

Dr hab. inż. Grzegorz Maślowski, prof. PRz
Katedra Elektrotechniki i Podstaw Informatyki
Politechnika Rzeszowska im. Ignacego Łukasiewicza
35-959 Rzeszów, ul. Powstańców Warszawy 12

Rzeszów, 08 lipca 2020 r.

Recenzja rozprawy doktorskiej Pana mgr. inż. Krzysztofa Lenarczyka
***Wyznaczanie w budynkach o konstrukcji szkieletowej stref
o minimalnym oddziaływaniu impulsów elektromagnetycznych powodowanym
wyładowaniem piorunowym***
przygotowana na podstawie uchwały podjętej przez Radę Naukową Dyscypliny
Automatyka, Elektronika i Elektrotechnika Politechniki Warszawskiej
w dniu 05 maja 2020 r.

1. Problematyka pracy

Rozprawa doktorska dotyczy problematyki oddziaływań piorunowych na obiekty naziemne, a w szczególności rozptywu prądu piorunowego w wysokich obiektach budowlanych o konstrukcji szkieletowej oraz wyznaczania napięć indukowanych w pętlach instalacji przewodzących znajdujących się wewnątrz tych budynków.

Przedmiotem zainteresowania są więc zjawiska wysokonapięciowe występujące podczas burzy z wyładowaniami atmosferycznymi. Rozptyw głównej składowej prądu piorunowego w elementach konstrukcyjnych różnych obiektów wyznaczono z wykorzystaniem tzw. metody obwodowej, po wcześniejszym określeniu parametrów elektrycznych, takich jak rezystancje, indukcyjności własne i wzajemne metalowych słupów i belek oraz ich pojemności względem ziemi i pomiędzy poszczególnymi elementami. W przypadku wyznaczania napięć indukowanych w pętlach wykorzystano z kolei teorię pola elektromagnetycznego, a konkretnie zależność siły elektromotorycznej od szybkości zmian cyrkulacji potencjału wektorowego generowanego przez prąd piorunowy.

Tematyka pracy jest jak najbardziej aktualna z uwagi na konieczność rozwoju skutecznych metod ochrony odgromowej i przeciwprzebieciowej. Zapewnienie prawidłowej ochrony jest zwłaszcza bardzo ważne w przypadku nowoczesnych wieżowców, w których pracują wrażliwe na zaburzenia elektromagnetyczne systemy informatyczne oraz urządzenia elektryczne i elektroniczne. Istotne jest również rozwijanie efektywnych metod komputerowych pozwalających na ocenę zagrożenia wywołanego bezpośrednimi wyładowaniami atmosferycznymi.



W rezultacie należy stwierdzić, iż podjęta przez Doktoranta problematyka badań jest kluczowa z punktu widzenia prawidłowego funkcjonowania urządzeń elektrycznych i elektronicznych w trakcie burzy z wyładowaniami atmosferycznymi i wpisuje się w tematykę prac badawczych realizowanych w Zakładzie Wysokich Napięć i Kompatybilności Elektromagnetycznej Politechniki Warszawskiej. Dlatego też kwalifikuje się ona jako przedmiot rozprawy doktorskiej w dyscyplinie *elektrotechnika*, jak również w dyscyplinie *automatyka, elektronika i elektrotechnika*, zgodnie z nową klasyfikacją.

2. Ocena układu i zawartości pracy

Rozprawa liczy 163 strony i składa się ze streszczenia w języku polskim i angielskim, spisu treści, wykazu ważniejszych oznaczeń, wstępu, celu i zakresu pracy, pięciu zasadniczych rozdziałów, podsumowania, bibliografii i jednego załącznika z fragmentami programów w pakiecie Matlab/Simulink opisujących modele układów konstrukcyjnych analizowanych budynków.

