Prof. dr hab. inż. Kazimierz Jakubiuk
Wydział Elektrotechniki i Automatyki
Politechniki Gdańskiej

WYDZIAŁ ELEKTRYCZNY
DZIEKANAT
Wpł. 22-10-2019
Rektor Politechniki Poznańskiej
prof. dr hab. inż. Tomasz Łodygowski
z up. prof. dr hab. inż. Andrzej Kasiński
Dziekan

Gdańsk, 21.10.2019r.

RECENZJA

rozprawy doktorskiej mgr. inż. Krzysztofa KRÓLA
pt.: „Optymalizacja rozkładu natężenia pola elektrycznego i magnetycznego wokół napowietrznych linii elektroenergetycznych"

Recenzja rozprawy mgr. inż. Krzysztofa Króla została opracowana na zlecenie prof. dr. hab. inż. Zbigniewa Nadolnego - Dziekana Wydziału Elektrycznego Politechniki Poznańskiej - pismo z dnia 30.09.2019r.

1. Ocena wyboru tematyki, celu, zakresu i tezy rozprawy

Opiniowana rozprawa mgra inż. Krzysztofa Króla pt.: „Optymalizacja rozkładu natężenia pola elektrycznego i magnetycznego wokół napowietrznych linii elektroenergetycznych" wydana w 2019 roku, zawiera 137 stron, składa się z 6 rozdziałów oraz bibliografii. Bibliografia zawiera 147 pozycji, w tym 2 autorskie i 5 współautorskich publikacje Doktoranta. Rozprawa dotyczy dyscypliny naukowej *Elektrotechnika,* aktualnie dyscypliny *Elektronika, Automatyka i Elektrotechnika.*

Promotorem rozprawy doktorskiej jest prof. dr hab. inż. Wojciech Machczyński a promotorem pomocniczym dr inż. Krzysztof Budnik.

Problematyka związana z polem elektromagnetycznym wytwarzanym przez napowietrzne linie elektroenergetyczne jest znana i badana od wielu lat. Jej znaczenie stało się jeszcze bardziej aktualne w związku z rosnącymi wymaganiami dotyczącymi szeroko rozumianej ekologii i kompatybilności elektromagnetycznej. Problematyka analizowana w rozprawie jest związana również z oddziaływaniem pola elektromagnetycznego na organizmy żywe oraz na różnego rodzaju konstrukcje znajdujące się w otoczeniu linii. Doktorant w swoich badaniach zajmuje się polem elektromagnetycznym o częstotliwości sieciowej 50 lub 60 Hz. Nie zajmuje się natomiast oddziaływaniem pola elektromagnetycznego generowanego przez wyładowania elektryczne wokół przewodów linii w warunkach normalnych, czyli np. ulotem. Aktualność prezentowanej tematyki wynika również z konieczności budowy coraz większej liczby linii napowietrznych, zwłaszcza wysokich i najwyższych napięć. Coraz wyższe wymagania stawiane liniom elektroenergetycznym wynikające z ekologii wymagają redukcji pola elektromagnetycznego wytwarzanego przez te linie. Liczne prace publikowane w ostatnich latach, dotyczące problemu redukcji pola elektromagnetycznego wokół linii, świadczą o tym, że tematyka ta jest aktualna i rozwojowa. W tematykę tą wpisuje się opiniowana rozprawa doktorska, której celem jest optymalizacja natężenia pola elektrycznego i magnetycznego wokół napowietrznych linii elektroenergetycznych.

Szczegółowym celem prowadzonych badań jest „zastosowanie algorytmów optymalizacyjnych do wyznaczania parametrów geometrycznych napowietrznej linii elektroenergetycznej, pozwalających na redukcję wartości natężenia trójwymiarowego pola elektrycznego i magnetycznego o częstotliwości 50 Hz w określonym obszarze położonym w pobliżu linii elektroenergetycznej, przy wykorzystaniu technik modelowania pola elektrycznego oraz pola magnetycznego, w szczególności poprzez obliczenia numeryczne".

