

Warszawa, 22.09.2020 r.

dr hab. inż. Marcin Wesołowski
Politechnika Warszawska
Instytut Elektroenergetyki
ul. Koszykowa 75
00-662 Warszawa

Recenzja rozprawy doktorskiej

mgra inż. Bogdana S. Perka

pt.: "Metoda oceny wpływu temperatury na rezystancję przewodów elektrycznych"
napisanej pod kierunkiem dra hab. inż. Dionizego Saniawy, prof. UTH Radom

1. Podstawa wykonania recenzji

Recenzję opracowano na podstawie pisma z dnia 06 lipca 2020 r., dotyczącego opracowania przez mnie recenzji rozprawy doktorskiej mgra inż. Bogdana Perki, zgodnie z Uchwałą nr 000-4/7/2020 Senatu Uniwersytetu Technologiczno - Humanistycznego im. Kazimierza Pułaskiego w Radomiu.

2. Tematyka rozprawy oraz wykorzystane narzędzia

Przedstawiona do recenzji praca dotyczy metod obliczania obciążalności prądowej przewodów energetycznych w warunkach występowania pożaru. Zagadnienia te rozpatrywano szczególnie pod kątem eksploatacji instalacji zasilających urządzenia do walki z pożarami, łącznie z konfrontacją procedur podanych w normach dotyczących tych zagadnień. Z uwagi na istotę zagadnień omówionych w pracy oraz niezbyt dużą liczbę publikacji ukierunkowanych *stricte* na omawiane problemy, podjętą tematykę uznaję za wartościową i aktualną.

W pracy skupiono się przede wszystkim na opracowaniu autorskiej procedury obliczeniowej, pozwalającej na wyznaczenie rozkładu temperatury przewodów w odpowiedzi na wymuszenie temperaturowe, zarówno w funkcji współrzędnej przestrzennej, jak i czasu. Wykorzystano modele analogowe typu nieciągła przestrzeń – ciągły czas (RC), w których wartości rezystancji odpowiadają oporom cieplnym (dzielącym obszar przewodu na podobszary), a pojemność odpowiada pojemności cieplnej. Modele takie rozwiązywano na drodze numerycznej. Podejście to jest słuszne i w swej istocie odpowiada modelowi linii długiej przy uproszczeniach wynikających z pominięcia indukcyjności oraz upływności, co w większości przypadków wymiany ciepła jest uproszczeniem niewnoszącym błędów w wynikach symulacji (oprócz szybkozmiennych pól temperatury występujących, na przykład przy analizie propagacji fali uderzeniowej). Na szczególną uwagę zwraca wykorzystanie funkcji *erfc* oraz badań modelu fizycznego, pozwalających na wprowadzanie do modelu



współczynników korekcyjnych, gwarantujących wysoką jakość i dokładność uzyskiwanych wyników. Takie rozwiązanie stanowi niewątpliwie autorski wkład w rozwój metod analizy zagadnień rozkładów temperatury w przewodach energetycznych i jest wartościowym czynnikiem stanowiącym o jakości recenzowanej pracy.

Recenzowana rozprawa ma przede wszystkim charakter obliczeniowy. Wykorzystywane modele i obliczenia obwodowe oraz polowe są współczesnymi metodami o uznanej użyteczności. Ich wykorzystanie nie budzi zastrzeżeń. Badania wybranych modeli fizycznych scharakteryzowano dość krótko, a wyniki wykorzystano do poprawy jakości obliczeń. Wykorzystane narzędzia i metody uznaje się za prawidłowe.

3. Charakterystyka struktury recenzowanej pracy

Przedstawiona Rozprawa liczy 149 stron formatu A4 i została przygotowana w formie dwustronnego wydruku. Dodatkowo, w formie numerowanych rozdziałów, załączono:

- dodatek A: wyniki symulacji temperatury żył przewodów;
- dodatek B: wartości transmitancji operatorowej przewodów;
- spis równań;
- spis tabel;
- spis rysunków;
- fotografie z przeprowadzonych badań.

