

Koszalin, 21 marca 2019 roku

dr hab. inż. Robert Suszyński, prof. PK
Wydział Elektroniki i Informatyki
Politechnika Koszalińska
ul. Śniadeckich 2, 75-453 Koszalin

Recenzja rozprawy doktorskiej mgr. inż. Krzysztofa Górskiego
pt.: "Nieliniowy elektrotermiczny model transformatora impulsowego stosowanego
w elektronicznych układach zasilających"

Przedmiotem recenzji jest rozprawa doktorska Pana mgr. inż. Krzysztofa Górskiego pt. „Nieliniowy elektrotermiczny model transformatora impulsowego stosowanego w elektronicznych układach zasilających”. Promotorem rozprawy jest Pan prof. dr hab. inż. Krzysztof Górecki, a promotorem pomocniczym Pani dr inż. Kalina Detka.

Przedstawiona do oceny rozprawa doktorska dotyczy problematyki modelowania zjawisk termicznych w transformatorach impulsowych, znajdujących szerokie zastosowanie w impulsowych układach zasilających urządzeń elektronicznych. Dynamiczny rozwój elektroniki, dążenie do miniaturyzacji, mobilności i niskiej ceny współczesnych układów elektronicznych wykorzystywanych we wszystkich dziedzinach życia człowieka sprawiają, iż gwałtownie rosną wymagania również na układy zasilania. Powoduje to duże zainteresowanie projektantów przetwornicami dc-dc, które są szeroko stosowane w układach zasilających, z uwagi na ich dużą sprawność energetyczną, małe wymiary i ciężar. Szczególnie istotnym, pod względem masy i gabarytów przetwornic, jest transformator impulsowy. Współcześnie projektowanie układów elektronicznych w dużym stopniu jest procesem zautomatyzowanym. Wysiłek projektowy przesuwają się w kierunku określenia kryteriów i parametrów, które ma realizować analizowane rozwiązanie, a wiedza ekspercka projektanta jest wykorzystana do budowy narzędzi wspomagających etapy projektowe, w celu udoskonalenia i usprawnienia modeli. Obecnie proces analizy i projektowania układów elektronicznych jest powszechnie wspierany programami komputerowymi wykorzystującymi symulacje, które wymagają modeli wszystkich elementów analizowanych układów. Programy symulatorów układów elektronicznych, mogą wspierać proces projektowania tylko wtedy, gdy z ich pomocą uzyskujemy prawidłowe wyniki zgodne z rzeczywistymi parametrami układów. W tym celu opracowywane modele muszą uwzględniać wszystkie istotne zjawiska zachodzące w każdym z elementów układu elektronicznego, a jednocześnie powinny wykazywać prostotę obliczeniową, aby umożliwić uzyskanie wyników obliczeń w akceptowalnym czasie. W literaturze dotyczącej modelowania i analizy impulsowych układów zasilających, elementy indukcyjne, w tym transformatory, zwykle modeluje się za pomocą idealizowanych modeli liniowych, które pomijają nieliniowe właściwości tych elementów, związane ze zjawiskami termicznymi występującymi w uzwojeniach i rdzeniach ferromagnetycznych. Z uwagi na powyższe, niezwykle istotne jest opracowanie nowych, ulepszonych modeli uwzględniających większą gamę zjawisk, w tym zjawiska termiczne. W tym świetle podjęcie się przez Doktoranta tematyki modelowania zjawisk cieplnych w rdzeniach ferromagnetycznych oraz transformatorach należy do zdań ważnych, aktualnych i jest w pełni uzasadnione naukowo.