Tezą rozprawy jest stwierdzenie „że możliwa jest optymalizacja rozkładu trójwymiarowego (3-D) natężeń pól: elektrycznego i magnetycznego wokół napowietrznych linii elektroenergetycznych przy pomocy algorytmów heurystycznych". Uważam, że tak sformułowana teza jest zbyt

ogólna. W jej rozwinięciu należałoby podać, które parametry ulegają optymalizacji i w jakim obszarze wokół linii dokonuje się optymalizacji. Może się bowiem okazać, że optymalizując, a w zasadzie minimalizując pola elektryczne i magnetyczne w jednym obszarze, powodujemy niekorzystną zmianę ich rozkładu w innym obszarze. Może to między innymi wpłynąć na pogorszenie parametrów technicznych linii, np. na zwiększenie strat energii w linii na skutek zwiększonego ulotu.

Zakres rozprawy obejmuje:

- wstęp i przegląd literatury przedmiotu, dotyczącej stanu badań,
- prezentację dokładnej i uproszczonej metody obliczania natężenia pola elektrycznego i magnetycznego linii napowietrznej, wraz z porównaniem z wynikami pomiarów na rzeczywistych liniach,
- analizę i wybór metody optymalizacyjnej i algorytmów optymalizacyjnych,
- wykonanie symulacji komputerowych rozkładów pola elektrycznego i magnetycznego dla linii o różnych konfiguracjach,
- prezentację różnych metod i wyników symulacji redukcji pola elektrycznego i magnetycznego,
- sformułowanie wniosków i podsumowanie.

Problematyka podjęta w rozprawie jest ważna z teoretycznego a zwłaszcza z praktycznego punktu widzenia. Zakres badań zrealizowanych w ramach rozprawy oceniam pozytywnie. Tezę rozprawy, pomimo niepełnej jej precyzji, również oceniam pozytywnie.

2. Ocena treści rozprawy

W rozdziale pierwszym, będącym wprowadzeniem w tematykę, dokonano przeglądu literatury dotyczącej tematyki rozprawy. Omówiono zagrożenia wynikające z oddziaływania pola elektromagnetycznego na materię ożywioną. Podano bezpieczne wartości natężenia pola elektrycznego i magnetycznego zgodnie z Rozporządzeniem Ministra Środowiska. Przedstawiono różnego rodzaju rozwiązania stosowane w różnych krajach mające na celu ograniczenie wartości parametrów pola elektromagnetycznego. Przedstawiono wstępnie zastosowaną metodę optymalizacji rozkładu pola elektromagnetycznego. Na podstawie rozważań sformułowano cel, tezę pracy oraz zakres rozprawy. Jak zaznaczyłem wyżej teza rozprawy powinna być zdefiniowana bardziej precyzyjnie.

Rozdział drugi dotyczy prezentacji metody obliczanie natężenia pola elektrycznego i magnetycznego. Na wstępie przedstawiono klasyczną metodę odbić zwierciadlanych, którą określono jako metodę uproszczoną. Podano, że uproszczenie polega na pominięciu zwisu przewodów (założono przewód prostoliniowy, równoległy do powierzchni ziemi). Nie podano, że innym uproszczeniem jest to, że brano pod uwagę tylko jedno przęsło linii. Uważam, że należałoby to uproszczenie skomentować. W tabeli 2.1 jako napięcia znamionowe podano napięcia międzyfazowe linii. To nie są napięcia przewodów względem ziemi, które są napięciami fazowymi. Które zatem napięcia były wykorzystywane do wyznaczenia potencjałów przewodów względem ziemi? Dlaczego w punkcie 2.1, dla uproszczonego modelu linii nie zastosowano bardzo prostych wzorów dla nieskończenie długich przewodów i metody odbić zwierciadlanych? W jakim celu przedstawiono rozkłady natężenia pola elektrycznego wzdłuż osi „x" na rys. 2.7, 2.8 i 2.9 skoro pominięto zwis przewodów. W punkcie 2.2 przedstawiono metodę ładunków symulacyjnych (CSM). Nazwa punktu 2.2 jako „metoda dokładna" jest myląca, gdyż nie jest to metoda dokładna a przybliżona, ponieważ dokonuje się w niej dyskretyzacji linii wzdłuż jej długości. Opis metody nie zawiera wielu istotnych szczegółów. Zastosowana metoda odbicia zwierciadlanego nie jest zastosowana dokładnie. Dokonano odbicia tylko w płaszczyźnie ziemi. A co z innymi elementami o potencjale ziemi, konstrukcją słupa, przewodami odgromowymi itd.? Rozkład ładunków