W głównej części pracy znajduje się łącznie 75 rysunków (8 stron nienumerowanych rysunków znajduje się w dodatku A, 4 fotografie w dodatku stanowiącym rozdział nr 15). Powołano się na 142 źródła w postaci norm, książek, monografii, artykułów i źródeł internetowych. Manuskrypt podzielono na 15. rozdziałów, przy czym rozdziały 10 - 11 stanowią wykresy i wartości transmitancji nie zamieszczone w głównej części pracy (rozdziały 1 - 9). W rozdziałach 12 - 15 zamieszczono spis równań, tablic i rysunków oraz dodatkowe fotografie z przeprowadzonych testów (rozdz. 15). Przed rozdziałem 1 znajduje się streszczenie w języku angielskim oraz wykaz ważniejszych oznaczeń. Taki układ pracy nie budzi zastrzeżeń i jest zgodny z klasycznym dla tego rodzaju opracowań.

W rozdziale nr 1 Autor w sposób syntetyczny wprowadza czytelnika w zagadnienia stanowiące podstawę rozprawy. Rozdział ten, poza określeniem istoty pracy, stanowi swoiste streszczenie, w którym zaprezentowano podstawowe problemy rozwiązane w rozprawie. W rozdziale nr 2 dokonano analizy stanu wiedzy o procesie nagrzewania i wymiany ciepła, zwłaszcza w układach charakterystycznych dla przewodów energetycznych. Omówiono wpływ temperatury na parametry przewodów oraz ich cieplną degradację. Podano podstawowe prawa rządzące przewodzeniem ciepła w przewodach oraz zagadnienia konwekcyjnej i radiacyjnej wymiany ciepła w otoczeniu tych obiektów (odpowiadające za procesy nagrzewania lub chłodzenia, w zależności od warunków zewnętrznych). Podano

także podstawowe rodzaje oraz konfiguracje przewodów, które zostały poddane analizom w dalszej części Rozprawy. Dużą uwagę poświęcono również metodom rozwiązywania zagadnień brzegowych wymiany ciepła. Wiadomości zaprezentowane w rozdziale nr 2 uznaję za wartościowe i potrzebne w celu wykazania prawidłowości metod wykorzystanych do realizacji celu niniejszej pracy.

Po wprowadzeniu oraz przeglądzie literaturowym, szeroko zaprezentowano cel, tezę oraz strukturę pracy. Taki porządek początkowych rozdziałów jest prawidłowy i pozwala na szybką weryfikację istoty podjętych prac na tle rozwiązań istniejących.

Zagadnienia merytoryczne prezentowane są od rozdziału nr 4, w którym szeroko opisano koncepcję oraz model symulacyjny procesu przepływu ciepła w przewodach elektrycznych. Uwzględniono i omówiono wszystkie sposoby przepływu ciepła, zarówno w stanie stacjonarnym, jak i nieustalonym. Dodatkowo zaprezentowano proces analogowania oraz możliwości wykorzystywania zależności charakterystycznych dla linii długiej do obliczeń zagadnień termokinetycznych. W rozdziale nr 4 szeroko opisano również autorską metodę wykorzystującą funkcję *erfc* do modelowania rozkładu temperatury, łącznie z algorytmem aproksymacji danych pomiarowych metodą Levenberga - Marquadta.

W rozdziale nr 5 zaprezentowano konstrukcję autorskiego stanowiska pomiarowego pozwalającego na pomiar rzeczywistych rozkładów temperatury w przewodach elektrycznych. Źródło pożaru symulowano przy wykorzystaniu nagrzewnicy indukcyjnej, z możliwością kontroli temperatury w strefie grzejnej o długości 30 cm. Rozkłady temperatury na długości przewodów mierzono przy wykorzystaniu 14. termoelementów typu K, rejestrowano i archiwizowano w pamięci komputera.

Rozdział nr 6 stanowi rozszerzone sprawozdanie z badań praktycznych. Dokonano prezentacji osiągniętych wyników, zarówno w stanach ustalonych, jak i nieustalonych. Dokonano również obliczeń podstawowych parametrów dynamicznych badanych przewodów: czasu opóźnienia i stałej czasowej. Dzięki określeniu tych parametrów możliwe było dokonanie opisu obiektów przy wykorzystaniu odpowiedniej funkcji przejścia.

