profilu naukowego wnioskodawcy, tak aby stworzyć kompletny obraz moich najistotniejszych osiągnięć naukowych. W opisach skupiłem się w szczególności na podkreśleniu swojego wkładu w powstanie osiągnięcia, jego aktualności oraz znaczenia dla dyscypliny. Każdorazowo podano również najważniejsze pozycje dorobku dokumentujące osiągnięcie ([Załącznik nr 4](#)).

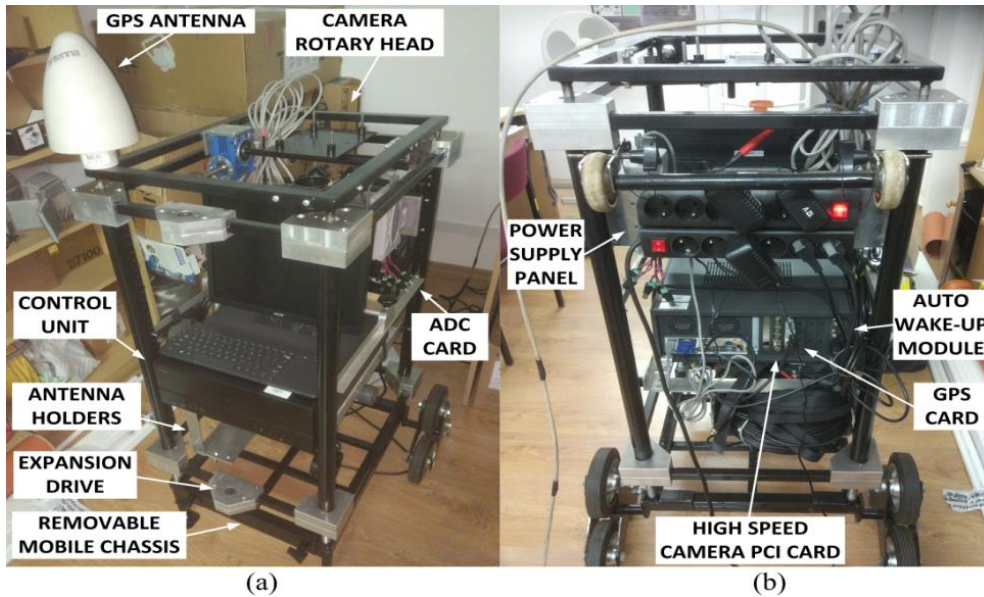
4.3.1. Zaprojektowanie, wdrożenie oraz modernizacja Systemu Rejestracji Wyładowań Atmosferycznych PRz na potrzeby rejestracji zjawisk piorunowych

System Rejestracji Wyładowań Atmosferycznych PRz powstał w 2013 r. po dwóch latach moich intensywnych prac związanych z opracowaniem konfiguracji sprzętowej anten piorunowego pola elektrycznego (0,5 Hz – 3 MHz), anten wolnozmiennego pola elektrycznego (0 Hz – 10 Hz), szybkiej kamery wideo Photron SA5 o prędkości do 1 mln klatek na sekundę, anteny GPS Meinberg 170PEX oraz 4-kanalowej karty pomiarowej Spectrum M2i.3131 o prędkości 25 MS [[D6](#)] ([Rys. 25](#)). W trakcie wdrażania systemu korzystałem z doświadczeń zdobytych w ramach współpracy naukowej z grupą badawczą z *University of Florida*, gdzie działa największe na świecie obserwatorium wyładowań atmosferycznych. W 2015 r. napisałem również specjalną procedurę synchronizującą, która na bazie sygnału GPS w standardzie IRIG-B pozwoliła uzyskać dokładność synchronizacji czasowej ograniczoną wyłącznie dokładnością zastosowanej anteny GPS z ominięciem opóźnień wprowadzanych przez system operacyjny PC [[D16](#)]. Dodałem również programową korektę czasu propagacji impulsu piorunowego, która na podstawie odległości od wyładowania atmosferycznego uzyskanej z systemu LLS, zapewniała dalszą poprawę dokładności systemu. Korekty tej nie posiada np. system LLDN zarządzany przez IGF PAN w Warszawie, co utrudnia identyfikację poszczególnych incydentów piorunowych. W 2019 r. do systemu dodano również antenę ortogonalną opracowaną przeze mnie od podstaw [[A2](#)]. W 2023 r. zmodyfikowałem również część optyczną rozszerzając zakres monitoringu szybkiej kamery wideo do 360° poprzez dodanie zaprojektowanego przeze mnie w całości dookólnego układu zwierciadeł [[A7-A8](#)]. Cały interfejs programowy opracowałem w Matlabie. Dzięki temu system umożliwia w pełni synchroniczną rejestrację piorunowego impulsu elektromagnetycznego oraz obrazu względem czasu UTC (ang. *Coordinated Universal Time*) z minimalną dokładnością równą 1 μs. W odróżnieniu od obserwatorium w Gainesville działającego na Florydzie, wprowadziłem również automatyczny tryb pracy systemu, co zmniejszyło zużycie energii oraz wydłużyło czas eksploatacji urządzeń w systemie, które działają nieprzerwanie od ponad 12 lat. Eliminuje to również konieczność bezpośredniej interakcji operatora systemu w trakcie burzy i zwiększa ilość zarejestrowanych danych piorunowych.



Rysunek 25. System Rejestracji Wyładowań Atmosferycznych: (a) rozmieszczenie anten systemu na dachu budynku PRz; (b) część pomiarowo-kontrolna na poddaszu; (c) antena szybkozmennego piorunowego pola elektrycznego; (d) antena wolnozmiennego piorunowego pola elektrycznego, (e) ortogonalna antena piorunowego pola magnetycznego; (f) anteny międzynarodowego systemu lokalizacji wyładowań atmosferycznych LINET.

System generuje również specjalne powiadomienia i raporty wysyłane za pośrednictwem poczty elektronicznej. Cechą charakterystyczną systemu a zarazem ideą jego budowy jest integracja jak największej liczby sensorów zjawisk burzowych. W przyszłości planują dalszą rozbudowę funkcjonalności systemu poprzez dodanie zestawu anten interferometrycznych, co jest obecnym trendem w najbardziej renomowanych ośrodkach badawczych na świecie. Systemy tego typu pozwalają na rejestrację procesu rozwoju kanału piorunowego z dokładnością przestrzenną nawet do 2 m [L31]. W ostatnim czasie wdrożyłem również mobilną wersję systemu o podobnej funkcjonalności pomiarowej, jak system stacjonarny. Stacja mobilna została już pozytywnie przetestowana podczas sezonu burzowego (Rys. 26).



Rysunek 26. Mobilna Stacja Rejestracji Wyładowań Atmosferycznych: (a) widok panelu przedniego; (b) widok panelu tylnego.

Jest to jedyna tego typu na świecie mobilna stacja rejestracja zjawisk piorunowych o tak zaawansowanej funkcjonalności. Obecnie System Rejestracji Wyładowań Atmosferycznych jest jednym z około 10 systemów rejestracji wyładowań atmosferycznych działających na całym świecie m.in. na Florydzie, w Austrii, Kanadzie, Francji, Japonii, czy Brazylii. Należy jednak zauważyć, że w odróżnieniu od stacji w Rzeszowie, znaczna ilość tych systemów jest zlokalizowana w obszarze górzystym o niewielkim zaludnieniu, co z perspektywy ochrony odgromowej nie jest optymalnym rozwiązaniem.

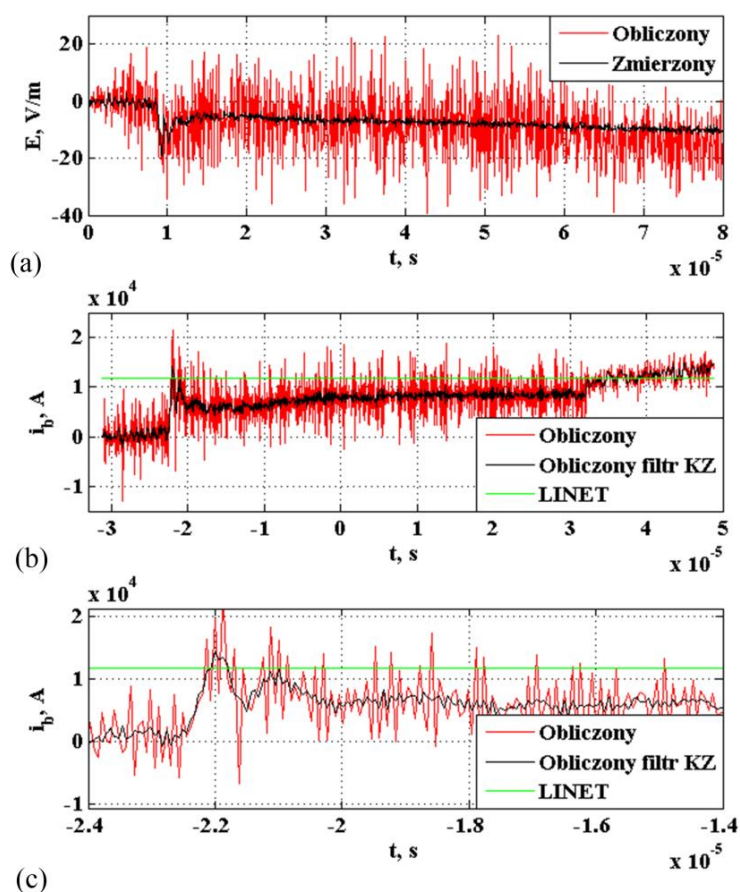
4.3.2. Modelowanie kształtu i parametrów prądu piorunowego u podstawy kanału piorunowego na potrzeby systemów lokalizacji wyładowań atmosferycznych

Istotność znajomości kształtu prądu piorunowego z punktu widzenia oceny bezpośrednich efektów oddziaływania tego prądu oraz ochrony odgromowej została przedyskutowana w sekcji 4.2.2. Ten obszar badawczy był głównym tematem mojej rozprawy doktorskiej [D1]. W ramach rozprawy, na bazie istniejących zależności opisujących piorunowy impuls elektromagnetyczny [L1-L3] oraz transformaty Laplace'a, opracowałem rekurencyjną metodę matematyczną pozwalającą określić kształt oraz wartość szczytową fali prądowej u podstawy kanału piorunowego (10), a więc w miejscu niezwykle istotnym z punktu widzenia ochrony odgromowej.

$$i_B[t_k] = \frac{\sum_{l=1}^k E_z[r, z, t_l + \frac{R}{c}] - \sum_{l=0}^{k-1} i_B[t_l] w[r, z, t_{k-l+1} + \frac{R}{c}]}{w[r, z, \frac{R}{c}]} \quad (10)$$