We wstępie rozprawy zwrócono uwagę na znaczący problem związany z oddziaływaniem wyładowań atmosferycznych na urządzenia techniczne, jak również podano, na podstawie opublikowanych raportów, wybrane dane statystyczne na temat szkód piorunowych. Wynika z nich, że wyładowania doziemne są przyczyną wielu szkód zarówno w obiektach budowlanych, jak i w sieciach elektroenergetycznych, a w przypadku izolatorów linii napowietrznych są one główną przyczyną uszkodzeń. Ponadto Doktorant ocenia, że najczęściej awariom ulegają podczas burzy systemy przesyłu i przetwarzania danych, które stanowią podstawowe wyposażenie nowoczesnych obiektów, a zwłaszcza wysokich biurowców, które są narażone nie tylko na wyładowania doziemne odgórne, ale również wyładowania oddolne. Zasadne zatem wydaje się wybranie wysokich obiektów jako cel badań komputerowych związanych z rozplywem prądu piorunowego w ich konstrukcjach szkieletowych i napięć indukowanych w wewnętrznych instalacjach.

Przed określeniem celu i zakresu rozprawy Doktorant zdecydował się na wprowadzenie krótkiego rozdziału na temat ogólnych zagadnień ochrony odgromowej. W szczególności skupił się w nim na analizie prac dotyczących rozplywu prądów piorunowych w przewodzących elementach obiektów budowlanych będących integralną częścią zewnętrznego urządzenia piorunochronnego. Zwrócił uwagę na brak kompleksowych opracowań, w których odzwierciedlone byłyby główne cechy konstrukcyjne rzeczywistych obiektów. Poddaje również w wątpliwość zasadność umieszczania w zapisach normatywnych prostych przykładów wyznaczania rozplywu prądów piorunowych w wybranych obiektach budowlanych o niezbyt skomplikowanych konstrukcjach. Zdaniem Autora takie opisy nie są przydatne w przypadku bardziej złożonych konstrukcji i dodatkowo niepotrzebnie zwiększają objętość normy.



W rozdziale trzecim sformułowany został cel rozprawy oraz przedstawiono jej zakres. Realizację celu wytyczono poprzez wykazanie słuszności następującej tezy:

„Zagrożenie elektronicznych urządzeń informatycznych, piorunowymi napięciami indukowanymi, w obiektach budowlanych konstrukcji szkieletowej, można zminimalizować, lokując te urządzenia i ich nieekranowane przyłącza w przestrzeniach, w których opóźniony potencjał wektorowy wywołany polem elektromagnetycznym, emitowanym przez prąd piorunowy, rozprzyskający się w stalowych elementach konstrukcyjnych obiektu, nie przekracza krytycznej wartości.

Identyfikacja miejsc, w których może wystąpić krytyczna wartość opóźnionego potencjału wektorowego, wymaga przeprowadzenia szczegółowej analizy rozkładu składowej magnetycznej pola elektromagnetycznego w rozpatrywanej przestrzeni ze szczególnym uwzględnieniem przypadków nienormatywnego rozprzyskania prądu piorunowego w konstrukcji stalowej obiektu. Wartość krytyczna potencjału wektorowego wynika z indywidualnych cech zagrożonego urządzenia.”

Tak rozbudowana teza sprowadza się w zasadzie do stwierdzenia, że bezpieczne strefy należy określać indywidualnie dla każdego obiektu w zależności od konkretnego rozprzyskania prądu piorunowego i specyfiki pracujących wewnątrz urządzeń elektrycznych i elektronicznych.

W kolejnym rozdziale czwartym Doktorant skupił swoją uwagę na charakterystyce wyładowań atmosferycznych podając ich klasyfikację oraz parametry tzw. wyładowań głównych (*ang. return stroke*), do których zalicza pierwsze wyładowanie dodatnie, pierwsze wyładowanie ujemne oraz kolejne wyładowania ujemne w wyładowaniu wielokrotnym. Przedstawia również rozkłady statystyczne tych parametrów z uwzględnieniem wartości normatywnych. Na zakończenie tego rozdziału opisuje także aproksymacje matematyczne głównych składowych wyładowania stosowane podczas badań komputerowych piorunowych zaburzeń elektromagnetycznych.

