

dr hab. inż. Tomasz Szczegielniak
Wydział Elektryczny
Politechnika Częstochowska

RECENZJA

rozprawy doktorskiej Pana mgr inż. *Bogdana Perki* p.t.:
Metoda oceny wpływu temperatury na rezystancję przewodów elektrycznych

1. Wstęp

Niniejszą recenzję opracowano na zlecenie Rektora Uniwersytetu Technologiczno-Humanistycznego im. Kazimierza Pułaskiego w Radomiu z dnia 6 lipca 2020 roku zgodnie z **Ustawą z dnia 14 marca 2003 r.** (z późniejszymi zmianami) **o stopniach naukowych i tytule naukowym oraz o stopniach i tytule w zakresie sztuki.**

Rozprawa zawiera wykaz ważniejszych oznaczeń, wprowadzenie, sześć rozdziałów merytorycznych, podsumowanie i wnioski, spis literatury – 142 pozycje, w tym 1 własna i 4 współautorskie, dwa dodatki oraz spis równań, tabel i rysunków. Łącznie obejmuje 181 stron.

Rozdział pierwszy to wprowadzenie do tematyki zawartej w rozprawie. W rozdziale drugim Autor dokonuje analizy stanu wiedzy z zakresu wymiany ciepła w przewodach elektrycznych. Z kolei w rozdziale trzecim przedstawiony jest cel, teza naukowa i założenia badawcze rozprawy. W rozdziale czwartym zawarta jest koncepcja budowy modelu symulacyjnego przepływu ciepła w przewodach elektrycznych. Rozdział piąty to opis stanowiska badawczego. W rozdziale szóstym Autor przedstawił analizę wyników badań. Zaś w rozdziale siódmym przeprowadzona została weryfikacja modelu symulacyjnego.

Merytoryczna część rozprawy kończy się obszernym podsumowaniem i wnioskami – rozdział ósmy.

2. Tematyka rozprawy

Systemy zapewniające bezpieczeństwo pożarowe realizowane są za pomocą środków technicznych składających się na kompleksowy układ wczesnego wykrywania, ostrzegania i zwalczania pożarów. Systemy te funkcjonują w oparciu o szereg układów i instalacji elektrycznych zasilających m.in. obwody pomiarowe oraz sieci transmisji danych. Towarzysząca pożarowi temperatura powoduje nagrzewanie się izolacji oraz żyły przewodu. Wzrost temperatury izolacji powoduje przyspieszenie procesu erozji, a po przekroczeniu pewnych wartości dopuszczalnych następuje całkowita degradacja struktury izolacji. Miedziane żyły przewodzące nagrzewając się ulegają przyspieszonemu procesowi utleniania. Wzrost przekroju warstwy utlenionej powoduje zmniejszenie przekroju czynnego żyły, co z kolei wpływa na wzrost rezystancji przewodu a tym samym następuje zmniejszenie zdolności przesyłowych przewodu. Przekroczenie dopuszczalnych parametrów pracy przewodów, utrudnia prawidłową pracę odbiorników, co objawia się między innymi pracą

SEKRETARIAT WTE i I

Wpłynęło dnia... 2.09.2020

L.dz. 247



przy ich obniżonej sprawności. Modelowanie rozprzestrzeniania się ciepła w przewodach elektrycznych jest zatem zasadne z punktu widzenia:

- poprawy zdolności przesyłowych przewodów,
- pewności dostarczenia energii elektrycznej o określonej jakości,
- utrzymania parametrów materiałowych eksploatowanych przewodów.

W literaturze przedmiotu odnaleźć można, że od połowy ubiegłego wieku opracowywano modele przepływu ciepła w ciałach stałych zawierające rozwiązania równania przepływu ciepła opartego na prawie Fouriera. Rozwiązania te uwarunkowane są jednak przyjęciem określonych założeń upraszczających. W latach sześćdziesiątych XX wieku opracowany został model procesu cieplnego zakładający analogię między wielkościami używanymi w elektrotechnice a analogicznymi w sensie fizycznym w procesach cieplnych. Rozwój technik numerycznych przyczynił się do znacznego przyspieszenia metod obliczeniowych w technice cieplnej i elektrotechnice. Opracowane zostały między innymi numeryczne modele dla elektrycznej linii długiej, których rozwiązania można było przez analogię dopasować do przepływu strumienia ciepła w przewodach elektrycznych.