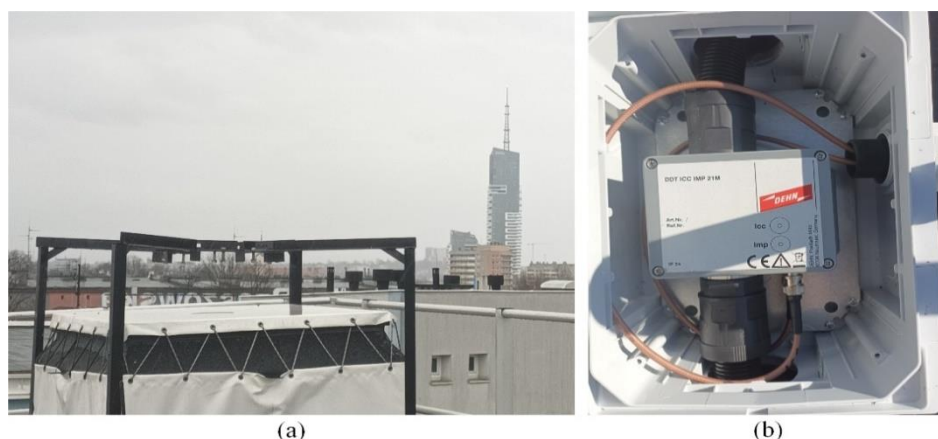
gdzie: $i_B[t_k]$ to wartości prądu u podstawy kanału piorunowego dla kolejnych próbek czasowych t_k , $E_z[\cdot]$ – wartość składowej pionowej pola elektrycznego, $w[\cdot]$ – funkcja pomocnicza zdefiniowana w [D3], r – odległość horyzontalna od kanału piorunowego, R – odległość 3D od źródła pola elektrycznego, z – wysokość źródła pola elektrycznego, c – prędkość światła, k, l – pomocnicze współczynniki sumowania. Należy zauważyć, że jest to procedura numeryczna dostosowana do dyskretnego charakteru sygnałów stosowanych w systemach LLS. Rekurencyjność metody stanowi istotną zaletę z punktu widzenia implementacji w systemach czasu rzeczywistego. Takie podejście umożliwia ciągłe przetwarzanie sygnału wejściowego z anteny piorunowego pola elektrycznego, przy jednocześnie niewielkiej złożoności obliczeniowej algorytmu. Po doktoracie w 2021 r.

opublikowałem część wyników swoich badań [D3], przy czym poszerzyłem ten opis o kolejne analizy w zakresie wpływu szumu na pracę algorytmu oraz analizy jego złożoności obliczeniowej. Najważniejszym wnioskiem z tych badań było stwierdzenie, że dla poprawnej i efektywnej implementacji metody konieczna jest częstotliwość próbkowania na poziomie minimum kilkunastu MHz, umożliwiającą prawidłowe odwzorowanie fali prądowej. Należy zauważyć, że algorytm może być zastosowany również w przypadku sygnału z anten magnetycznych, stosowanych typowo w systemach LLS. Wymaga to jedynie jednorazowej modyfikacji trzech współczynników wykorzystywanych w procedurze identyfikacji. Działanie algorytmu przetestowane dla rzeczywistych sygnatur piorunowego pola elektrycznego potwierdziło jego dobrą dokładność, którą zweryfikowałem z danymi systemu LINET. Otrzymane kształty prądu piorunowego (Rys. 27) odzwierciedliły zjawiska fizyczne zachodzące w kanale piorunowym, m.in. związane z obecnością w kanale piorunowym nie jednej, ale superpozycji dwóch fal prądowych: pierwotnej i odbitej [L1,L7]. Jest to efekt, który jak dotąd nie został uwzględniony w normach ochrony odgromowej (PN-EN-62305).



Rysunek 27. Obliczenie prądu u podstawy kanału piorunowego: (a) zmierzony sygnał piorunowego pola elektrycznego; (b) obliczony kształt fali prądowej; (c) początkowy fragment przebiegu z panelu (b) z widoczną superpozycją dwóch fal prądowych w kanale piorunowym. Rejestracja: stacja Rzeszów, 28.07.2014 r. 12:23:38.266729 (UTC).

Przyszłe plany badawcze w tym zakresie obejmują dalszą weryfikację i optymalizację modelu z wykorzystaniem danych z **Systemu Monitorowania Prądu Piorunowego**, który niedawno (marzec 2025 r.) został zainstalowany na iglicy wieżowca Olszynki Park w Rzeszowie (220 m wysokości) (Rys. 28).

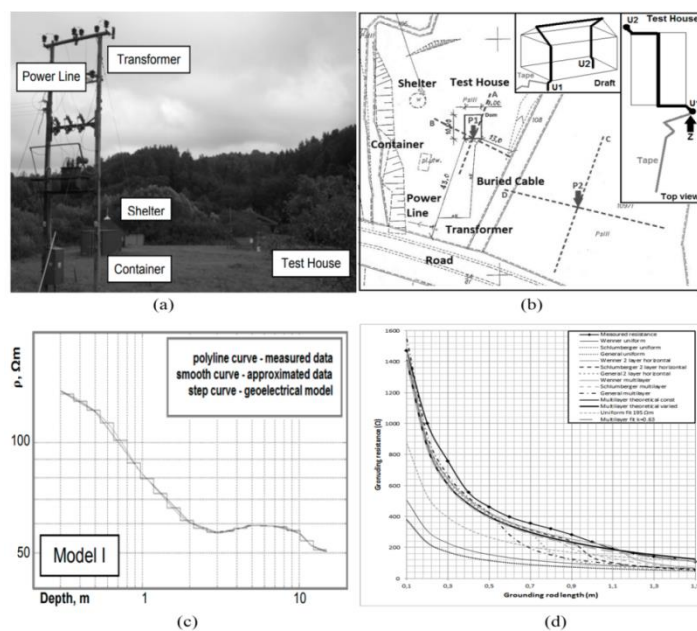


Rysunek 28. Wieżowiec *Olszynki Park* w Rzeszowie z zainstalowanym na iglicy Systemem Monitoringu Prądu Piorunowego: (a) widok z dachu budynku PRZ; (b) fragment cewki pomiarowej wraz z integratorem sygnału

Ten wieżowiec to aktualnie najwyższy budynek mieszkalny tego typu w Polsce. System firmy Dehn, z którą intensywnie współpracuję przy tym projekcie, obejmuje bezpośredni pomiar prądu piorunowego wyładowania głównego oraz składowej długotrwałej z wykorzystaniem dwóch cewek Rogowskiego o długości 21 m. Moje dalsze plany badawcze obejmują poprawę odporności opracowanego modelu [D3] na szum obecny w sygnale piorunowego pola elektrycznego, jak również weryfikację obecnie istniejących modeli funkcji tłumienia fali prądowej w kanale piorunowym.

4.3.3. Pomiary i modelowanie wielowarstwowych struktur geoelektrycznych gruntu na potrzeby analizy układów uziemień

Aktywność w tym obszarze prowadziłem w szczególności na początku mojej kariery naukowej i była ona kontynuacją badań podjętych w ramach pracy magisterskiej oraz późniejszego projektu NCN (sekcja 6.2.2) (Rys. 29).

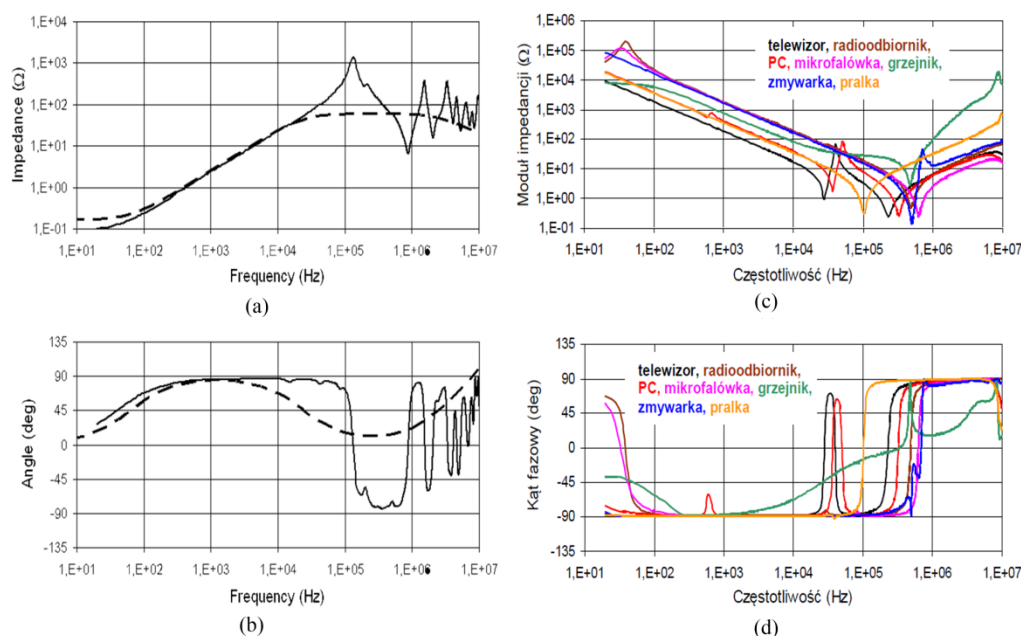


Rysunek 29. Badania w obszarze zastosowania wielowarstwowej struktury geoelektrycznej gruntu na potrzeby modelowania układów uziemień: (a) widok poligonu badawczego w Hucie Poręby; (b) szkic poligonu; (c) jeden modeli geoelektrycznych gruntu obliczony w Matlabie dla obszaru poligonu badawczego [D5]; (d) obliczona rezystancja uzimienia dla różnych wielowarstwowych modeli gruntu [D27]

Struktura geoelektryczna gruntu jest istotnym parametrem wpływającym na rezystancję systemów uziemienia, będących podstawowymi elementami każdej instalacji odgromowej budynku. Możliwości gruntu są często niewykorzystane z uwagi na brak wystarczająco szczegółowej informacji na temat tego, gdzie pod powierzchnią ziemi znajdują się obszary o najniższej rezystywności, jak również z uwagi na brak dostępności złożonych modeli gruntu, które można wprowadzić do oprogramowania służącego projektowaniu układów uziemień. W tym celu samodzielnie opracowałem w Matlabie metodę, która na podstawie wyników terenowych pomiarów rezystywności gruntu, pozwala na określenie wielowarstwowego modelu struktury geoelektrycznej gruntu [D5,D26]. Model ten może być następnie wprowadzony do oprogramowania inżynierskiego np. CDEGS. W celu weryfikacji opracowanego modelu wraz z współautorami zebrałem szereg pomiarów gruntu na Poligonie badawczym PRz w Hucie Poręby, następnie po obliczeniu wielowarstwowego modelu geoelektrycznego wprowadziłem tę strukturę do oprogramowania CDEGS, gdzie zamodelowałem nie tylko rezystancje uziemień, ale również rozkład potencjału wokół układów uziemień [D5,D15,D17,D27,D29].