Wyniki pomiarów praktycznych wykorzystane zostały do weryfikacji modelu symulacyjnego, co stanowi treść rozdziału nr 7. Wyznaczono impedancje odcinków kabli, co pozwoliło na wykonanie obliczeń oraz dokonanie porównania wyników uzyskanych na drodze eksperymentu fizycznego oraz analiz numerycznych (autorskich w obu przypadkach). Na podstawie rozkładu temperatury, wyznaczonych impedancji, możliwe było dokonanie analiz spadku napięcia oraz wzrostu rezystywności przewodów w warunkach pożaru. Rozpatrzono trzy główne przypadki, w których przewody umieszczane były w różnych warunkach otoczenia (koryta kablowe otwarte, izolacja cieplna niepalna oraz kanał kablowy). Dla wszystkich przypadków wyznaczono charakterystyczne wartości pozwalające na ocenę maksymalnej obciążalności oraz odpowiedź na pytanie, czy i w jakim czasie dane rozwiązanie gwarantuje niezakłóconą pracę urządzeń do zwalczania pożaru.

W rozdziale nr 8 zaprezentowano podsumowanie i wnioski z wykonanych zadań. Zawartość dalszych rozdziałów zaprezentowano na początku niniejszej części recenzji.

Strukturę recenzowanej pracy oceniam jako prawidłową. Stanowi ona jednolitą całość. Poszczególne rozdziały oraz prezentowane w nich informacje kształtują odpowiednią dynamikę i znajdują się w odpowiednich miejscach. Umieszczenie większości wyników w załącznikach oceniam również jako rozwiązanie prawidłowe. Nadmiar wyników w głównym tekście pracy niepotrzebnie przesłaniałby jej istotę. Pewną niedogodność budzi sposób prezentacji wykazu literatury. Umieszczenie źródeł w kolejności alfabetycznej (a nie w kolejności cytowań) nieco utrudnia analizę, czy wszystkie przytoczone źródła były cytowane w tekście manuskryptu.

4. Uwagi dotyczące strony formalnej oraz językowej rozprawy

Pod względem językowym praca przygotowana została na bardzo wysokim poziomie. Autor w sposób prawidłowy formułuje zdania oraz używa języka technicznego. Pewne uwagi dotyczyć mogą jedynie nieformalnego wymogu, by czasowniki prezentowane były w formie bezosobowej czasu przeszłego. W pracy pojawiają się czasami wtrącenia typu " ... na podstawie obliczeń otrzymaliśmy ...". Nie oceniam tego jednak jako błąd. W bardzo nielicznych miejscach wkradły się sformułowania uznawane za potoczne, bądź nieprecyzyjnie definiujące prezentowaną treść:

4.1 - str. 24, cel pracy: "celem pracy jest: opracowanie metody o parametrach rozłożonych nagrzewania się przewodu w ..." - nasuwa się skojarzenie, że celem jest opracowanie metody grzejnej, co oczywiście jest błędem - chodzi tylko o metodę analizy nagrzewania się przewodu.

4.2 - str. 94, 12 wiersz: "Wyniki obliczeń są powtarzalne i niż w poprzednich ..." styl!

4.3 - str. 94, 15 wiersz i wiele innych " ... temperatura żył przewodu w stanie ustalonym w funkcji czasu ..." - czy Autor nie uważa, że stan ustalony i funkcja czasu nie są tożsame. Bardzo proszę o wyjaśnienie.

4.4 - str. 105, 106 i in.: Autor przy omawianiu wyników w stanie ustalonym stwierdza, że w funkcji od odległości od źródła ciepła przewód o danych wymiarach "najszybciej nagrzewa się" lub "najszybciej wychładza się".

W pracy pojawiają się także nieprecyzyjne definicje niektórych wykorzystywanych wielkości:

4.5 - str. 10 - wielkość q [Wm^{-2}] definiowana jest jako "strumień energii cieplnej". Zazwyczaj jest to gęstość strumienia cieplnego. Strumień cieplny wyrażany jest w W .

4.6 - str. 25 - poz. 10 "współczynnik przewodnictwa cieplnego .." - chodzi o przewodność cieplną właściwą;

4.7 - str. 40 - tabela 4.2. "współczynnik przewodność cieplnej k " - czy chodzi o przewodność cieplną właściwą ?;

4.8 - str. 40 - tytuł podrozdziału 4.5.1. "Współczynnik dyfuzji ciepłej" - czy chodzi o dyfuzyjność cieplną (pojęcie to zostało użyte na tej samej stronie, a właśnie dyfuzyjność cieplna jest terminem obowiązującym).