W rozdziale piątym opisano metody eksperymentalne i symulacyjne wykorzystywane podczas analizy rozprzyskania prądu piorunowego w konstrukcji szkieletowej obiektu stanowiącej integralną część zewnętrznego urządzenia piorunochronnego. Najwięcej uwagi poświęcono metodzie obwodowej i polowej. Przedstawiono również trendy w konstrukcjach współczesnych wysokościowców z uwzględnieniem nie tylko ścian zewnętrznych, ale również trzonów wewnętrznych. Na zakończenie tego rozdziału przedstawiono typowe modele budynków oraz definicje parametrów elektrycznych (rezystancji, indukcyjności własnej i wzajemnej oraz pojemności) elementów przewodzących wchodzących w skład konstrukcji szkieletowej tych budowli. Podano również sposób definiowania w Matlabie źródła prądu udarowego reprezentującego główne wyładowanie dodatnie o kształcie fali 10/350 μ s, wykorzystywane w pracy do analizy rozprzyskania prądu piorunowego oraz wyznaczania napięć indukowanych.

Rozdziały szósty i siódmy stanowią zasadniczą część rozprawy, w której Doktorant opisuje wyniki swoich badań komputerowych. W rozdziale szóstym skupiono uwagę na analizie rozptyłu prądu piorunowego w różnych modelach konstrukcji obiektów. Każdorazowo wyznaczano parametry elektryczne wszystkich elementów przewodzących konstrukcji szkieletowej biorąc pod uwagę wysokość słupów pionowych i długość belek poziomych i porzecznych oraz ich promień, jak również rezystywność stali. Zbadano wpływ poszczególnych parametrów na otrzymywane wyniki symulacji komputerowych. Oprócz bardzo wysokich obiektów rozpatrywano również rozptył prądu w strukturach uproszczonych z modyfikacjami wprowadzonymi w celu zaobserwowania wybranych własności rozkładu tego prądu pomiędzy poszczególne elementy przewodzące.

W rozdziale siódmym wyznaczono rozkłady natężenia pola magnetycznego i potencjału wektorowego wewnątrz obiektów budowlanych o konstrukcji szkieletowej, w której rozptywa się prąd udarowy po bezpośrednim wyładowaniu atmosferycznym. Ponadto obliczono napięcia indukowane w przykładowych pętlach instalacji jako szybkość zmian w czasie cyrkulacji potencjału wektorowego występującego wzdłuż tych pętli. Pozwoliło to między innymi oszacować wielkość tych napięć i porównać je z udarową wytrzymałością typowych urządzeń elektronicznych w celu ewentualnego skorygowania sposobu trasowania przewodów zasilających i sygnałowych oraz lokalizacji tych urządzeń wewnątrz obiektu. Ponadto na podstawie przeprowadzonych analiz sformułowano między innymi wniosek, iż pętle instalacji powinny być oddalone co najmniej 5 m od elementów konstrukcyjnych obiektu znajdujących się bezpośrednio pod miejscem trafienia pioruna w obiekt, natomiast 2,5 m od pozostałych elementów stanowiących naturalne urządzenie piorunochronne.

W podsumowaniu pracy zebrano razem wszystkie wnioski z przeprowadzonych badań komputerowych oraz wskazano, co zdaniem Doktoranta można uznać za jego wkład własny w rozpatrywanej obszarze.

Spis literatury obejmuje 258 pozycji, w tym tylko jedna pozycja jest autorstwa Doktoranta. Po bibliografii w załączniku zamieszczono fragmenty kodu programu wykorzystywanego w pakiecie Matlab do analizy oddziaływań piorunowych opisanych w rozprawie.