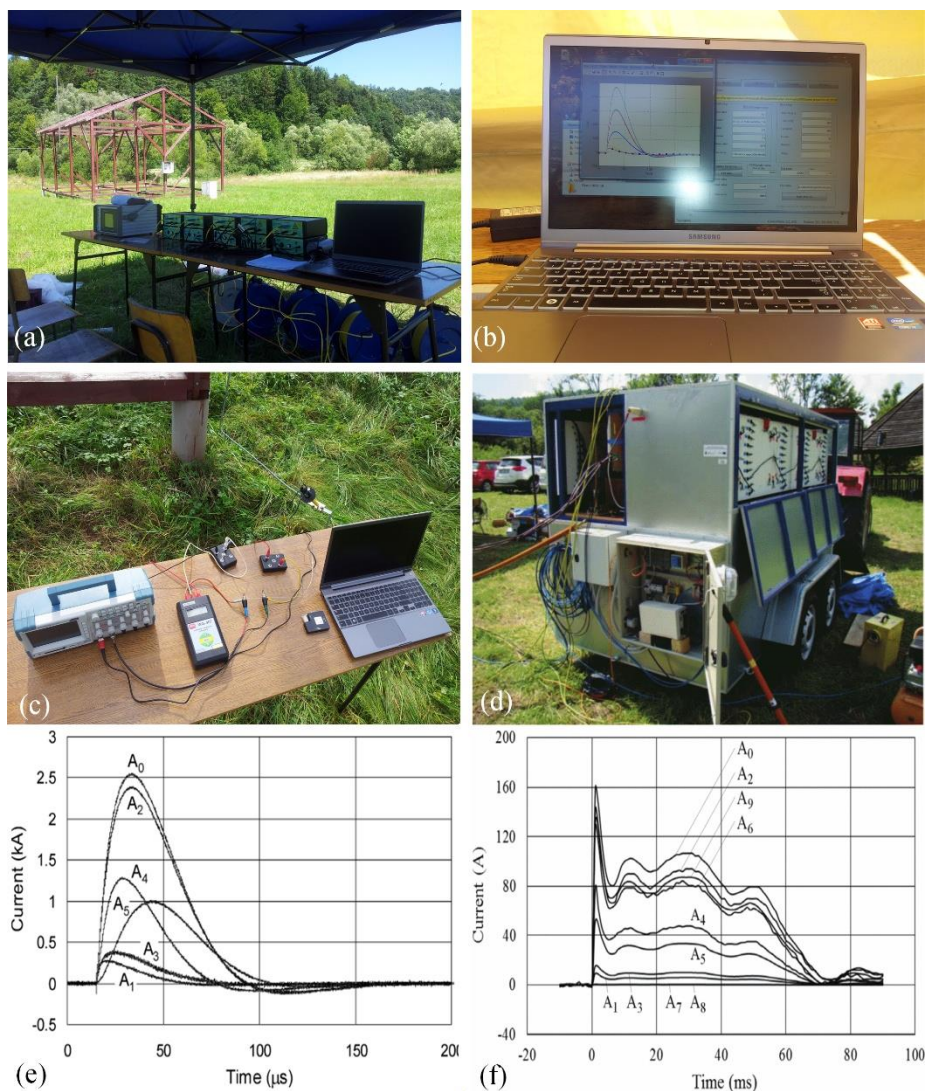
4.3.4. Analiza rozplywu prądu udarowego w urządzeniach piorunochronnych i instalacjach elektrycznych budynków z wykorzystaniem generatorów dużej mocy

Ten obszar mojej aktywności naukowej jest ściśle powiązany z udziałem w granicy NCN „Badania poligonowe narażeni urządzeń elektrycznych i elektronicznych na zaburzenia impulsowe dużej mocy” (lata 2011-2015). Mój wkład w badania polegał głównie na zadaniach logistycznych, pomiarach rezystywności gruntu, rezystancji oraz impedancji uziemień [D5,D26,D27,D29], jak również pomiarze i modelowaniu impedancji urządzeń AGD i RTV, rzeczywistej instalacji testowego obiektu mieszkalnego i transformatora SN/nn z wykorzystaniem miernika LCR-8110G GW Instek w zakresie 20 Hz do 10 MHz (Rys. 30).



Rysunek 30. Analiza charakterystyk częstotliwościowych elementów instalacji elektrycznej budynku mieszkalnego oraz przyłącza energetycznego: model obliczania charakterystyk częstotliwościowych modułu (a) i fazy (b) impedancji uzwojeń transformatora SN/nn [D28]; zmierzone charakterystyki częstotliwościowe modułu (c) i fazy (d) dla impedancji urządzeń gospodarstwa domowego wykorzystane w modelowaniu rozplywu prądu piorunowego w rzeczywistej instalacji budynku mieszkalnego [D17,D28].

Zadania te wykonywałem nakładem pracy równym z innymi współautorami. Samodzielnie skonfigurowałem również 6-kanalowy układ światłowodowy, zainicjowałem jego modernizację oraz napisałem interfejs systemu w Matlabie. Umożliwiło to analizę otrzymanych przebiegów bezpośrednio po próbie udarowej, szybki transfer danych oraz ich podgląd w czasie kilkunastokrotnie krótszym niż bez wykorzystania tego interfejsu ([Rys. 31](#)).



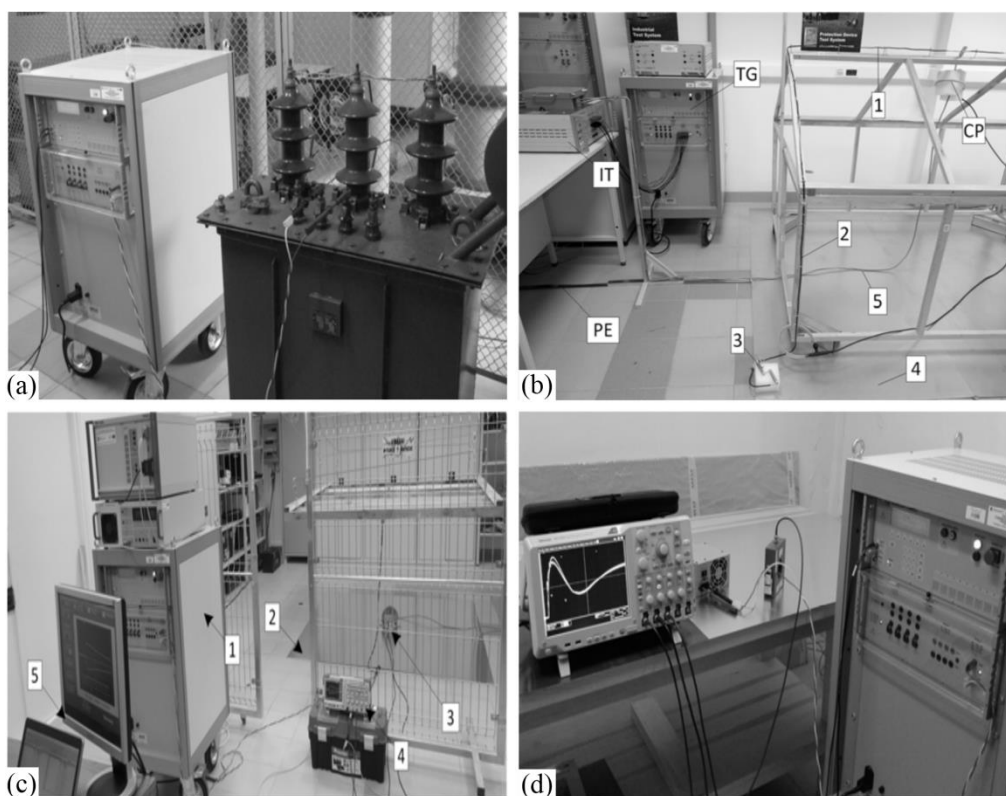
Rysunek 31. Badania rozptyłu prądu piorunowego w instalacji budynku na poligonie w Hucie Poręby: (a) widok poligonu; (b) opracowana aplikacja do obsługi pomiarowych łączy światłowodowych; (c) pomiar rezystancji udarowej uziomu instalacji odgromowej budynku; (d) generator piorunowego prądu długotrwałego podczas pracy na poligonie; efekty rejestracji światłowodowego systemu pomiarowego dla składowej głównej (e) [[D15](#),[D17](#)] oraz długotrwałej (f) prądu piorunowego [[D38](#)]

Moja aktywność obejmowała również ścisły obszar naukowy, m.in. opracowałem metodę, która na podstawie piorunowych impulsów prądu i napięcia wstrzykniętych do urządzenia jest w stanie w bardzo krótkim czasie wyznaczyć jego charakterystyki częstotliwościowe bez konieczności dokonywania czasochłonnych pomiarów mostkiem LCR. Metodę tę wykorzystałem do określenia własności udarowych transformatora trójfazowego SN/nn [[D28](#)]. Najważniejsze osiągnięcia z punktu widzenia ochrony odgromowej i przepięciowej to: przeprowadzenie analizy rozptyłu prądu głównego udaru piorunowego w zakresie do kilku kiloamperów [[D15](#),[D17](#)], analiza rozptyłu prądu długotrwałego w instalacji budynku

mieszkalnego oraz połączonych systemach dokonana po raz pierwszy na świecie [D13,D38,D32], badania rozptyłu prądu piorunowego dla obiektu usytuowanego na gruncie o rezystywności rzędu 100-200 Ω m, znacznie częściej występującej w praktyce [L32-L33], uwidocznienie i potwierdzenie impedancyjnego charakteru poszczególnych elementów instalacji LPS, przyłącza energetycznego oraz instalacji budynku udokumentowane zmianą kształtów fali prądowych w poszczególnych elementach instalacji, kompleksowe modelowanie systemu instalacji odgromowej oraz elektrycznej budynku odzwierciedlające zarejestrowany rozptył prądu piorunowego [D10,D34], uwzględnienie w analizie wielowarstwowej struktury geoelektrycznej gruntu oraz parametrów impedancyjnych systemu uziemienia, weryfikacja eksperymentalna możliwości zastosowania przeskalowanego modelu instalacji elektrycznej budynku do modelowania zachowania instalacji obiektu w skali rzeczywistej [D19,D39], zastosowanie i oprogramowanie cyfrowych łączy światłowodowych eliminujących wpływ zakłóceń na czole uderów prądowych.

4.3.5. Badania z wykorzystaniem generatorów prądów piorunowych indukowanych w układach awioniki

Ten zakres mojej działalności naukowej to przede wszystkim wykorzystanie zestawu generatorów piorunowych prądów indukowanych do badań w wielu różnorodnych obszarach elektrotechniki i elektroniki [D21,D41] (Rys. 32).



Rysunek 32. Badania z wykorzystaniem generatorów prądów piorunowych indukowanych: (a) badania impedancji wysokoczęstotliwościowych i uderowych transformatora [D28]; (b) badanie rozptyłu prądu piorunowego w instalacji budynku [D39]; (c) kalibracja laboratoryjna anten piorunowego pola elektrycznego [D20,D37,D42-D43]; (d) badanie układu zasilacza w kontekście odporności na prądów indukowane [D9]

Pierwszym obszarem badawczym było modelowanie transformatora trójfazowego SN/nn w zakresie 10 Hz do 20 MHz, gdzie generator pojedynczego uderu głównego MIG0618SS EMC Partner został wykorzystany przeze mnie do rejestracji wymuszenia napięciowego oraz

odpowiedzi prądowej transformatora. Na bazie tych sygnałów opracowałem metodę szybkiego wyznaczania impedancji uzwojeń oraz transmitancji transformatora [D28]. Kolejnym zastosowaniem były wspomniane badania laboratoryjne dotyczące analizy rozpręgu prądu piorunowego w instalacji domu mieszkalnego przeskalowanego pięciokrotnie w stosunku do obiektu rzeczywistego [D39]. Następnym obszarem badań była kalibracja anten piorunowego pola elektrycznego z wykorzystaniem generatora arbitralnego i dedykowanego wzmacniacza 300 W firmy Teseq, co umożliwiło określenie, w jakim stopniu docelowa lokalizacja i otoczenie anteny wpływa na wzmocnienie odbieranego przez nią sygnału [D20,D37,D42-D43]. Układ pomiarowy został opracowany z funduszy pozyskanych przez wnioskodawcę. Przetestowałem również zasilacz komputerowy klasy ATX w kontekście odporności na różne typy przepięć indukowanych od wyładowań atmosferycznych [D9]. Mój udział w wymienionych typach badań polegał głównie na opracowaniu układu pomiarowego, przeprowadzeniu testów laboratoryjnych (około 50%), w artykułach [D20,D28,D37,D42-D43] odpowiadałem również w znaczący sposób za modelowanie i analizę danych, jak również opracowanie treści publikacji, natomiast w artykułach [D9,D21,D39,D41] miałem głównie wkład w merytoryczną interpretację otrzymanych wyników.