* Nie są to jednak uchybienia liczne i w żaden sposób nie rzutują na pozytywnej ocenie pracy od strony językowej.

Od strony formalnej, stwierdzam, że praca przygotowana jest prawidłowo, choć niezbyt starannie. Pojawia się pewna liczba błędów w stosowanych oznaczeniach, powołań na błędne rysunki oraz zależności. Szczegółowe uwagi odnoszące się do formalnej oceny pracy zestawiono poniżej:

4.9 - uwaga ogólna: Właściwe jest prezentowanie treści rysunku lub wzoru po powołaniu się na niego w tekście. W pracy nie zawsze zasada ta została zachowana.

4.10 - str. 12, wiersz 12: "przekształcając obustronnie równanie (2.9)" - chodzi o równanie (2.10);

4.11 - str. 12, (2.11) - po prawej stronie równania brak pochodnej temperatury po czasie;

4.12 - str. 15 - po [98] brak kropki;

4.13 - str. 29 - tab. 4.1. - tempo wzrostu temperatury oznaczono jako dQ/dt - powinno być dT/dt ;

4.14 - str. 36 i 37 - wielkości k , l , t oraz T oznaczono w konwekcji charakterystycznej dla wektorów;

4.15 - str. 42, akapit nr 3 pod tabelką: "... powstającej przy nagrzewaniu i przepływu ciepła ..." - powinno być przepływowi;

4.16 - str. 45 - pod wzorem (4.5) - czy temperatura w zależności Plancka nie powinna być wyrażona w skali Kelwina?

4.17 - str. 45 - przy definicji stałej Stefana - Boltzmanna nie potrzebnie pozostawiono kropkę w jednostce watów;

4.18 - str. 46 - akapit pod wzorem (4.9) - czy mówienie o dwóch powierzchniach równoległych wypukłych jest prawidłowe? Moim zdaniem w omawianym przypadku obowiązuje system powierzchni wypukłej zamkniętej w otaczającej ją powierzchni wklęsłej. Jest to o tyle istotne, że powierzchnia wklęsła może ulec samonapromieniowaniu.

4.19 - str. 51 - na rys. 4.10 widzimy 4 rodzaje materiałów, a w odpowiadającym modelu RC tylko 3. Czy oznaczenia na schemacie obwodowym są prawidłowe, czy też w punkcie "0" powinien być p. "A", co sugerowałoby założenie nieskończenie wielkiej dyfuzyjności żyły roboczej?

4.20 - str. 53 - zależności (4.37) i (4.38) powinny być uzupełnione o symbole u oraz i po lewej stronie;

4.21 - str. 89/90 - "Stała czasowa ... określa czas, po którym obiekt po zmianie wywołanej przez sygnał wymuszający osiągnie nowy stan ustalony. ..." - to nie jest definicja stałej czasowej.

4.22 - str. 100 - akapit nr 2 - "Stałe czasowe określone w tabeli 6.1" - w tej tabeli nie ma stałych czasowych;

4.23 - str. 107 - pomiędzy wartością liczbową i jednostką miary należy zastosować odstęp (poza °);

4.24 - str. 113 - akapit 1: "Na rysunku 7.2 pokazana została autorska metoda ..." - na rysunku 7.2 widoczne są wyniki symulacji a nie metoda;



4.25 - str. 129 - pierwsze zdanie - "Wyniki Obliczeń ..." ;

Pomimo pewnej liczby uchybień, poziom przygotowania pracy oceniam pozytywnie. Większość z wyszczególnionych w recenzji błędów nie wpływa na jakość prezentowanych rozważań i prawdopodobnie powstała na etapie ostatecznego formatowania tekstu przed wydrukiem.