3. Ocena pracy

Tematyka rozprawy jest aktualna z uwagi na konieczność rozwijania coraz bardziej niezawodnych metod ochrony odgromowej i przeciwprzebieciowej. Doktorant skupił swoją uwagę na bardzo ważnym zagadnieniu rozptyłu prądu piorunowego w przewodzących konstrukcjach szkieletowych wysokich obiektów budowlanych. Rozptył ten determinuje pole elektromagnetyczne występujące wewnątrz budynku, a zatem i napięcia indukowane w instalacjach zasilających i sygnałowych.

Na uwagę zasługuje fakt, iż modele obiektów dosyć wiernie odzwierciedlają konstrukcję współczesnych wysokościowców. Kwestia ta jest podkreślana w rozprawie

wraz zaznaczeniem, że analizy dostępne w literaturze główny nacisk kładły dotychczas na metody badań i weryfikację symulacji komputerowych z pomiarami prądów w rzeczywistych obiektach lub przeskalowanych modelach laboratoryjnych. Dbłość o dokładne odwzorowanie rozpatrywanych obiektów widoczna jest również w spisie literatury, gdzie widnieje szereg pozycji poświęconych współczesnym konstrukcjom budowlanym. Na szczególną uwagę zasługuje fakt uwzględnienia w modelach trzonów wewnętrznych, w których również rozplywa się prąd piorunowy.

Podczas badań komputerowych zastosowano metodę obwodową, dla której zbadano wpływ parametrów elektrycznych przewodzących elementów na otrzymywane wyniki rozplywu prądu. W rezultacie słusznie uznano, iż optymalnym rozwiązaniem jest uwzględnienie wszystkich rezystancji, indukcyjności własnych i pojemności względem ziemi elementów konstrukcji szkieletowej, natomiast w przypadku indukcyjności i pojemności wzajemnych wzięcie pod uwagę tylko sąsiadujących słupów i belek. Podejście takie gwarantuje z jednej strony akceptowalną dokładność wyników, a z drugiej znaczące zmniejszenie ilości operacji numerycznych koniecznych do wykonania podczas obliczeń komputerowych. Ponadto sformułowano ważne wnioski związane z wyrównywaniem się rozplywu prądu na poziomie piątek kondygnacji poniżej miejsca uderzenia pioruna. Analizę wyładowań bezpośrednich w powierzchnię boczną wieżowca też należy uznać za osiągnięcie Doktoranta, gdyż dotychczas tego typu przypadki nie były szczegółowo rozpatrywane w literaturze.

Oprócz badania rozplywu prądów piorunowych w konstrukcjach szkieletowych wysokich obiektów w rozprawie wyznaczono dodatkowo rozkłady natężenia pola magnetycznego i potencjału wektorowego wewnątrz tych obiektów. Ponadto obliczono napięcia indukowane w kilku przykładowych pętłach, które reprezentowały przewodzące instalacje wewnętrzne. Wykorzystanie w tym celu potencjału wektorowego, a konkretnie szybkości zmian cyrkulacji tej wielkości, stanowi oryginalne podejście i świadczy o biegłości Doktoranta w rozwiązywaniu zagadnień teorii pola elektromagnetycznego. Ostatecznie do najważniejszych osiągnięć Doktoranta należy zaliczyć:

- przegląd literaturowy, który opisuje badania realizowane w kraju i na świecie w zakresie ochrony odgromowej obiektów budowlanych;
- zaproponowanie metody obwodowej z właściwie dobranymi parametrami elektrycznymi elementów konstrukcji do wyznaczania rozplywu prądu piorunowego;
- zaobserwowanie prawidłowości w rozplywie prądów piorunowych w konstrukcjach szkieletowych wysokościowców;
- wyznaczenie rozkładów natężenia pola magnetycznego i potencjału wektorowego wewnątrz obiektów bezpośrednio trafionych piorunem;

- zaproponowanie metody polowej z wykorzystaniem potencjału wektorowego do wyznaczania napięć indukowanych w pętlach instalacji;
- wyciągnięcie wniosków na temat rozmiarów stref przylegających do konstrukcji szkieletowych obiektów, w których powinno unikać się instalowania wrażliwych urządzeń elektronicznych