przestrzennych nie spełnia a priori warunków brzegowych dla rozkładu potencjału. W literaturze, w metodzie odbić zwierciadlanych, często pomija się wpływ konstrukcji słupów, przewodów odgromowych, ale należało to i skomentować i oszacować błąd wynikający z tego uproszczenia. W metodzie CSM dokonuje się dyskretyzacji linii. W tej sytuacji całki we wzorach (23), (28) i (29) należało zastąpić sumowaniem po elementach dyskretnych. Na rys. 2.15 zamieniono osie „x" i „y". Z rozkładów natężenia pola elektrycznego podanych na rys. 2.14, 2.15 i 2.17 wynika, że w otoczeniu krańców przęseł natężenie pola elektrycznego osiąga bardzo małe wartości w stosunku do natężenia w miejscu największego zwisu przewodów. Czy to jest prawidłowe? Czy nie wynika to z uproszczeń zastosowanych w metodzie CSM?

Zaproponowany model do obliczania natężenia pola magnetycznego jest przedstawiony w sposób ogólnikowy. Wątpliwości budzi również metoda odbicia zwierciadlanego dla pola magnetycznego oraz wynikające z niej wieloznaczne wartości impedancji własnej i wzajemnej przewodów. Symbole wielkości zespolonych należy podkreślać. Czy uwzględniono w obliczeniach impedancji zwisy przewodów? Natężenie pola magnetycznego wyznaczano metodą Biota-Savarta. Nie podano szczegółów jak wyznaczano natężenie pola magnetycznego. Z przedstawionych na rys. 2.21- 2.25 rozkładów natężenia pola magnetycznego pod linią wynika, że jest ono największe w miejscu największego zwisu – co jest oczywiste, ale w pobliżu krańców przęsła osiąga wielokrotnie mniejsze wartości. Budzi to pewne wątpliwości dotyczące zastosowanego modelu obliczeniowego.

W rozdziale trzecim przedstawiono porównanie wyników symulacji z wynikami pomiarów dla wybranych linii elektroenergetycznych. Porównań dokonywano w otoczeniu największego zwisu przewodów, w kierunku poprzecznym do linii na wysokości 2m. W tym przypadku również podano, że napięcia przewodów linii są napięciami międzyfazowymi. Wyniki symulacji zarówno natężenia pola elektrycznego jak i pola magmatycznego są większe od wyników pomiarów. Maksymalna różnice wartości bezpośrednio pod linią nie przekraczają kilkunastu procent, co jest do zaakceptowania. Porównanie wyników symulacji i pomiarów stanowi istotną, pozytywną weryfikację zastosowanej metody obliczeń.

W rozdziale czwartym omówiono zastosowane algorytmy optymalizacyjne. Po wymienieniu właściwości algorytmu genetycznego (GA) i algorytmu roju cząstek (PSO) stwierdzono, że zostaną one wykorzystanie w rozprawie. Nie podano szczegółowego uzasadnienia wyboru tych metod, chociaż wybór ten jest racjonalny. Jako funkcję celu wybrano wartość odpowiednio natężenia pola elektrycznego i magnetycznego. Za zmienne decyzyjne przyjęto wybrane wymiary geometryczne linii, a w szczególności: odległości pomiędzy przewodami fazowymi, odległości pomiędzy przewodami odgromowymi, oraz wysokość zawieszenia przewodów fazowych i odgromowych, w tym zwłaszcza w połowie rozpiętości przęseł. Ograniczeniami w procesie optymalizacji są parametry geometryczne linii elektroenergetycznej oraz naprężenia mechaniczne przewodów. Czy ograniczeniem nie powinno być maksymalne natężenie pola elektrycznego na powierzchni przewodów? Obliczenia optymalizacyjne prowadzono z wykorzystaniem algorytmu GA w programie MATLAB i zaimplementowanego autorskiego algorytmu PSO.

W rozdziale piątym rozprawy omówiono metody redukcji natężenia pola elektrycznego i pola magnetycznego. Wskazano, że dla obniżenia wartości natężenia pola elektrycznego najczęściej stosuje się:

- odpowiedni dobór konstrukcyjny słupów i zwisów przewodów,
- uziemione elementy konstrukcyjne i naturalne ekrany,
- dokonywanie zamiany kolejności faz w liniach wielotorowych lub wielonapięciowych,
- montaż dodatkowych przewodów redukcyjnych pod przewodami fazowymi.