5. Merytoryczna ocena pracy

Pod względem merytorycznym przedstawioną rozprawę oceniam jako wartościową i aktualną. Autor podjął się zadania opracowania metody obliczeniowej pozwalającej na ocenę obciążalności przewodów elektrycznych w warunkach pożaru. Podwyższona temperatura żył prowadzi do wzrostu rezystancji miedzi, co z kolei ogranicza prąd (przy wymuszeniu napięciowym) przepływający do obciążenia. Zagadnienie to jest bardzo istotne, z punktu widzenia funkcjonowania urządzeń przeznaczonych do zwalczania pożarów. Zgodnie z zaprezentowanymi podstawami, całkowita wartość impedancji przewodów jest funkcją:

- rozkładu temperatury w funkcji długości przewodu;
- czasu nagrzewania oraz temperatury w miejscu występowania pożaru;
- rodzaju przewodu (przekrój części roboczej, rodzaj i grubość izolacji itp.);
- otoczenia, w jakim został umieszczony przewód (koryto kablowe, podtynkowo, w izolacji cieplnej).

Ze względu na znaczną liczbę analizowanych czynników, rozwiązany przez Autora problem charakteryzuje się wysokim stopniem komplikacji. Na szczególną uwagę zasługuje fakt oryginalności przyjętej metodyki badawczej. Autor opracował metodę obliczeniową, pozwalającą na szybką ocenę rozkładu temperatury w analizowanych przewodach energetycznych, zarówno w dziedzinie czasu, jak i w funkcji długości przewodu (model jednowymiarowy). Nie zastosował jednak powszechnie wykorzystywanych programów typu MES, lecz metodę analogii termokinetyczno - elektrycznej. Do rozwiązania zagadnienia brzegowego z dziedziny termokinetyki wykorzystana została autorska metoda bazująca na wykorzystaniu uzupełniającej funkcji błędu (*erfc*). Zastosowano model z możliwością "uczenia" poprzez uwzględnianie wyników badań eksperymentalnych. Warto zaznaczyć, że do wykonania takich badań, Autor opracował i wykonał stanowisko pomiarowe. Na podstawie badań oraz, po wprowadzeniu wyników do modelu, otrzymał wysoką dokładność, pozwalającą na prognozowanie obciążalności przewodów elektrycznych poddawanych oddziaływaniu wysokiej temperatury.

Zaprezentowane Autorskie rozwiązania stanowią zatem oryginalną metodę obliczeniową. Wykorzystana ciekawa procedura wykorzystująca analogię oraz funkcję błędu, stanowi oryginalny wkład Autora w rozwój elektrotechniki. Jest to rozwiązanie nowe, wykorzystujące możliwość "nauczania" celem zwiększenia dokładności obliczeń.

Pomimo wysokiego poziomu merytorycznego rozprawy, recenzent wnosi pewną liczbę uwag, z prośbą o odniesienie się do nich:

5.1. - str. 10, akapit 2: "Przewodzenie ciepła zachodzi w ciałach, w których nie jest możliwe przemieszczanie się cząstek (ciała stałe)". Czy oznacza to, że w płynach przewodzenie nie zachodzi?

5.2. - str. 10 i 11 - w zależności (2.1), (2.3), (2.5) itd.- jako Q oznaczono strumień cieplny. W równaniu 2.1 oraz 2.3 strumień wyrażony jest w watach. Czy jednostką w równaniu 2.5 jest także [W]?

5.3. str. 35 - stwierdzono, że "Straty wzdłużne nie zależą od warunków środowiskowych ..." Stwierdzenie to słuszne jest dla modeli liniowych. W innych przypadkach lokalne straty ciepła wpływają na parametry materiałowe przewodu.

5.4. str. 38 - p. 16 - założono, że źródło ciepła wytwarza stałe pole temperatury przez cały czas trwania eksperymentu. Oznacza to, że od początku występuje stan ustalony. W przeciwnym przypadku pole temperatury zmienia się w czasie. Bardzo proszę o krótkie wyjaśnienie tego stwierdzenia.

5.5. - str. 47 - 48 - analizie poddano proces przewodzenia ciepła przez izolację elektryczną (cylindryczną) przewodu. Dlaczego zatem zastosowano Laplasjan charakterystyczny dla układu kartezjańskiego, dodatkowo w jednym wymiarze?

5.6. str. 55 - proszę sprawdzić poprawność zależności (4.53) oraz (4.54).