Na podstawie wymienionych wyżej osiągnięć należy stwierdzić, że pomimo szczegółowych uwag wymienionych poniżej, Pan mgr inż. Krzysztof Lenarczyk osiągnął założony cel pracy, wykazując się wiedzą i zdolnościami do samodzielnego rozwiązywania problemów naukowo-technicznych. Opanował niezbędną wiedzę z zakresu techniki wysokich napięć, a w szczególności ochrony odgromowej i przeciwprzepięciowej, jak również wykorzystania metody obwodowej i polowej do wyznaczania rozptyłu prądu piorunowego w konstrukcjach stalowych obiektów budowlanych oraz napięć indukowanych piorunowym impulsem elektromagnetycznym.

Na uwagę zasługuje również fakt, iż Doktorant potrafi w sposób efektywny wykorzystywać pakiet Matlab/Simulink do prowadzenia badań komputerowych oraz prawidłowej interpretacji uzyskanych symulacji. Przedstawione w pracy wyniki mają wartości poznawcze, stwarzając jednocześnie podstawę do ich wykorzystania w praktyce. Zgodnie z sugestiami Doktoranta zawartymi w rozprawie mogą one również posłużyć do weryfikacji i korekty aktualnie istniejących zapisów normatywnych w rozpatrywanym obszarze.

Generalnie praca została zredagowana starannie, a struktura treści jest w zasadzie poprawna. Wątpliwość można mieć jedynie co do wprowadzenia dodatkowego rozdziału pomiędzy wstępem i określeniem celu i zakresu pracy. Taka struktura treści nie jest typowa dla rozpraw naukowych. Praktycznie dwa pierwsze rozdziały stanowią wstęp pracy. Zastrzeżenia można zgłosić ponadto do niektórych, słabo widocznych wykresów, niejednorodnych zapisów matematycznych występujących zwłaszcza w rozdziale siódmym oraz nieprecyzyjnych sformułowań.

W stosunku do całej rozprawy można jednak stwierdzić, że Doktorant opanował warsztat pisania rozpraw naukowych w stopniu dostatecznym. Odnośniki literaturowe wskazują, że posiada także niezbędną orientację w bibliografii obejmującej podejmowane zagadnienia. Dlatego też całość sprawia, że recenzowana rozprawa spełnia wymagania stawiane rozprawom doktorskim.

4. Uwagi

W stosunku do przedłożonej do recenzji rozprawy doktorskiej można sformułować uwagi, które poniżej wymienione zostały w punktach.

1. Podstawowa uwaga dotyczy rozważanych w badaniach kształtów prądu piorunowego reprezentujących wyładowanie główne następujące po fazie

liderowej. Z informacji zawartej na str. 59 wynika, że przyjęto w pracy do rozważań kształt $10/350 \mu\text{s}$, który odpowiada pierwszemu wyładowaniu głównemu o dodatniej polaryzacji lidera odgórnego. Udar taki posiada stosunkowo długi czas narastania czoła, co wpływa na widmo tego sygnału i w rezultacie na parametry elektryczne elementów konstrukcji zależne od częstotliwości. Czas trwania czoła udaru jest również ważny podczas obliczania napięć indukowanych. Czy zatem wyciągnięte wnioski odnośnie rozptywu prądu piorunowego w konstrukcjach wieżowców i wielkości napięć indukowanych w pętlach instalacji wewnętrznych będą takie same dla przebiegów np. $1/200 \mu\text{s}$, czy też $0,25/100 \mu\text{s}$?