Możliwość zastosowania metody analogii cieplno-elektrycznych w badaniu procesu nagrzewania przewodów elektrycznych, została wykorzystana przez Autora niniejszej rozprawy, który jako cel swojej pracy doktorskiej przyjął opracowanie metody o parametrach rozłożonych nagrzewania się przewodu elektrycznego w zależności od czasu oddziaływania termicznego otoczenia, odległości od źródła ciepła oraz warunków zabudowy przewodu. Cel rozprawy doktorskiej został podzielony na dwa zasadnicze kierunki:

- pierwszy obejmuje rozważania teoretyczne zmierzające do opracowania metody opisującej funkcję $T(x,t)$ w przewodach elektrycznych uwzględniającą cechy materiałowe oraz warunki montażu przewodu,
- drugi, dotyczy opracowania metody badawczej oraz metody oceny wyników eksperymentu.

Na podstawie przeprowadzonej analizy literaturowej stanu zagadnienia, a także oceny potrzeb znajomości stanu cieplnego przewodów elektrycznych eksploatowanych w ekstremalnych warunkach termicznych, Autor rozprawy sformułował następującą tezę:

Możliwa jest ocena wpływu temperatury przewodów sieci zasilającej urządzenia gaszące pożar na zmiany rezystancji przewodów, na podstawie modelowania procesów cieplnych układami o parametrach rozłożonych.

Do realizacji celu pracy doktorskiej Autor wykorzystał rozwiązanie napięciowego równania różniczkowego znanego w elektrotechnice pod nazwą równań telegrafistów dla linii długiej. Opis zjawiska przepływu ciepła w przewodach elektrycznych dokonany został poprzez zastosowanie analogii cieplno-elektrycznych, wykorzystano przy tym metodę rozwiązania napięciowego równania różniczkowego opartą na parametrach rozłożonych. Analogia cieplno-elektryczna zastosowana przez Autora rozprawy polegała na zastąpieniu napięcia elektrycznego przez temperaturę, a parametry jednostkowe linii długiej takie jak rezystancja R oraz pojemność C zastąpiono oporem cieplnym i pojemnością cieplną przewodu. Układ cieplny przewodu zastąpiony został układem czwórnikowym zawierającym elementy skupione R oraz C , określające straty poprzeczne ciepła, a także straty wzdłuż osi przewodu. Tak zbudowany model zaimplementowano następnie do programu Matlab oraz przeprowadzono symulację, która wykazała zgodność uzyskanych przebiegów temperatury z analogicznymi rozwiązaniami przebiegów napięcia w linii długiej. Symulacja komputerowa została z kolei zweryfikowana za pomocą badań eksperymentalnych, przeprowadzonych na samodzielnie zaprojektowanym i zbudowanym stanowisku laboratoryjnym. Do badań wykorzystano trzy przekroje przewodów ognioodpornych bezhalogenowych oraz zastosowano trzy warianty zabudowy przewodów.

Przeprowadzone badania eksperymentalne i symulacyjne zawarte w recenzowanej rozprawie wykazały, m.in. że:

- metoda analogii cieplno-elektrycznej umożliwia wykorzystanie opisu obwodów elektrycznych do rozwiązywania zagadnień cieplnych w przewodach elektrycznych,
- metoda oparta na zastosowaniu teorii parametrów rozłożonych stosowana do rozwiązywania równań telegrafistów może zostać użyta jako model teoretyczny rozkładu temperatury w przewodach elektrycznych,
- ujęty w przedmiotowych normach podział długości przewodu będącego pod działaniem pola temperaturowego otoczenia, na strefę gorącą i zimną nie uwzględnia istnienia strefy pośredniej,
- nieuwzględnienie istnienia strefy pośredniej prowadzi do błędnego określenia spadku napięcia na przewodzie,
- znajomość rozkładu temperatury oraz wyznaczenie parametrów cieplnych przewodu, a także stałych czasowych procesu nagrzewania pozwoliły na obliczenie wzrostu rezystancji przewodu poddanego wpływowi zewnętrznego pola temperatury,
- przewody w otwartej zabudowie posiadają krótką strefę przejściową, a tym samym szybko się schładzają,
- przewody w izolacji cieplnej wolniej się nagrzewają, ale po nagrzaniu występują w nich dłuższa strefa przejściowa,
- przewody w zabudowie kanałowej nagrzewają się najdłużej ale występuje w nich najdłuższa strefa przejściowa spowodowana dużą pojemnością cieplną obudowy kanału,
- decydując o znaczeniu dla określenia wpływu zewnętrznego pola temperatury na rezystancję przewodów ma wartość temperatury oraz czas trwania procesu nagrzewania.