5.7. str. 59 - 62 - Autor analizie poddał model linii długiej do obliczeń procesu nagrzewania przewodów. Na rysunku 4.15 zaprezentowano pełny model linii długiej z uwzględnieniem jednostkowej rezystancji, pojemności, indukcyjności i upływności. Następnie Autor zdecydował się na uproszczenie, analizując jedynie rezystancję oraz pojemność. Jest to klasyczny model Beukena i jego stosowalność nie budzi zastrzeżeń. Tym niemniej, wykonując model jednowymiarowy, Autor wskazał, że opór cieplny (domyślam się, że w kierunku osiowym) modelowany jest rezystancją, a poprzeczne straty ciepłne - pojemnością. Bardzo proszę o wyjaśnienie przyjętego rozwiązania, ponieważ pojemność nie jest miarą strat.

5.8 - str. 70 - wiersz 3 i 2 od dołu strony - Autor stwierdza, że "Miejsce nacięcia izolacji elektrycznej można łatwo zaizolować materiałem o takich samych właściwościach ..." - nie jest to zadanie łatwe, tym bardziej w przypadku izolacji wielowarstwowej. Proponuję, by Autor wyjaśnił, w jaki sposób wykonano tę izolację, by w jak najmniejszy sposób zaburzyć rozkład temperatury w badanym obszarze.

5.9 - str. 75 - w ostatnim akapicie Autor wspomina, że "wykorzystywana była struktura regulatora dwustawnego odwrotnego, w którym wykorzystywane jest jedno wyjście z algorytmem regulacji PID...". Zazwyczaj regulator PID kojarzony jest z regulacją ciągłą. Bardzo proszę o wyjaśnienie podanego sformułowania. Oczywiście PID może być realizowany przy wykorzystaniu, choćby PWM. Tym niemniej, w prezentowanych zagadnieniach, w odniesieniu do jakości regulacji, istotny jest czas impulsowania w stosunku do stałej czasowej obiektu regulacji.

5.10 - str. 83 - stwierdzono, że podczas pomiaru, temperatura otoczenia nie zmieniała się znacząco i wynosiła 22,2°C. Wartość ta nie jest potwierdzona wynikami widocznymi na rys. 5.12.

5.11 - str. 98 - 100 - wyznaczone stałe czasowe są odmienne od typowych rozważań teoretycznych - w przypadkach rozpatrywanych w Rozprawie - przewody o większych przekrojach - charakteryzowały się mniejszymi stałymi czasowymi. Zagadnienie to wymaga szerszego komentarza, ponieważ stoi ono w sprzeczności (na pozór) z prawami wymiany ciepła.

6. Podsumowanie

Mgr inż. Bogdan Perka wykazał się odpowiednią wiedzą w zakresie elektrotechniki, wymiany ciepła, tworzenia autorskich modeli obliczeniowych, planowania i wykonywania eksperymentów fizycznych oraz trafnej interpretacji wyników. Wymienione w recenzji krytyczne uwagi mają w większości charakter marginalny lub też, w przypadku uwag merytorycznych, można z nimi polemizować. Dlatego też sugestie i uwagi nie zmieniają mojej pozytywnej opinii o pracy. Przedłożona rozprawa doktorska spełnia warunki określone w art. 13 ust. 1 Ustawy o z dnia 14.03.2003 r. o stopniach i tytule naukowym oraz stopniach i tytule w zakresie sztuki (Dz. U. z 2015 r. poz. 249) (zwanej dalej Ustawą), tj.:

- stanowi oryginalne rozwiązanie problemu naukowego jakim jest opracowanie autorskiej procedury obliczeniowej pozwalającej na ocenę parametrów (głównie impedancji) przewodów elektrycznych w warunkach występowania pożaru;
- wykazuje ogólną wiedzę teoretyczną Doktoranta w dyscyplinie Automatyka, Elektronika i Elektrotechnika;
- potwierdza umiejętność Doktoranta w zakresie samodzielnego prowadzenia pracy naukowej, łącznie z budową stanowisk pomiarowych, planowaniem i realizacją eksperymentów.

Reasumując, stwierdzam, że recenzowana rozprawa doktorska mgra inż. Bogdana Perki pt. spełnia wymogi stawiane rozprawom doktorskim w Ustawie. Wniosuję do Rady Dyscypliny Automatyki, Elektroniki i Elektrotechniki Uniwersytetu Techniczno - Humanistycznego o jej dopuszczenie do publicznej obrony.

Wesołowski