Wartość natężenia pola magnetycznego ogranicza się poprzez:

- odpowiedni dobór konstrukcyjny słupów i zwisów przewodów,
- stosowanie pętli odmagnesowujących,
- stosowanie przewodów skręconych i przeplecionych,
- stosowanie linii wielotorowych lub wielonapięciowych,
- optymalny rozpływ prądów pomiędzy liniami.

Przedstawiono wyniki symulacji rozkładów natężenia pola elektrycznego i magnetycznego w liniach dwutorowych dla różnej kolejności faz na wysokości 2m nad płaszczyzną ziemi. Określono takie kolejności faz, dla których natężenie pola elektrycznego przyjmuje wartości największe a jednoczenie natężenia pola magnetycznego przyjmuje wartości najmniejsze. Wskazano na taką kolejność faz, przy której występuje sytuacja odwrotna. Są to zatem procesy przeciwstawne. Nie ustosunkowano się do konieczności stosowania przepleceń faz w linii w celu symetryzacji jej parametrów. Czy jest możliwa taka kolejność faz aby było możliwe osiągnięcie minimalnych wartości natężenia pola elektrycznego i symetrii impedancji linii? W dalszym ciągu Doktorant omówił efekt zastosowania dodatkowych przewodów redukcyjnych pod przewodami fazowymi linii. Przewody te mają potencjał ziemi. Efekt redukcji natężenia pola elektrycznego i magnetycznego jest w tym przypadku dosyć oczywisty, co potwierdziły wykonane symulacje. W zależności od poziomu napięcia linii pozwala to zredukować natężenie pola elektrycznego w przybliżeniu dwu- a nawet trzykrotnie. Natężenie pola magnetycznego ulega w tym przypadku tylko niewielkiej redukcji. Nie podano, w tym przypadku, w jakim stopniu ulega zwiększeniu natężenie pola elektrycznego wokół przewodów (na ich powierzchni).

Efekty proponowanej optymalizacji rozkładów natężenia pola elektrycznego i magnetycznego poprzez dobór parametrów geometrycznych linii przedstawiono w punkcie 5.3. Nie podano kryterium doboru gęstości siatki numerycznej. Uzyskano zadziwiającą zbieżność niektórych wyników optymalizacji z obydwu zastosowanych metod. Świadczy to o niemal identycznej efektywności metod i stanowi pozytywną weryfikację uzyskanych wyników symulacyjnych. Okazało się że czas optymalizacji metodą PSO był znacznie krótszy (około trzykrotnie) od czasu optymalizacji metodą GA. Poddano wynik optymalizacji linii jednotorowych i dwutorowych. W efekcie optymalizacji we wszystkich analizowanych liniach o różnych poziomach napięć uzyskano wielokrotne (od kilku do kilkunastu razy) zmniejszenie wartości natężenia pola elektrycznego i pola magnetycznego. Można to uznać za duży sukces. Uzyskano to głównie dzięki istotnemu zmniejszeniu zwisów przewodów. Czy nie jest wątpliwe tak duże zmniejszenie zwisu przewodów po optymalizacji – we wszystkich przypadkach? Czy to jest realizowalne? Spowoduje to istotne zwiększenie naprężeń mechanicznych w przewodach. Należało to skomentować. W punkcie 5.4 przedstawiono wyniki optymalizacji rozkładu natężenia pola elektrycznego oraz magnetycznego na różnych wysokościach w miejscach bliskiej lokalizacji budynku przy napowietrznej linii elektroenergetycznej. W wyniku optymalizacji osiągnięto bardzo duże (kilkudziesięciu krotne) zmniejszenie natężenie pola elektrycznego oraz magnetycznego dla wybranych wysokości budynków usytuowanych w pobliżu linii. Również w tych przypadkach osiągnięto redukcję wartości pola poprzez znaczne zmniejszenie zwisu przewodów. W punkcie 5.5 przedstawiono wyniki optymalizacji wysokości zawieszenia dodatkowych przewodów redukcyjnych. W tych przypadkach efekty optymalizacji były mniejsze, ale również uzyskano zmniejszenie wartości natężenia pola elektrycznego, zwłaszcza dla linii o napięciu 220kV i 400kV. W punkcie 5.6 przedstawiono wyniki optymalizacja rozkładu natężenia pola elektrycznego i pola magnetycznego poprzez dobór parametrów geometrycznych linii oraz dodatkowych przewodów redukcyjnych. Również w tych przypadkach uzyskano znaczną (wielokrotną) redukcję wartości natężenia pola elektrycznego i magnetycznego.