4.4. Literatura pomocnicza dokumentująca aktualny stan wiedzy

- [L1] Rakov, V. A., & Uman, M. A. (2003). *Lightning: Physics and Effects*, Cambridge Univ. Cambridge Univ. Press. <https://doi.org/10.1017/cbo9781107340886>
- [L2] Cooray, V. (2015). *An introduction to lightning*. Springer Netherlands. <https://doi.org/10.1007/978-94-017-8938-7>
- [L3] Mazur, V. (2016). *Principles of lightning physics*. IOP Publishing. <https://doi.org/10.1088/978-0-7503-1152-6>
- [L4] Hoole, P., & Hoole, S. (2022). *Lightning Engineering: Physics, Computer-based Test-bed, Protection of Ground and Airborne Systems*. Springer Nature. <https://doi.org/10.1007/978-3-030-94728-6>
- [L5] Masłowski, G. (2010). *Analiza i modelowanie wyładowań atmosferycznych na potrzeby ochrony przed przepięciami*. Wydawnictwa AGH.
- [L6] Rakov, V. A. (2013). The physics of lightning. *Surveys in Geophysics*, 34(6), 701–729. <https://doi.org/10.1007/s10712-013-9230-6>
- [L7] Rakov, V. A., Borghetti, A., Bouquegneau, C., Chisholm, W. A., Cooray, V., Cummins, K., Diendorfer, G., Heidler, F., Hussein, A., Ishii, M., Nucci, C. A., Piantini, A., Pinto, O., Qie, X., Rachidi, F., Saba, M. M. F., Shindo, T., Schulz, W., Thottappillil, R., ... Zischank, W. (2013). *CIGRE technical brochure on lightning parameters for engineering applications*. 2013 International Symposium on Lightning Protection (XII SIPDA). <https://doi.org/10.1109/sipda.2013.6729246>
- [L8] MacGorman, D. R., Rust, W. D., & Williams, E. R. (1999). the electrical nature of storms. *Physics Today*, 52(5), 68–70. <https://doi.org/10.1063/1.882670>
- [L9] Betz, H. D., Schumann, U., & Laroche, P. (Eds.). (2009). *Lightning: Principles, instruments and applications: Review of modern lightning research*. Springer Netherlands. <https://doi.org/10.1007/978-1-4020-9079-0>
- [L10] Rakov, V. A. (2013a). Electromagnetic methods of lightning detection. *Surveys in Geophysics*, 34(6), 731–753. <https://doi.org/10.1007/s10712-013-9251-1>

- [L11] Murphy, M. J., Cramer, J. A., & Said, R. K. (2021). Recent history of upgrades to the US National Lightning Detection Network. *Journal of Atmospheric and Oceanic Technology*, 38(3), 573–585. <https://doi.org/10.1175/jtech-d-19-0215.1>
- [L12] Fofana, I., Ben Rhouma, A., Bérroual, A., & Auriol, P. (1998). Modelling a positive lightning downward leader to study its effects on engineering systems. *IEE Proceedings - Generation Transmission and Distribution*, 145(4), 395. <https://doi.org/10.1049/ip-gtd:19982031>
- [L13] Murphy, M. J., & Said, R. K. (2020). Comparisons of lightning rates and properties from the US National Lightning Detection Network (NLDN) and GLD360 with GOES-16 Geostationary Lightning Mapper and Advanced Baseline Imager data. *J. Geophys. Res. Atmos.*, 125(5). <https://doi.org/10.1029/2019jd031172>
- [L14] Fairman, S. I., & Bitzer, P. M. (2022). The detection of continuing current in lightning using the geostationary lightning mapper. *Journal of Geophysical Research Atmospheres*, 127(5). <https://doi.org/10.1029/2020jd033451>
- [L15] Zhang, Z. (2000). A flexible new technique for camera calibration. *IEEE Transactions on Pattern Analysis and Machine Intelligence*, 22(11), 1330–1334. <https://doi.org/10.1109/34.888718>
- [L16] Scaramuzza, D., Martinelli, A., & Siegwart, R. (2006). A toolbox for easily calibrating omnidirectional cameras. 2006 IEEE/RSJ International Conference on Intelligent Robots and Systems. <https://doi.org/10.1109/iroso.2006.282372>
- [L17] Willett, J. C., Bailey, J. C., Lêteinturier, C., & Krider, E. P. (1990). Lightning electromagnetic radiation field spectra in the interval from 0.2 to 20 MHz. *Journal of Geophysical Research*, 95(D12), 20367–20387. <https://doi.org/10.1029/jd095id12p20367>
- [L18] Sharma, S. R., Ismail, M. M., Hittiarachhi, P., Cooray, V., & Miranda, F. J. (2021). Frequency spectra of various events pertinent to lightning cloud flashes obtained from wavelet transform technique and ratified by narrow band measurement technique. *Journal of Atmospheric and Solar-Terrestrial Physics*, 220(105664), 105664. <https://doi.org/10.1016/j.jastp.2021.105664>
- [L19] Baharin, S. A. S., Ahmad, M. R., Periannan, D., Sabri, M. H. M., Seah, B. Y., Aziz, M. Z. A. A., Ismail, M. M., Esa, M. R. M., Mohammad, S. A., Abdul-Malek, Z., Yusop, N., Cooray, V., & Lu, G. (2018). Wavelet analysis of the onset of VHF and microwave radiation emitted by lightning. 2018 International Conference on Electrical Engineering and Computer Science (ICECOS). <https://doi.org/10.1109/icecos.2018.8605191>
- [L20] Peng, C., Liu, F., Zhu, B., & Wang, W. (2019). A convolutional neural network for classification of lightning LF/VLF waveform. 2019 11th Asia-Pacific International Conference on Lightning (APL). <https://doi.org/10.1109/apl.2019.8815977>
- [L21] Wang, J., Huang, Q., Ma, Q., Chang, S., He, J., Wang, H., Zhou, X., Xiao, F., & Gao, C. (2020). Classification of VLF/LF lightning signals using sensors and deep learning methods. *Sensors (Basel, Switzerland)*, 20(4), 1030. <https://doi.org/10.3390/s20041030>
- [L22] Zhu, Y., Bitzer, P., Rakov, V., & Ding, Z. (2021). A machine-learning approach to classify cloud-to-ground and intracloud lightning. *Geophysical Research Letters*, 48(1). <https://doi.org/10.1029/2020gl091148>
- [L23] Betz, Hans D., & Meneux, B. (2014). LINET systems - 10 years experience. 2014 International Conference on Lightning Protection (ICLP). <https://doi.org/10.1109/iclp.2014.6973377>
- [L24] Mazur, V., Ruhnke, L. H., Warner, T. A., & Orville, R. E. (2013). Recoil leader formation and development. *Journal of Electrostatics*, 71(4), 763–768. <https://doi.org/10.1016/j.elstat.2013.05.001>
- [L25] Mazur, V. (2016b). The physical concept of recoil leader formation. *Journal of Electrostatics*, 82, 79–87. <https://doi.org/10.1016/j.elstat.2016.05.005>

- [L26] Leal, A. F. R., Rakov, V. A., & Rocha, B. R. P. (2019). Compact intracloud discharges: New classification of field waveforms and identification by lightning locating systems. *Electric Power Systems Research*, 173, 251–262. <https://doi.org/10.1016/j.epsr.2019.04.016>
- [L27] Eack, K. B. (2004). Electrical characteristics of narrow bipolar events. *Geophysical Research Letters*, 31(20). <https://doi.org/10.1029/2004gl021117>
- [L28] Karunarathne, S., Marshall, T. C., Stolzenburg, M., & Karunarathna, N. (2016). Electrostatic field changes and durations of narrow bipolar events: ELECTROSTATIC FIELD CHANGES OF NBES. *Journal of Geophysical Research Atmospheres*, 121(17), 10,161-10,174. <https://doi.org/10.1002/2016jd024789>
- [L29] Szatkowski, G. N., Dudley, K. L., Koppen, S. V., Ely, J. J., Nguyen, T. X., Ticatch, L. A., & McNeill. (2013). Common practice lightning strike protection characterization technique to quantify damage mechanisms on composite substrates. In 2013 International Conference on Lightning and Static Electricity.
- [L30] Astm, D. (2007). Standard Test Methods for DC Resistance or Conductance of Insulating Materials. ASTM: West. <https://doi.org/10.1520/d0257>
- [L31] Pu, Y., & Cummer, S. A. (2019). Needles and lightning leader dynamics imaged with 100–200 MHz broadband VHF interferometry. *Geophysical Research Letters*, 46(22), 13556–13563. <https://doi.org/10.1029/2019gl085635>
- [L32] DeCarlo, B. A., Rakov, V. A., Jerauld, J. E., Schnetzer, G. H., Schoene, J., Uman, M. A., Rambo, K. J., Kodali, V., Jordan, D. M., Maxwell, G., Humeniuk, S., & Morgan, M. (2008). Distribution of currents in the lightning protective system of a residential building—part I: Triggered-lightning experiments. *IEEE Transactions on Power Delivery*, 23(4), 2439–2446. <https://doi.org/10.1109/tpwrd.2008.917894>
- [L33] Li, L., & Rakov, V. A. (2008). Distribution of currents in the lightning protective system of a residential building—part II: Numerical modeling. *IEEE Transactions on Power Delivery*, 23(4), 2447–2455. <https://doi.org/10.1109/tpwrd.2008.923075>

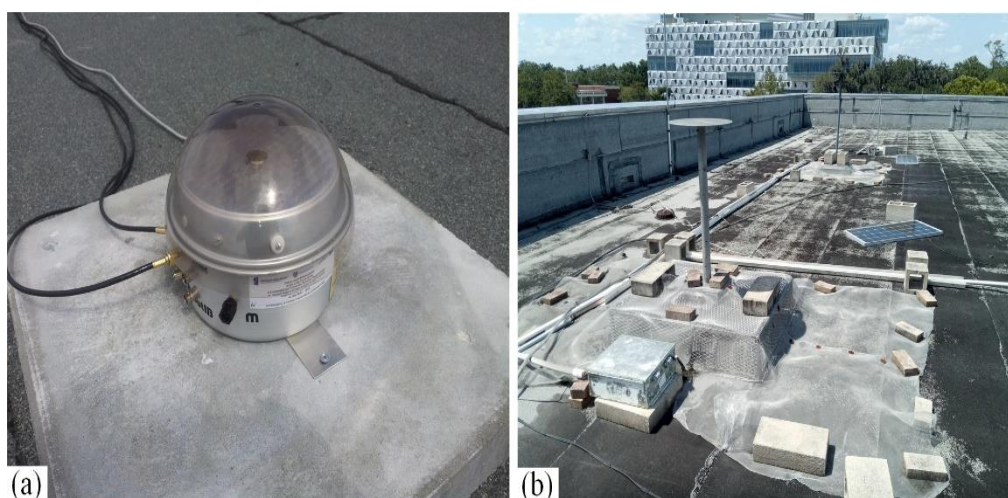
5. Informacja o wykazywaniu się istotną aktywnością naukową albo artystyczną realizowaną w więcej niż jednej uczelni, instytucji naukowej lub instytucji kultury, w szczególności zagranicznej.