Zatem na podstawie badań symulacyjnych i eksperymentalnych zawartych w recenzowanej rozprawie można stwierdzić, że sformułowana w rozdziale trzecim teza naukowa została udowodniona.

Przedstawiona wyżej tematyka rozprawy ma istotne znaczenie z punktu widzenia teoretycznego jak i praktycznego. Dlatego też uważam, że jej wybór jest całkowicie uzasadniony. Jednocześnie tematyka ta obejmuje trudne i ciągle aktualne zagadnienie badania procesu nagrzewania przewodów elektrycznych.

3. Osiągnięcia naukowe rozprawy

Za zasadnicze osiągnięcia naukowe opiniowanej rozprawy uważam:

- Opracowanie własnej metodyki oceny stanu fizycznego przewodu poddanego działaniu temperatury o wartościach przekraczających poziomy dopuszczalne podczas normalnej eksploatacji.
- Zastosowanie metody analogii cieplno-elektrycznych w badaniu nagrzewania przewodów elektrycznych oraz opracowanie dwuwymiarowego modelu przepływu ciepła opartego na teorii parametrów rozłożonych. Należy podkreślić że w modelu zastosowano rozwiązanie równania różniczkowego Kelwina-Thomsona stosowanego do opisu linii długiej, jest to zatem oryginalny wkład naukowy Autora rozprawy w badanie zjawisk cieplnych w przewodach elektrycznych.
- Przeprowadzenie symulacji komputerowych wykazujących zgodność uzyskanych przebiegów teoretycznych z analogicznymi rozwiązaniami przebiegów napięcia w linii długiej.



- Dokonanie weryfikacji symulacji komputerowych za pomocą badań eksperymentalnych na samodzielnie zaprojektowanym i zbudowanym stanowisku laboratoryjnym.
- Przeprowadzenie pomiarów temperatury dla trzech przypadków zabudowy przewodu tj. w otwartym korycie kablowym, w izolacji termicznej oraz w zamkniętym kanale kablowym.
- Wykazanie, że ujęty w przedmiotowych normach podział długości przewodu będącego pod działaniem pola temperaturowego otoczenia na strefę gorącą i zimną nie uwzględnia istnienia strefy pośredniej.
- Wyznaczenie parametrów cieplnych tj. oporu cieplnego i pojemności cieplnej przewodów w różnych konstrukcyjnie zabudowach oraz określenie wartości stałych czasowych nagrzewania przewodów, których znajomość pozwoliła na określenie wzrostu rezystancji przewodów.
- Przedstawienie wyników badań które mogą posłużyć, jako wsparcie analizy oceny ryzyka zagrożenia pożarowego dla ludzi i budynków zarówno na etapie projektowania jak i eksploatacji już istniejących obiektów.
- Zaprezentowanie wniosków i wskazówek z których mogą skorzystać zarówno projektanci budowlani jak i pracownicy naukowci zajmujący się badaniami w zakresie bezpieczeństwa pożarowego instalacji elektrycznych.
- Wskazanie kierunków przyszłych badań dotyczących możliwości zastosowania nowych sposobów zabudowy konstrukcyjnej przewodów, zwiększających ich odporność ogniową bez pogarszania zdolności przesyłowych.