Rozdział 6 stanowią wnioski i podsumowanie. W ramach podsumowania Doktorant powtórzył główne wyniki badań zamieszczone w rozprawie. Podał również autorski wykaz głównych osiągnięć rozprawy, do których zaliczył:

- opracowanie środowiska komputerowego (w tym autorskiej implementacja PSO zweryfikowana algorytmem genetycznym GA), które może być uniwersalnym narzędziem do badania trójwymiarowego rozkładu natężenia pola elektrycznego i magnetycznego w układzie napowietrznych linii elektroenergetycznych,
- dokonanie częściowej weryfikacji wyników otrzymanych w procesie symulacji poprzez porównanie z wynikami pomiarów,
- uwzględnienie w procesie optymalizacji obecności przewodów redukcyjnych w linii elektroenergetycznej,
- optymalizację rozkładu natężenia pola elektrycznego i magnetycznego w obszarze bliskiego występowania linii elektroenergetycznej i zabudowań na wysokościach większych od 2 metrów,
- uwzględnienie w obliczeniach natężenia pola magnetycznego linii elektroenergetycznych prądów wzbudzonych w przewodach odgromowych oraz przewodach redukcyjnych.

Opiniujący potwierdza główne osiągnięcia rozprawy podane przez Doktoranta.

Konkluzja oceny wyboru tematyki, celu, zakresu i tezy rozprawy.

W oparciu o omówienie i analizę treści rozprawy doktorskiej mgra inż. K. Króla pozytywnie oceniam wybór tematyki, celu i zakresu. Uznaję również, że teza rozprawy została udowodniona, pomimo tego, że teza została sformułowana w sposób zbyt ogólny. W omówieniu treści rozprawy wymieniłem różne uwagi dotyczące niedociągnięć rozprawy, w tym niedociągnięć edytorskich. Układ treści i język rozprawy doktorskiej oceniam pozytywnie, gdyż nie budzą one większych zastrzeżeń.

3. Uwagi dyskusyjne ogólne

Do opiniowanej rozprawy zgłaszam następujące uwagi ogólne:

1) Metodę obliczania rozkładów pola elektrycznego metodą CSM określono jako dokładną. Polega ona na dyskretyzacji linii, a więc jest przybliżona. Pomimo prezentacji metody CSM w literaturze, uważam że celowe byłoby szersze omówienie jej założeń i uproszczeń. Szczegółowe wyników symulacji podane w rozprawie świadczą o znacznych uproszczeniach zastosowanych w tej metodzie, o czym świadczą między innymi podane rozkłady natężenie pola elektrycznego wzdłuż długości przęsła.
2) Metodę obliczania natężenia pola magnetycznego oparto o metodę odbić zwierciadlanych, rozkładzie impedancji (a w zasadzie reaktancji indukcyjnych własnych i wzajemnych linii) oraz prawo Biota-Savarta. Zastosowany sposób postępowania budzi pewne niejasności, dotyczące między innymi wieloznaczności wyników działań.
3) W rozprawie dokonywano optymalizacji, a w zasadzie minimalizacji, rozkładów natężenia pola elektrycznego i magnetycznego nad powierzchnią ziemi oraz nad ewentualnymi obiektami znajdującymi się obok linii. W większości przypadków uzyskano dużą redukcję wartości natężeń tych pól. Na podstawie przeprowadzonych badań osiągnięto redukcję wartości natężeń pól w głównym stopniu przez: zmianę kolejności faz, zmniejszenie zwisów przewodów oraz wprowadzenie przewodów redukcyjnych. Nie podano czy zaproponowane modyfikacje są realizowalne w sensie konstrukcyjnym (zwisy przewodów) oraz technicznym (zwiększenie wartości, zwłaszcza natężenia pola elektrycznego wokół przewodów

prowadzące do zwiększenia zjawiska ulotu oraz ze względu na konieczność symetryzacji impedancji linii).