Moja główna aktywność naukowa jest związana z działalnością w ramach 14-letniego okresu zatrudnienia na Politechnice Rzeszowskiej im. Ignacego Łukasiewicza. Została ona w sposób szczegółowy omówiona w sekcjach [4.2](#) oraz [4.3](#). Ponadto przebieg mojej dotychczasowej kariery naukowej został przedstawiony w opinii Kierownika Katedry Elektrotechniki i Podstaw Informatyki dołączonej w początkowej części [Załącznika nr 9](#). Aktywność naukowa realizowana na innych uczelniach oraz instytucjach naukowych, w tym zagranicznych, została opisana w sekcjach od [5.1](#) do [5.6](#) autoreferatu.

5.1. Współpraca naukowa z International Center for Lightning Research and Testing (ICLRT) należącym do University of Florida

Współpraca naukowa z ośrodkiem *International Center for Lightning Research and Testing (ICLRT) na Florydzie* rozpoczęła się już na samym początku mojej kariery naukowej podczas realizacji grantu badawczego NCN (nr 3138/B/T02/2011/40): „*Badania poligonowe narażeni urządzeń elektrycznych i elektronicznych na zaburzenia impulsowe dużej mocy*”. Obecnie ten ośrodek Uniwersytetu Florydzkiego, zarządzany od wielu lat przez prof. V.A. Rakova, jest uważany za największe na świecie centrum badań wyładowań atmosferycznych. W wyniku współpracy, w Hucie Poręby położonej około 80 km na południe od Rzeszowa,

powstał poligon badawczy na wzór poligonu w Camp Blanding, Floryda, USA. W ramach wspólnych badań uczestniczyłem w analizach rozptyłu prądu piorunowego w instalacji budynku mieszkalnego i połączonych instalacjach (sekcja 4.3.4). Ta współpraca zaowocowała wspólną publikacją w *IEEE Transactions on Electromagnetic Compatibility* [D15]. Kolejny aspekt kooperacji z ICRLT obejmuje badanie piorunowego impulsu elektromagnetycznego oraz wzajemne działania na rzecz optymalizacji systemów lokalizacji wyładowań atmosferycznych. Obecnie w Rzeszowie oraz na Florydzie w Gainesville funkcjonują dwie podobne stacje rejestracji wyładowań atmosferycznych (Rys. 33). Stacja w Rzeszowie posiada zbliżoną funkcjonalność pomiarową, jak stacja w Gainesville, przy czym idea jej działania oraz wiele rozwiązań technicznych istotnie różni się od stacji na Florydzie (sekcja 4.3.1). W ramach tego obszaru współpracy w 2023 r. odbyłem 3 tygodniowy staż naukowy, który pozwolił na zacieśnienie dotychczasowej kooperacji pomiędzy jednostkami naukowymi z Rzeszowa i Gainesville.

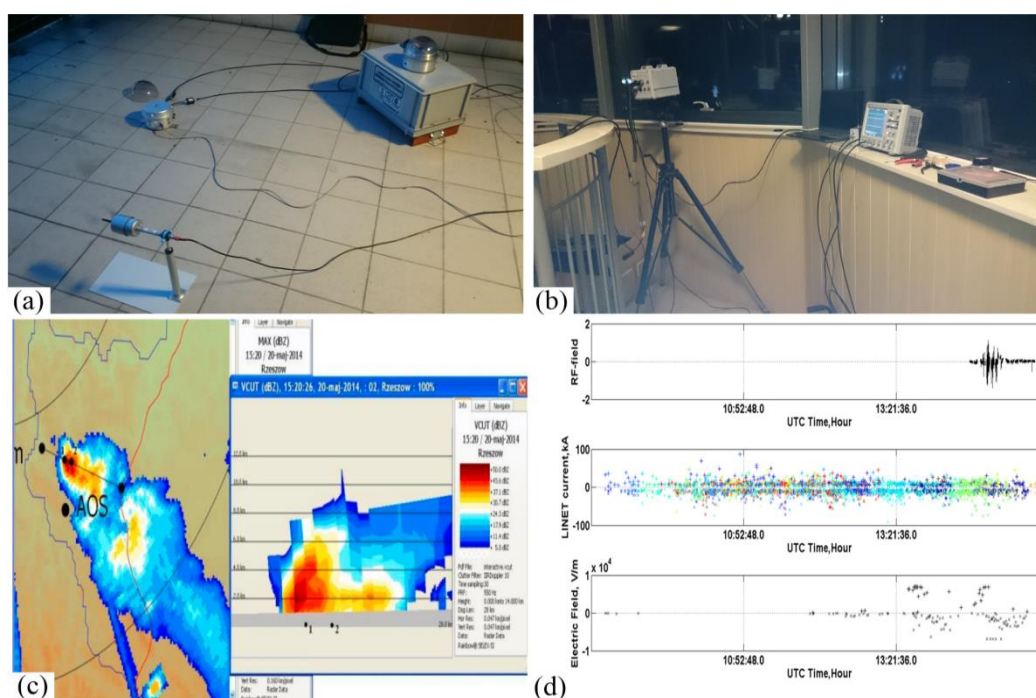


Rysunek 33. Sensory piorunowego pola elektrycznego wykorzystywane na stacjach badawczych w Rzeszowie (a) oraz Gainesville (b).

Podczas pobytu na Florydzie wygłosiłem również dwa wykłady na temat własnych działań badawczych prowadzonych na PRz. Bezpośrednim celem naukowym stażu była wspólna analiza rejestracji piorunowego pola elektrycznego oraz procesu rozwoju kanału piorunowego na rzecz rozwoju stanu wiedzy w tym zakresie. Pracowałem również nad analizą wyładowań atmosferycznych typu kompaktowego w chmurze burzowej (CID). Współpraca zaowocowała publikacją w *IEEE Transactions on Electromagnetic Compatibility* [A6] oraz niedawno wspólną publikacją w *Electric Power Systems Research* [A9]. W artykule [A9] wykorzystałem również dane udostępnione przez zespół badawczy z *University of Mississippi*. Aktualnie, w związku z instalacją systemu pomiaru prądu piorunowego na najwyższym wieżowcu mieszkalnym w Polsce zlokalizowanym na osiedlu „Olszynki Park” w Rzeszowie (sekcja 4.3.2), planowane jest dalsze zacieśnienie współpracy z ICRLT, m.in. związane z modelowaniem i ulepszaniem algorytmów LLS w zakresie obliczania prądu w kanale piorunowym oraz funkcji tłumienia fali prądowej. Są to istotne zagadnienia z punktu widzenia modelowania piorunowego impulsu elektromagnetycznego i związanych z tym efektów indukowanych w instalacjach i systemach elektrycznych.

5.2. Współpraca naukowa z Instytutem Geofizyki Polskiej Akademii Nauk

Współpraca naukowa z *Instytutem Geofizyki Polskiej Akademii Nauk (IGF PAN)* jest najbardziej aktywnym obszarem współpracy z innymi jednostkami badawczymi. Trwa ona niemal od początku mojej kariery naukowej (2012 r.). W początkowym okresie obejmowała ona kilka kilkudniowych wizyt mających na celu zapoznanie z metodami rejestracji piorunowego pola elektromagnetycznego i wdrożenie Stacji Rejestracji Wyładowań Atmosferycznych w Rzeszowie [D6,D14,D33]. IGF PAN wspólnie z PRz oraz Politechniką Warszawską (PW) opracowali dwa sensory piorunowego pola elektrycznego, które wykorzystują na stacji PRz [D45]. Weryfikacja pracy obu systemów odbyła się w ramach wspólnej tygodniowej sesji pomiarowej zorganizowanej w Bezmiechowej Górnej, w której uczestniczyłem wspólnie z zespołami badawczymi z IGF oraz PW [D12,D18,D35] (Rys. 34).



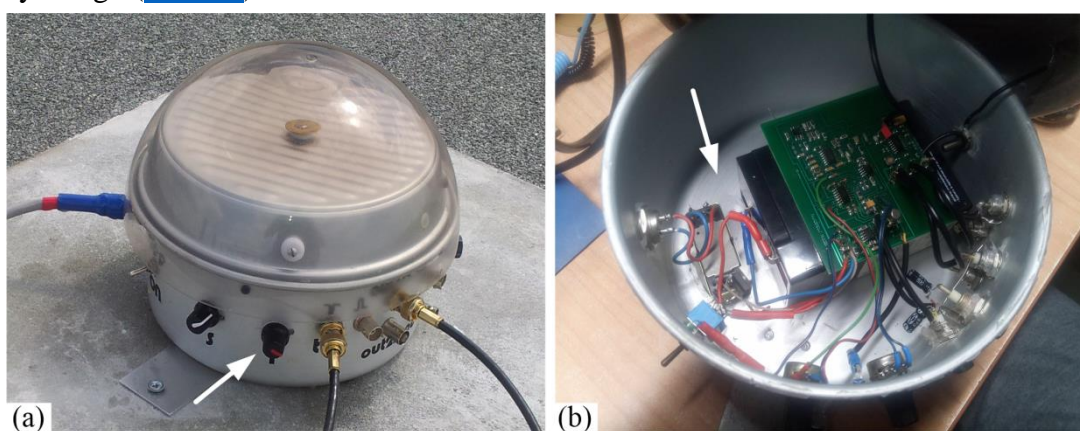
Rysunek 34. Wspólna wyjazdowa sesja badawcza z IGF PAN oraz PW w Bezmiechowej Górnej, Bieszczady: (a) praca sensorów piorunowego pola elektrycznego PRz oraz IGF PAN w warunkach burzowych; (b) rejestracja procesu rozwoju kanału piorunowego z wykorzystaniem szybkiej kamery PRz; (c) analiza danych radarowych – PW; (d) porównanie efektywności systemów rejestracji z danymi systemu lokalizacji wyładowań atmosferycznych LINET [D12,D18,D35]

Wizyty i konsultacje w IGF PAN miały również charakter merytoryczny, związany z dogłębnym poznaniem fizyki wyładowań atmosferycznych i procesów zachodzących w chmurze burzowej. Z czasem, w ramach pozyskiwania przeze mnie coraz większej bazy danych rejestracji piorunowego pola elektrycznego, kooperacja zaczęła przybierać charakter obopólnej współpracy naukowej. Główne obszary współpracy to: analiza zjawisk: wielokrotnych wyładowań atmosferycznych doziemnych [D47], zjawisk wyładowań wstępnych w chmurze burzowej [D25,D48,A4], wyładowań wewnątrzchmurowych [D40], modelowania fazy lidera ujemnego [D46,A1] oraz lidera dodatniego [A3], czy składowej prądu długotrwałego [D49]. Aktualnie współpraca jest kontynuowana w obszarze rejestracji kolejnych efektów wyładowań atmosferycznych w chmurze burzowej tzw. Sprite'ów. Dalsze plany kooperacji to wspólna analiza zjawisk wyładowań wstępnych w chmurze burzowej na podstawie baz danych z Rzeszowa i Warszawy. W konsorcjum PRz i IGF PAN został złożony wniosek NCN (rejestracja 16.12.2024 r.) nr 2024/55/B/ST10/00841 projektu OPUS 28 pt.

„Badanie prekursorów doziemnych wyładowań piorunowych na podstawie sygnatur pola elektrycznego zarejestrowanych na stacjach obserwacji wyładowań atmosferycznych w Rzeszowie i Warszawie (BOLT)”, w którym zostałem wskazany w roli kierownika projektu.