2. W rozprawie przyjęto model wyładowania piorunowego w postaci skupionego źródła prądu o określonej impedancji wewnętrznej odpowiadającej impedancji kanału piorunowego. W rzeczywistości w trakcie bezpośrednich wyładowań atmosferycznych kanał piorunowy silnie oddziałuje na trafiony obiekt. Czy zatem dbanie o dokładne odwzorowanie oddziaływań poszczególnych elementów konstrukcyjnych, w których płynie prąd udarowy (indukcyjności wzajemne i pojemności pomiędzy sąsiadującymi elementami konstrukcji) jest w pełni uzasadnione, gdy pomijamy oddziaływanie dolnej części kanału piorunowego „podłączonego” do obiektu z całym prądem wyładowania piorunowego ?
3. Podczas analizy niebezpiecznych stref wewnątrz obiektów został sformułowany wniosek odnośnie minimalnej odległości wynoszącej 5 m od elementów z prądem w pobliżu miejsca trafienia pioruna, a od pozostałych elementów naturalnego urządzenia piorunochronnego 2,5 m. Jak interpretować takie zalecenie wiedząc, że piorun może uderzać w różne miejsca obiektu, w tym również w elementy boczne. Logicznie byłoby więc przyjąć stałą odległość 5 m. Nasuwa się jednak pytanie czy jest zasadne określać niedozwoloną strefę jednoznacznie dla wszystkich rodzajów obiektów i niezależnie od przyjętego poziomu ochrony? Klóci się to z postawioną tezą. Ponadto warto byłoby odnieść się do zaleceń normatywnych i porównać zaproponowaną bezpieczną odległość z tą, która wynika z zależności zawartych w normie PN-EN 62305.
4. Teza sformułowana w rozprawie odnosi się głównie do wartości krytycznej potencjału wektorowego wewnątrz obiektów trafionych bezpośrednio wyładowaniem atmosferycznym. Wprawdzie wyznaczono w pracy rozkłady tego potencjału dla różnych konstrukcji obiektów budowlanych, ale w rezultacie nie podano konkretnych wartości krytycznych tej wielkości.
5. Praca została napisana poprawnym językiem. Występują w niej jednak błędy stylistyczne oraz nieprecyzyjne i błędne sformułowania, takie jak: „*potencjał wektorowy wywołany polem elektromagnetycznym*”, „*Dlatego zastosowanie układu o parametrach skupionych ogranicza się tu raczej tylko do analizy udaru pierwszego*

w wyładowaniu piorunowym, a to z uwagi na mniejszą częstotliwość od wyładowań następnych”, „duże wartości pojemności związane są z małymi powierzchniami elementów”, „Kolejnym przykładem budynku jest World Trade Center (WTC) ... Jego przekrój ma wymiary...”. Głównym jednak mankamentem rozprawy jest stosowany formalizm matematyczny, który odbiega od przyjętych standardów obowiązujących w opracowaniach naukowych. Jednakże ilość występujących błędów i niejednoznaczności nie wpływa w zasadniczy sposób na ogólną ocenę związaną ze stroną edycyjną i graficzną rozprawy.

Należy podkreślić, że przedstawione powyżej uwagi mogą być przedmiotem dyskusji lub stwarzają pole do dalszych badań i nie podważają jednak zasadniczych wartości recenzowanej rozprawy doktorskiej, która ma wystarczająco bogatą treść merytoryczną.

5. Podsumowanie

Uwzględniając odnotowane oryginalne osiągnięcia naukowo-badawcze Doktoranta uzyskane w dyscyplinie *elektrotechnika*, które mogą być również zaliczone w całości jako osiągnięcia w dyscyplinie *automatyka, elektronika i elektrotechnika*, zgodnie z nową klasyfikacją, jak również poznawcze i uytylitarne walory rozprawy, a także to, że przedstawione uwagi o charakterze dyskusyjnym nie podważają jej zasadniczych wartości stwierdzam, że recenzowana rozprawa doktorska Pana mgr. inż. Krzysztofa Lenarczyka spełnia wymagania Ustawy z dnia 14 marca 2003 r. o stopniach naukowych i tytule naukowym oraz o stopniach i tytule w zakresie sztuki i wnioskuję o jej przyjęcie oraz dopuszczenie do publicznej obrony.