Opiniujący oczekuje ustosunkowania się Doktoranta do tych uwag w trakcie publicznej dyskusji.

4. Uwagi szczegółowe

Niektóre szczegółowe uwagi szczegółowe podano również w punkcie 2 recenzji. Najwięcej uwag szczegółowych dotyczy poziomu edytorskiego rozprawy. Nie wpływają one znacząco na wartość merytoryczną rozprawy. Poniżej podaję przykładowe, istotne z merytorycznego punktu widzenie uwagi szczegółowe dotyczące opiniowanej rozprawy wg stron, na których występują i numerów wzorów:

1) Na rys. 2.14 błędnie oznaczono osie układu współrzędnych.
2) Symbole będące liczbami zespolonymi powinny być podkreślane, np. str. 37, 38 itd.
3) Prawo Biota-Savarta (36) zawiera błąd.
4) Zapis macierzowy (26) jest niepoprawny.
5) Ze względu na dyskretyzację w niektórych wyrażeniach, np. (18, 20, 21 itd.) całki powinny być zastąpione sumowaniem.
6) W parametrach linii jako potencjały przewodów zostały podane napięcia międzyfazowe linii (jako wartości zespolone), np. str. 44, 46 i dalsze. W rzeczywistości potencjały przewodów linii są napięciami fazowymi. Nie jest jasne co użyto do obliczeń.
7) We wzorze (45) występuje niezgodność wymiarów fizycznych.
8) W obliczeniach symulacyjnych nie uzasadniono użytej gęstości siatki numerycznej – str. 74. Nie podjęto próby oszacowanie błędów obliczeń wynikających z gęstości siatki.

5. Ocena rozprawy doktorskiej

Stwierdzam, że wybór tematyki rozprawy jest właściwy i nie budzi zastrzeżeń. Pewne zastrzeżenia budzi zbyt ogólnie sformułowana teza rozprawy. Układ i treść rozprawy stanowią logiczną całość. Z analizy treści rozprawy wynika jednoznacznie, że przeprowadzona optymalizacja rozkładów natężenia pola elektrycznego i magnetycznego pod liniami elektroenergetycznymi wysokich i najwyższych napięć (110, 220 i 400kV), jedno- i dwutorowych została wykonana prawidłowo, co stanowi potwierdzenie udowodnienia tezy podanej w rozprawie. Wyniki symulacji komputerowych zostały pozytywnie skonfrontowane z wynikami pomiarów w wybranych, rzeczywistych liniach elektroenergetycznych. W efekcie wykonanych badań uzyskano bardzo interesujące wyniki, które mogą przyczynić się do opracowania nowych, ulepszonych konstrukcji linii elektroenergetycznych wysokich i najwyższych napięć. Dlatego stwierdzam, że pomimo pewnych niedociągnięć, które podałem w punkcie 2 recenzji oraz w uwagach dyskusyjnych ogólnych i uwagach szczegółowych, opiniowana rozprawa może być uznana jako rozprawa doktorska. Cele postawione w rozprawie zostały osiągnięte. Opiniujący oczekuje od Doktoranta ustosunkowania się do podanych uwag w czasie publicznej dyskusji nad rozprawą. Stwierdzam, że Doktorant posiada wiedzę ogólną i predyspozycje niezbędne do prowadzenie pracy naukowej.

6. Wniosek końcowy

Mając na uwadze pozytywną ocenę rozprawy doktorskiej mgra inż. Krzysztofa Króla pt.: „Optymalizacja rozkładu natężenia pola elektrycznego i magnetycznego wokół napowietrznych linii elektroenergetycznych"" stwierdzam, że rozprawa ta spełnia wymagania Ustawy z 14 marca 2003 roku *„O stopniach naukowych i tytule naukowym oraz o stopniach i tytule w zakresie sztuki" (Dz. U. Nr 65, poz. 595 z późniejszymi zmianami)* ".

Uwzględniając powyższe stawiam wniosek o dopuszczenie rozprawy doktorskiej mgra inż. Krzysztofa Króla do publicznej obrony.

Kazimierz Jakubiuk