5.3. Współpraca naukowa z Instytutem Systemów Elektronicznych Politechniki Warszawskiej

Moja współpraca naukowa z *Instytutem Systemów Elektronicznych Politechniki Warszawskiej* jest prowadzona od wielu lat (2011 r.). W ramach współpracy odbyłem kilka wizyt w siedzibie Instytutu, mających na celu optymalizację konstrukcji anten szybkozmiennego piorunowego pola elektrycznego wykorzystywanych w Systemie Rejestracji Wyładowań Atmosferycznych w Rzeszowie. W tym kontekście zaproponowałem zmiany funkcjonalności układu wyzwiania rejestracji, weryfikacji pasma anteny, jak również optymalizacji interfejsu komunikacyjnego anten wolnozmiennego piorunowego pola elektrycznego ([Rys. 35](#)).

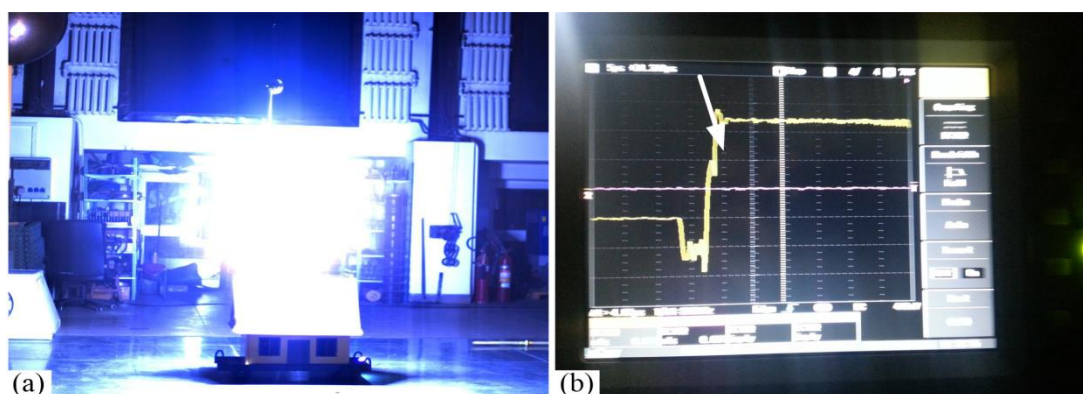


Rysunek 35. Współpraca z PW w obszarze optymalizacji konstrukcji anteny szybkozmiennego piorunowego pola elektrycznego: (a) dostosowanie układu wyzwacza rejestracji do koncepcji Systemu Rejestracji Wyładowań Atmosferycznych; (b) modyfikacja układu zasilania anteny w celu wydłużenia okresu eksploatacji akumulatorów oraz redukcji szumu [[D6](#)]

W ostatnim czasie, na skutek wieloletniej eksploatacji anten w trudnych warunkach atmosferycznych, zgodnie z moimi sugestiami, dokonano również modyfikacji sprzętowej układu zasilania. Efektem współpracy naukowej jest publikacja [[D6](#)].

5.4. Współpraca naukowa Instytutem Elektrotechniki Teoretycznej i Systemów Informacyjno-Pomiarowych Politechniki Warszawskiej

Moja współpraca naukowa z *Instytutem Elektrotechniki Teoretycznej i Systemów Informacyjno-Pomiarowych Politechniki Warszawskiej* obejmuje głównie aspekty związane z synchronizacją rejestracji piorunowego impulsu elektromagnetycznego oraz obrazu wideo na potrzeby systemów rejestracji wyładowań atmosferycznych. W ramach kilkudniowej wizyty na PW w 2013 r. i zorganizowanej w tamtejszym Laboratorium Wysokich Napięć wspólnej sesji pomiarowej z udziałem PRz, IGF PAN oraz PW, przeprowadziłem kalibrację czasową systemu pomiarowego wyładowań atmosferycznych. W tym celu wykorzystałem rejestrację impulsu elektromagnetycznego z generatora Marxa ([Rys. 36](#)).

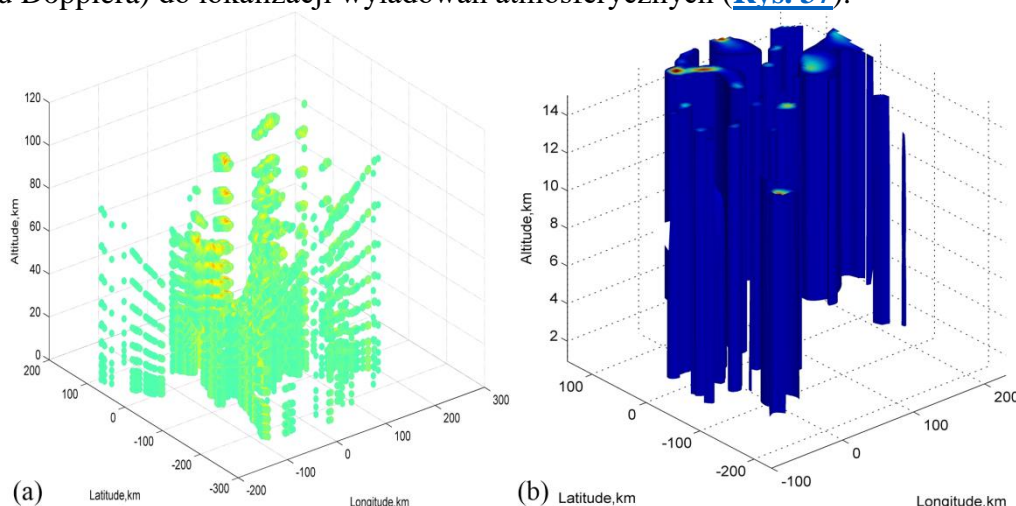


Rysunek 36. Badania dotyczące synchronizacji anten piorunowego pola elektrycznego oraz szybkiej kamery wideo podczas wizyty w Laboratorium Wysokich Napięć PW: (a) impuls z wysokonapięciowego generatora Marxa zarejestrowany szybką kamerą wideo; (b) impuls elektromagnetyczny zarejestrowany anteną pola elektrycznego [D16]

Kolejna wyjazdowa sesja pomiarowa zorganizowana w Bezmiechowej Górnej w rejonie Bieszczad (sekcja. 5.2) miała na celu weryfikację wyników badań laboratoryjnych w warunkach burzowych, co zostało udokumentowane kilkoma wspólnymi publikacjami [D12,D35].

5.5. Współpraca naukowa z Instytutem Meteorologii i Gospodarki Wodnej – Państwowy Instytut Badawczy

Moja współpraca naukowa z *Instytutem Meteorologii i Gospodarki Wodnej – Państwowy Instytut Badawczy (IMGW-PIB)* obejmuje głównie obszar analizy i poprawy efektywności współczesnych systemów lokalizacji wyładowań atmosferycznych, zwłaszcza systemu PERUN, którego operatorem jest IMGW-PIB. Istotnym obszarem kooperacji jest analiza efektywności wykrywania prekursorów wyładowań atmosferycznych (PB) w chmurze burzowej, jak również możliwość zastosowania techniki radarowej (danych wolumetrycznych z radaru Dopplera) do lokalizacji wyładowań atmosferycznych (Rys. 37).

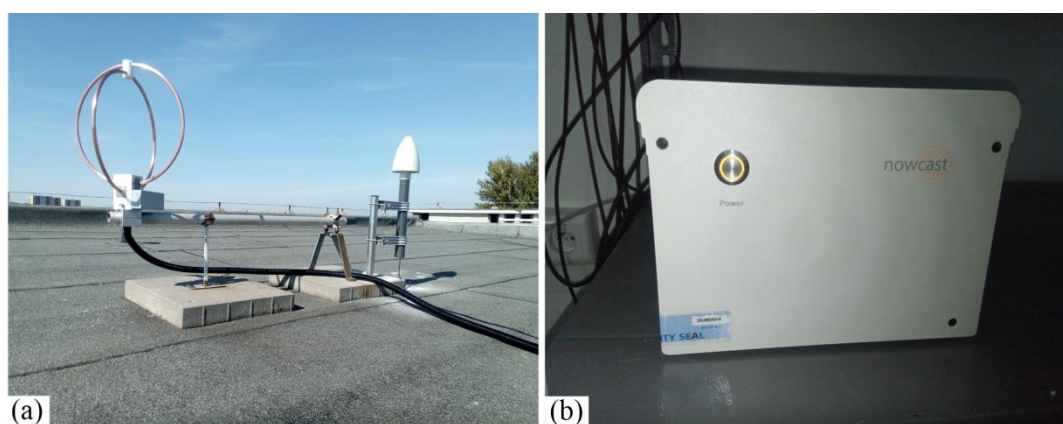


Rysunek 37. Analiza danych radarowych prowadzona we współpracy z IMGW-PIB: (a) nieprzetworzone dane wolumetryczne otrzymane od IMGW-PIB; (b) widok rdzeni opadowych dla odbiciowości granicznej 60 dBZ uzyskany z wykorzystaniem aplikacji opracowanej w Matlabie dla danych z panelu (a). Dane z radaru Dopplera zlokalizowanego w Jasionce, Rzeszów na podstawie skanu z dnia 2014.05.17 12:20:25.00 (czas UTC)

We współpracy z IMGW-PIB opracowałem m.in. niezależną aplikację Matlaba umożliwiającą zaawansowaną analizę danych z radaru Dopplera w przestrzeni trójwymiarowej. Efektem dotychczasowej współpracy jest wspólna publikacja [[A4](#)].

5.6. Współpraca z operatorem międzynarodowego systemu lokalizacji wyładowań atmosferycznych LINET (nowcast GmbH, Monachium, Niemcy)

Współpraca z operatorem komercyjnym międzynarodowego systemu lokalizacji wyładowań atmosferycznych LINET miała przez wiele lat charakter kooperacji z jednostką naukową, gdyż system ten, stworzony przez prof. H.D. Betza – znaną osobistość w obszarze systemów lokalizacji wyładowań atmosferycznych, był przez wiele lat (również w czasie mojego zatrudnienia na PRz) zarządzany przez *Uniwersytet w Monachium*. Moja działalność w tym obszarze, na mocy aktualnie obowiązującej umowy o współpracy, polega głównie na obsłudze sprzętowej i pomocy w modernizacji jednej z anten systemu zainstalowanej na PRz ([Rys. 38](#)).



Rysunek 38. Międzynarodowy system lokalizacji wyładowań atmosferycznych LINET: (a) antena piorunowego pola magnetycznego; (b) jednostka kontrolna systemu w Laboratorium Rejestracji Wyładowań Atmosferycznych PRz

Dzięki temu zyskałem dostęp do najnowszych rozwiązań technologicznych w tym zakresie, jak również do danych systemu LINET, które zostały wielokrotnie wykorzystane w moich publikacjach, m.in. do oceny efektywności pracy i dokładności synchronizacji Systemu Rejestracji Wyładowań Atmosferycznych PRz, walidacji opracowanych modeli matematycznych zjawisk piorunowych oraz weryfikacji analizowanych incydentów burzowych m.in. [[D18](#),[D24](#),[D33](#),[D43](#),[A1-A9](#)].

6. Informacja o osiągnięciach dydaktycznych, organizacyjnych oraz popularyzujących naukę lub sztukę.

6.1. Osiągnięcia dydaktyczne

Posiadam 9-letnie doświadczenie, jako wykładowca akademicki. Prowadziłem i aktualnie prowadzę wszystkie rodzaje zajęć dydaktycznych tj. wykłady, ćwiczenia tablicowe, zajęcia zjawiskowe w laboratorium oraz projekty, które były realizowane na studiach stacjonarnych, niestacjonarnych pierwszego i drugiego stopnia na Politechnice Rzeszowskiej. W ramach działalności dydaktycznej prowadzę również regularnie zajęcia w języku angielskim realizowane na kierunku Elektrotechnika oraz Energetyka w ramach wymiany międzynarodowej ERASMUS. Poniżej w sposób syntetyczny przedstawiłem swoje główne osiągnięcia dydaktyczne:

1. **Kierownik, opiekun oraz prowadzący zajęcia w Laboratorium Elektrotechniki Katedry Elektrotechniki i Podstaw Informatyki.** W laboratorium realizowane są m.in. zajęcia z zakresu: Teorii Obwodów I-III, Elektrotechniki, Kompatybilności Elektromagnetycznej Systemów Teleinformatycznych, Ochrony Przepięciowej Systemów Elektronicznych, Układów Impulsowych Wielkich Mocy. Pełniona funkcja koordynatora od roku 2016 do chwili obecnej.