4. Uwagi ogólne i szczegółowe

Uwagi jakie nasunęły się mi w trakcie studiowania recenzowanej rozprawy są następujące:

- 4.1. Praca jest napisana poprawną polszczyzną. Ze względu na oryginalne podejście do modelowania rozprzestrzeniania się ciepła w przewodach elektrycznych, czyta się ją z zainteresowaniem, materiał przedstawiono w pracy w bardzo przystępnej formie a jego ujęcie nie budzi moich zastrzeżeń.
- 4.2. Zastosowana w pracy terminologia, oznaczenia i użyte symbole są w zasadzie prawidłowe. Jedyna wątpliwość jaka nasuwa się podczas studiowania pracy to użycie dużej litery C, którą Autor raz oznacza stałą Stefana-Boltzmana, innym razem pojemność elektryczną, a jeszcze innym razem pojemność cieplną lub też stałą całkowania.
- 4.3. W wykazie ważniejszych oznaczeń powinny być podane jednostki tym bardziej, że występujące w pracy parametry mogą być wielkościami wymiarowymi i bezwymiarowymi.
- 4.4. W pracy odnaleźć można wiele błędów typowo redakcyjnych m.in. takich jak: warunek brzegowy Naumana choć dobrze wiemy, że chodzi tutaj o warunek Neumana, czy też linia Tohmsona-Kelwina w której litera h zmieniła swoją rzeczywistą pozycję.
- 4.5. Inne drobne uwagi redakcyjne przekazałem Autorowi rozprawy.
- 4.6. Kolejnym niedopatrzeniem jaki nasuwa się podczas lektury pracy jest bibliografia, której kilka pozycji nie jest cytowane w tekście. Są to pozycje o numerach: 18, 52, 80, 119, 135, 137, 138 i 142.
- 4.7. W jednym z założeń zawartych w tezie rozprawy Autor zakłada, że współczynnik przewodzenia cieplnego k jest stałą materiałową nie zależną od temperatury. Czy założenie to nie jest zbyt silne? Czy nie możliwe jest wykonanie obliczeń temperatury przewodu elektrycznego metodą iteracyjną?



- 4.8. Z kolei w rozdziale czwartym, Autor wykonując symulację zakłada, że współczynniki dyfuzji cieplnej α materiałów przewodu są stałe w czasie i niezależne od temperatury. Czy w tym przypadku również nie zastosowano zbyt silnego uproszczenia?
- 4.9. Rysunek 6.1 w gruncie rzeczy jest tabelą, natomiast pierwsza kolumna tabeli 6.2 zawiera mało zrozumiałe określenia.
- 4.10. Na rysunkach 7.6, 7.7 i 7.8 Autor przedstawia krzywe zmian temperatury uzyskane z eksperymentu, poprzez aproksymację oraz z opracowanego modelu. Z punktu widzenia czytelnika interesujące jest to, że krzywe te na odcinku od 0 do 80 cm znacznie od siebie odbiegają. Czym zatem spowodowane są różnice pomiędzy tymi krzywymi?

5. Ocena rozprawy

Przedstawione w punkcie czwartym uwagi krytyczne i komentarze mają w większości charakter dyskusyjny i nie podważają mojej pozytywnej opinii o rozprawie. Sądzę, że wszystkie te uwagi zostaną wyjaśnione w trakcie publicznej obrony rozprawy.

Podtrzymuję moją opinię o osiągnięciach naukowych rozprawy przedstawioną w punkcie trzecim.

Podsumowując stwierdzam, że uzyskane wyniki udowadniają postawioną tezę i realizują cele rozprawy oraz stanowią jednocześnie istotne poszerzenie wiedzy z zakresu elektrotechniki. Uważam, że Autor rozprawy wykazał się dobrym przygotowaniem teoretycznym oraz umiejętnością samodzielnego formułowania i realizacji badań naukowych.

6. Wniosek końcowy

Stwierdzam, że rozprawa doktorska Pana mgr inż. Bogdana Perki p.t.: *Metoda oceny wpływu temperatury na rezystancję przewodów elektrycznych* stanowi oryginalny dorobek naukowy i w pełni spełnia wymagania obowiązującej ustawy o stopniach i tytule naukowym, dotyczące rozpraw doktorskich. Wnoszę o dopuszczenie jej do publicznej obrony.

T. Szczepiński