2. **Twórca od podstaw laboratorium dla modułów dydaktycznych związanych z kompatybilnością elektromagnetyczną.** Laboratorium obejmuje ćwiczenia praktyczne z zakresu: sprzężeń pojemnościowych, sprzężeń indukcyjnych, analizy własności zaburzeń elektromagnetycznych o różnorodnym charakterze, zaburzeń przewodzonych w systemach elektrycznych o różnym charakterze impedancji. Łącznie 6 ćwiczeń (15 godz.). Wszystkie ćwiczenia posiadają również **zdalne wersje** z możliwością realizacji w programie LTSpice, co zostało w całości opracowane przeze mnie. Aktywność od roku 2018 do chwili obecnej.

3. **Twórca nowych wersji ćwiczeń z modułów dydaktycznych Teorii Obwodów I oraz II, jak również wersji zdalnych w programie LTSpice.** Modernizacja instrukcji oraz szablonów sprawozdań do ćwiczeń. Łącznie 12 ćwiczeń laboratoryjnych (30 godz.). Materiały dostępne za pośrednictwem strony internetowej KEiPI. Aktywność od roku 2016 do chwili obecnej.

4. **Promotor 13 prac dyplomowych oraz projektów inżynierskich** (od 2019 r. do chwili obecnej) Tematyka obejmuje głównie zagadnienia o charakterze praktycznym:

- Analiza wysokoczęstotliwościowa transformatora
- Analiza transformatora trójfazowego
- Wyzwalacz rejestracji zjawisk piorunowych
- Antena do rejestracji piorunowego pola elektrycznego
- Aplikacja do automatycznej identyfikacji tekstu z kamery wideo
- Analiza obrazu z wykorzystaniem szybkiej kamery wideo
- Stanowisko laboratoryjne do badania stanów nieustalonych układów pierwszego rzędu
- Stanowisko laboratoryjne do badania stanów nieustalonych układów drugiego rzędu
- Stanowisko laboratoryjne do badania czwórników
- Stanowisko laboratoryjne do badania stanów nieustalonych
- Aplikacja do analizy oraz wizualizacji pracy trójfazowego systemu elektroenergetycznego
- Optyczny system dookólnej rejestracji zjawisk piorunowych
- Stanowisko pomiarowe do badania układów trójfazowych symetrycznych
- Stanowisko pomiarowe do badania układów trójfazowych połączonych w trójkąt

5. **Recenzent 21 prac dyplomowych** na kierunkach Elektrotechnika, Automatyka i Robotyka od 2020 ro do chwili obecnej.

6. **Prowadzący zajęcia w języku angielskim w ramach programu ERASMUS** (od 2019 r. do chwili obecnej) z modułów zajęć:

- Overvoltage Protection of Electrical and Electronic Equipment
- Pulsed Power Systems

- Circuit Theory I
- Circuit Theory II

Łącznie **96** godz. zajęciowych.

7. Prowadzący zajęcia w języku polskim na Politechnice Rzeszowskiej (od 2016 r. do chwili obecnej). Zajęcia prowadzone na kierunkach: Elektrotechnika, Automatyka i Robotyka, Energetyka, Elektromobilność, Informatyka z modułów zajęć:

- Elektrotechnika
- Teoria Obwodów I
- Teoria Obwodów II
- Teoria Obwodów III
- Obwody i Sygnały II
- Kompatybilność Elektromagnetyczna Systemów Teleinformatycznych
- Ochrona Elektromagnetyczna Sieci Teleinformatycznych
- Ochrona Odgromowa i Przepięciowa
- Ochrona Przepięciowa Systemów Elektronicznych
- Układy Impulsowe Wielkich Mocy
- Współczesne Problemy Energetyki Jądrowej
- Technologie Informacyjne
- Projekt Inżynierski
- Wykład Monograficzny

Łącznie **2907** godz. zajęciowych (323 godz/r.ak).

8. Opiekun naukowy w ramach wymiany międzynarodowej studentów. Wygłoszenie serii wykładów z zakresu fizyki wyładowania atmosferycznego, ochrony odgromowej oraz Matlab dla studenta z Brazylii (od 10.10.2016 r. – 10.12. 2016 r.)

6.2. Osiągnięcia organizacyjne

Biorę aktywny udział w różnych działaniach organizacyjnych, w szczególności w zakresie koordynowania i opieki nad laboratoriami funkcjonującymi w KEiPI, organizowaniu seminariów, konferencji krajowych i międzynarodowych oraz zadań biurowych związanych z pozyskaniem, administracją oraz wydatkowaniem środków finansowych przeznaczonych na rozwój laboratoriów PRz.

6.2.1. Organizacja konferencji i seminariów

1. Udział w Komitecie organizacyjnym posiedzenia plenarnego Międzynarodowego Komitetu Normalizacyjnego IEC, opracowanie materiałów promocyjnych, obsługa techniczna rejestracji uczestników oraz sesji naukowych (24-28.10.2016 r.).

2. Udział w Komitecie organizacyjnym międzynarodowej konferencji naukowej International Conference on Lightning Protection, Rzeszów, 2018, opracowanie merytorycznej zawartości strony internetowej konferencji, materiały reklamowe, rejestracja uczestników, obsługa techniczna sesji naukowych, recenzowanie artykułów konferencyjnych. (02-07.09.2018 r.)

3. **Udział w Komitecie Organizacyjnym trzech edycji konferencji naukowej:** Wybrane Zagadnienia Elektrotechniki, obsługa techniczna rejestracji uczestników oraz sesji naukowych (27-30.09.2013 r., 04-05.09.2016 r. oraz 13-15.09.2021 r.).

4. **Udział w Komitecie Organizacyjnym seminarium naukowego** organizowanego przez firmę ASTAT, PRz, EMC Society Polish Chapter oraz IEEE pt. „Testy, pomiary elektryczne i EMC w przemyśle lotniczym i wojskowym w oparciu o normy DO-160 i MIL-STD-461G”, obsługa techniczna i rejestracja uczestników (04-06.04.2017 r.).

6.2.2. Działania organizacyjne w grantach badawczych

1. **Udział w grantie NCN Nr 3138/B/T02/2011/40** pt. „Badania poligonowe narażeń urządzeń elektrycznych i elektronicznych na zaburzenia impulsowe dużej mocy” w ramach umowy U-8234/G – **wykonawca grantu**, oprócz działań naukowych opisanych w sekcjach [4](#) oraz [5](#) również zadania organizacyjne związane z opracowaniem dokumentacji, raportowaniem spotkań roboczych, działania logistyczne oraz wsparcie techniczne na poligonie badawczym w Hucie Poręby – m.in. modernizacja łączy światłowodowych, automatyzacja procesu rejestracji (2011-2015 r.).

2. **Udział w grantie Podkarpackiego Centrum Innowacji** pt. „Ognioodporne kompozyty przewodzące stosowane, jako elementy konstrukcyjne statków powietrznych (F3_71)”, umowa nr 19/PRZ/1/DG/PCI/2019, **wykonawca grantu**, oprócz działań naukowych opisanych w sekcjach [4](#) oraz [5](#) również zadania organizacyjne związane z pozyskaniem środków, zarządzaniem budżetem projektu oraz tworzeniem dokumentacji (2019-2020 r.)

3. **Udział w grantie NCN MINIATURA 6** pt. „Badanie oraz ocena efektywności dookólnego układu optycznego na potrzeby szybkiej wideorejestracji wyładowań atmosferycznych”, umowa nr DEC-2022/06/X/ST10/00684, **kierownik i jedyny wykonawca grantu**, oprócz działań naukowych opisanych w sekcjach [4](#) oraz [5](#) również zadania organizacyjne związane z pozyskaniem środków, zarządzaniem budżetem projektu oraz tworzeniem dokumentacji (2022-2024 r.)

4. **Udział w międzynarodowym grantie** pt. „Wind turbine lightning safety evaluation (WISE)” realizowanym w ramach Multilateral Academic Projects (MAPS) ze Szwajcarsko-Polskiego Programu Współpracy, który zgodnie z decyzją z dnia 29.04.2025 r. uzyskał finansowanie i będzie realizowany w latach 2025-2029 we współpracy z naukowcami ze Szwajcarii oraz Chorwacji, członek zespołu badawczego oraz jeden z **wykonawców grantu**. Zadania badawcze związane z testowaniem odporności turbin wiatrowych na bezpośrednie oddziaływanie prądu piorunowego, zaprojektowaniem stanowiska testowego i dedykowanej metody badań, modelowaniem interakcji kanału piorunowego z materiałami kompozytowymi stosowanymi do konstrukcji łopat turbin wiatrowych, poprawą własności elektrycznych oraz fizyko-chemicznych tych materiałów. Zadania organizacyjne związane z sporządzaniem wniosków zakupowych, monitorowaniem procedur zakupowych, dokumentacją projektu.

4. **Realizacja grantu dla młodych naukowców U-8611/DS./M** pt. „Analiza wolnozmiennego oraz szybkozmiennego pola elektrycznego w warunkach burzowych”, **kierownik oraz jedyny wykonawca grantu**, oprócz działań naukowych opisanych w sekcjach [4](#) oraz [5](#) również zadania organizacyjne związane z pozyskaniem środków, zarządzaniem budżetem projektu oraz tworzeniem dokumentacji, (2012-2013 r.).

5. **Realizacja grantu dla młodych naukowców U-202/DS./M** pt. „*Analiza pola elektrycznego z wykorzystaniem anten wdrażanego systemu rejestracji wyladowań piorunowych*”, **kierownik oraz jedyny wykonawca grantu**, oprócz działań naukowych opisanych w sekcjach [4](#) oraz [5](#) również zadania organizacyjne związane z pozyskaniem środków, zarządzaniem budżetem projektu oraz tworzeniem dokumentacji, (2013-2014 r.).

6. **Realizacja grantu dla młodych naukowców U-540/DS./M** pt. „*Analiza oraz optymalizacja systemu rejestracji wyladowań atmosferycznych pod kątem synchronicznej rejestracji pola elektrycznego oraz obrazu wideo*”, **kierownik oraz jedyny wykonawca grantu**, oprócz działań naukowych opisanych w sekcjach [4](#) oraz [5](#) również zadania organizacyjne związane z pozyskaniem środków, zarządzaniem budżetem projektu oraz tworzeniem dokumentacji, (2014-2015 r.).

7. **Realizacja grantu dla młodych naukowców U-655/DS./M** pt. „*Analiza oraz optymalizacja systemu rejestracji wyladowań atmosferycznych pod kątem synchronicznej foto-rejestracji obrazu*”, **kierownik oraz jedyny wykonawca grantu**, oprócz działań naukowych opisanych w sekcjach [4](#) oraz [5](#) również zadania organizacyjne związane z pozyskaniem środków, zarządzaniem budżetem projektu oraz tworzeniem dokumentacji, (2015-2016 r.).

8. **Realizacja grantu dla młodych naukowców U-725/DS./M** pt. „*Wdrożenie mobilnego systemu rejestracji wyladowań atmosferycznych*”, **kierownik oraz jedyny wykonawca grantu**, oprócz działań naukowych opisanych w sekcjach [4](#) oraz [5](#) również zadania organizacyjne związane z pozyskaniem środków, zarządzaniem budżetem projektu oraz tworzeniem dokumentacji, (2016-2017 r.).

9. **Realizacja grantu dla młodych naukowców DS./M.ET.17.001** pt. „*Optymalizacja mobilnego systemu rejestracji wyladowań atmosferycznych*”, **kierownik oraz jedyny wykonawca grantu**, oprócz działań naukowych opisanych w sekcjach [4](#) oraz [5](#) również zadania organizacyjne związane z pozyskaniem środków, zarządzaniem budżetem projektu oraz tworzeniem dokumentacji, (2017-2018 r.).

10. **Realizacja grantu dla młodych naukowców DS./M.ET.18.003** pt. „*Rozszerzenie funkcjonalności systemu rejestracji wyladowań atmosferycznych związane z dodaniem pomiaru pola magnetycznego*”, **kierownik oraz jedyny wykonawca grantu**, oprócz działań naukowych opisanych w sekcjach [4](#) oraz [5](#) również zadania organizacyjne związane z pozyskaniem środków, zarządzaniem budżetem projektu oraz tworzeniem dokumentacji, (2018-2019 r.).

6.2.3. Działania organizacyjne w Katedrze Elektrotechniki i Podstaw Informatyki oraz na Politechnice Rzeszowskiej

1. **Wdrożenie oraz uruchomienie Laboratorium Rejestracji Wyladowań Atmosferycznych** – prace związane ze stanem technicznym laboratorium oraz jego modernizacją, koordynator laboratorium (od 2011 r. do chwili obecnej).

2. **Wdrożenie Mobilnego Laboratorium Rejestracji Wyladowań Atmosferycznych** – prace związane z zamówieniami materiałów konstrukcyjnych, aparatury pomiarowej, zaprojektowaniem konstrukcji stacji i jej realizacją przez firmy zewnętrzne (2019 r.)

3. **Wdrożenie oraz uruchomienie Systemu Rejestracji Prądu piorunowego na wieżowcu w Rzeszowie** – prace związane z zamówieniami materiałów konstrukcyjnych, aparatury pomiarowej, zaprojektowaniem konstrukcji stacji i jej instalacją przez firmy zewnętrzne (2024-025 r.).
4. **Udział (40%) we wdrażaniu i modernizacji Laboratorium Oddziaływań Piorunowych** (od 2013 r. do chwili obecnej).
5. **Udział (30%) we wdrażaniu i modernizacji Laboratorium Odporności Awioniki na Wyladowania Atmosferyczne** (od 2015 r. do chwili obecnej).
6. **Koordynator KEiPI ds. ankietyzacji jednostek naukowych** (od 2019 r.).
7. **Ewidencjonowanie czasu pracy urzędzeń badawczych, łącznie 20 urzędzeń** (od 2013 r. do chwili obecnej)
8. **Członek w komisji socjalnej ds. przyznawania świadczeń doktorantom** (2013-2017 r.)
9. **Wielokrotny członek komisji egzaminacyjnych do przeprowadzania egzaminu dyplomowego** (Wydział Elektrotechniki i Informatyki, kierunek Elektrotechnika) – od 2016 r. oraz inżynierskiego (Wydział Budownictwa, kierunek Energetyka) – od 2022 r. do chwili obecnej.

6.3. Osiągnięcia popularyzujące naukę

Moja działalność popularyzatorska obejmuje wygłoszenie referatów w ramach konferencji popularnonaukowych, również w języku angielskim, opracowanie licznych materiałów promujących działania badawcze w Katedrze Elektrotechniki i Podstaw Informatyki oraz Polskiego Komitetu Ochrony Odgromowej a także kontakt z mediami.

6.3.1. Konferencje popularnonaukowe

1. **Prezentacja** wdrożonego Systemu Rejestracji Wyladowań Atmosferycznych podczas **seminarium Polskiego Komitetu Ochrony Odgromowej**, Bezmiechowa Górna, (21.06.2013 r.)
2. **Wygłoszenie referatu** (j. angielski) pt. „*Lightning Research Center in Rzeszow University of Technology*” na **seminarium organizowanym przez firmę Würth Electronic** (12.04.2015 r.).
3. **Wygłoszenie referatu** pt. „*Analiza rejestracji pola elektrycznego w warunkach burzowych pod kątem wykorzystania w systemach lokalizacji wyladowań atmosferycznych*” na **seminarium PTETiS Oddział Rzeszowski** (20.05.2015 r.).
5. **Wygłoszenie referatu** (j. angielski) na **seminarium naukowo-technicznym WEiI** na temat badań wyladowań atmosferycznych prowadzonych w KEiPI (15.07.2015 r.).
6. **Wygłoszenie referatu** pt. „*Research on lightning discharges and their effects at the Rzeszow University of Technology*” na **seminarium organizowanym przez firmę ASTAT, PRz, EMC Society Polish Chapter oraz IEEE** pt. „*Testy, pomiary elektryczne i EMC w przemyśle lotniczym i wojskowym w oparciu on normy DO-160 i MIL-STD-461G*” (04.04.2017 r.)

7. **Wygłoszenie referatu na seminarium WEiI** pt. „*Jak napisać wniosek, aby otrzymać grant?*” (12.04.2023 r.).

6.3.2. Opracowanie materiałów promujących działania badawcze

1. **Modernizacja i zarządzanie zawartością merytoryczną strony Polskiego Komitetu Ochrony Odgromowej** (2015-2018 r.).

2. **Modernizacja i zarządzanie zawartością merytoryczną strony KEiPI** w aspekcie badań naukowych prowadzonych w katedrze (od 2012 r. do chwili obecnej).

3. **Udział (50%) w przygotowaniu licznych materiałów promujących działania badawcze KEiPI**, w tym m.in. 8 plakatów, 3 broszur informacyjnych, w 50% również w języku angielskim, jak również materiałów na stronę wydziałową oraz na potrzeby publikacji w mediach (TVP, Polsat) (od 2012 r. do chwili obecnej).

4. **Wielokrotny udział w organizacji dni otwartych Wydziału Elektrotechniki i Informatyki** w m.in. ramach programu Kariera Inżyniera, zjazdu absolwentów WEiI – opracowanie materiałów promocyjnych, prezentacji multimedialnych, oprowadzanie wycieczek po laboratoriach wydziałowych.

6.3.3. Kontakt z mediami

1. **Udział w programie telewizyjnym stacji TVN** – reportaż na temat: „*Czy telefon komórkowy ściąga pioruny?*” (21.08.2012 r.),

2. **Udział w programie telewizyjnym TVP Rzeszów** – reportaż na temat badań związanych z wyładowaniami atmosferycznymi, prezentacja poligonu badawczego PRz w Hucie Poręby (15.08.2013 r.).

3. **Wywiad udzielony Polskiemu Radiu Rzeszów**, audycja nt. „*Jak powstaje piorun?*” (08.08.2021 r.).

4. **Udział w programie telewizyjnym stacji Polsat News „Czysta Polska”** – prezentacja badań wyładowań atmosferycznych prowadzonych na potrzeby lotnictwa (01.02.2025 r.).

5. **Udział w programie telewizyjnym Wydarzenia 24** – badania prowadzone w Laboratorium Oddziaływań Piorunowych PRz (02.02.2025 r.).

6. **Udział w programie telewizyjnym TVP 3 Rzeszów** – badania niszczące materiałów kompozytowych na potrzeby lotnictwa (02.02.2025 r.).

7. **Udział w programach telewizyjnych TVP 1 – Teleexpress, TVP Info oraz TVP Polonia** – badania wyładowań atmosferycznych na Politechnice Rzeszowskiej (03.02.2025 r.).

8. **Wywiad udzielony Polskiemu Radiu Rzeszów**, audycja nt. „*Naukowcy z Politechniki Rzeszowskiej badają wyładowania atmosferyczne*” (22.04.2025 r.).

7. **Oprócz kwestii wymienionych w pkt. 1-6, wnioskodawca może podać inne informacje, ważne z jego punktu widzenia, dotyczące jego kariery zawodowej.**

Systematycznie rozszerzam swoje kwalifikacje w ramach kursów/szkoleń organizowanych przez czołowe firmy m.in. z branży elektrotechnicznej, ochrony odgromowej

i przepięciowej, szybkiej wideorejestracji i pomiarowej. W tej sekcji wykazałem również otrzymane nagrody i wyróżnienia:

7.1. Nagrody i wyróżnienia

1. **Nagroda indywidualna Young Scientist Award** za artykuł pt. „*Automated Discrimination of Lightning Stepped Leader Stage from the Power Spectrum Density of the Related Electric Field Recordings*” na **konferencji międzynarodowej International Conference on Lightning Protection** (2018 r.).

2. **Nagroda JM Rektora PRz za osiągnięcia naukowe** w 2013 r.

3. **Nagroda JM Rektora PRz za uzyskanie stopnia doktora** nauk inżynieryjno-technicznych w dyscyplinie automatyka, elektronika i elektrotechnika. (12.08.2020 r.).

4. **Nagroda JM Rektora PRz za autorstwo publikacji:** „*A novel algorithm for determining lightning leader time onset from electric field records and its application for lightning channel height calculations*” oraz „*A low-cost ELF-MF orthogonal sensor and preamplifier dedicated for wide range lightning magnetic field registration*” (27.10.2021 r.).

5. **Nagroda JM Rektora PRz za autorstwo publikacji:** „*Computation of Lightning Current from Electric Field Based on Laplace Transform and Deconvolution Method*” oraz „*Testing of Conductive Carbon Fiber Reinforced Polymer Composites Using Current Impulses Simulating Lightning Effects*” (01.12.2022 r.).

6. **Nagroda JM Rektora PRz za autorstwo publikacji:** „*A new method to electrical parameters identification of carbon fiber reinforced composited using lightning disturbances corresponding to subsequent return strokes*” oraz “*A new method for modeling and parameter identification of positively charged downward lightning leader based on remote lightning electric field signatures recorded in the ELF/MF range and 3D Doppler radar scanning data*” (09.11.2023 r.).

7. **Nagroda JM Rektora PRz za autorstwo patentu:** „*Stanowisko probierczo-pomiarowe do badań wysokonapięciowych impedancji, rezystywności i odporności materiałów kompozytowych oraz sposób badania wysokonapięciowych impedancji, rezystywności i odporności materiałów kompozytowych*” (05.12.2024 r.).

8. Patent nr **245088** na wynalazek pt. „*Samogasnąca kompozycja żywicy epoksydowej o zwiększonym przewodnictwie elektrycznym oraz sposób otrzymywania samogasnącej kompozycji żywicy epoksydowej o zwiększonym przewodnictwie elektrycznym*” nr publikacyjny patentu: [PL245088B1](#) (29.06.2020 r.).

9. Patent nr **243235** na wynalazek pt. „*Stanowisko probierczo-pomiarowe do badań wysokonapięciowych impedancji, rezystywności i odporności materiałów kompozytowych oraz sposób badania wysokonapięciowych impedancji, rezystywności i odporności materiałów kompozytowych*” nr publikacyjny patentu: [PL243235B1](#) – wymieniony jako oryginalne osiągnięcie konstrukcyjne [[B3](#)] w autoreferacie (29.06.2020 r.).