Przedstawiona do recenzji dysertacja jest podzielona na 13 rozdziałów, zawiera 101 stron tekstu i 11 stron dodatków. Została zilustrowana rysunkami i tabelami, zawiera 126 pozycji literatury. W tej liczbie znajduje się 13 pozycji współautorskich związanych bezpośrednio z tematyką ocenianej pracy, z których w 5 pracach Doktorant jest pierwszym autorem. Rozdział pierwszy zawiera wprowadzenie, przedstawia cele i tezę pracy. Rozdziały od drugiego do ósmego zawierają rozważania teoretyczne

dotyczące omawianych zagadnień. W rozdziałach od dziewiątego do dwunastego Autor zaproponował nieliniowy model termiczny transformatora impulsowego uwzględniającego nieliniowość zjawisk cieplnych oraz jego implementację w programie SPICE. W rozdziale trzynastym Doktorant podsumowuje rezultaty osiągnięte w pracy. Praca kończy się spisem literatury oraz dodatkiem zawierającym opracowany elektrotermiczny nieliniowy model transformatora w formacie SPICE, zestawienie wyników pomiarowych i parametrów magnetycznych badanych elementów.

W rozdziale pierwszym Doktorant wprowadził w zagadnienia związane z modelowaniem transformatorów impulsowych uwzględniających wzajemne oddziaływanie zjawisk elektrycznych, magnetycznych oraz cieplnych. Przedstawił aktualny stan wiedzy odwołując się do obszernej bibliografii obejmującej monografie, artykuły w czasopismach oraz publikacje konferencyjne, polsko- i angielskojęzyczne. Autor uzasadnił potrzebę opracowania dokładniejszych modeli transformatorów uwzględniających wpływ samonagrzewania na jego parametry oraz określił cel i tezę pracy. Celem pracy, przedstawionym na stronie 9, jest zbadanie wpływu zjawisk cieplnych na parametry elektryczne, magnetyczne oraz termiczne transformatorów impulsowych, opracowanie i weryfikacja doświadczalna elektrotermicznego modelu transformatora uwzględniającego wpływ materiałów użytych do jego budowy oraz konstrukcji mechanicznej, na jego zaciskowe charakterystyki elektryczne oraz nieliniowość zjawisk odpowiedzialnych za rozpraszanie ciepła generowanego w tym elemencie. Następnie Doktorant przedstawił tezę pracy: „Możliwe jest sformułowanie skupionego nieliniowego elektrotermicznego modelu transformatora impulsowego umożliwiającego wyznaczenie zaciskowych napięć i prądów tego elementu oraz temperatury rdzenia i każdego uzwojenia przy uwzględnieniu zjawisk elektrycznych, magnetycznych i termicznych zachodzących w tym elemencie oraz uwzględnieniu wpływu właściwości materiałów użytych do budowy transformatora, jego rozmiarów geometrycznych oraz sposobu jego uzwojenia”.

Rozważania teoretyczne oraz prace badawcze związane z osiągnięciem celu i udowodnieniem tezy Doktorant przedstawił w kolejnych rozdziałach dysertacji. W rozdziale drugim Autor opisał typowe rozwiązania konstrukcyjne transformatorów impulsowych, skupiając się na transformatorach z rdzeniem kubkowym, toroidalnych i planarnych. Następnie w rozdziale trzecim przeanalizował modele transformatorów opisane w literaturze przedmiotu, począwszy od modelu idealnego pomijającego wszystkie straty i zjawisko samonagrzewania, kończąc na modelach elektrotermicznych zakładających stały współczynnik sprzężenia cieplnego między rdzeniem a uzwojeniami, które również nie uwzględniają zróżnicowania temperatur uzwojeń. W rozdziale czwartym Doktorant rozwinął zagadnienie modelowania transformatora impulsowego, przywołując jego modele termiczne opisane w literaturze oraz przeanalizował czynniki wpływające na nieliniowość jego charakterystyk magnetycznych i termicznych. Wadą zaprezentowanych w tym rozdziale modeli jest fakt, iż nie uwzględniają one zróżnicowania temperatur uzwojeń, nieliniowości zjawisk termicznych, ani sprzężeń termicznych występujących między elementami transformatora, które to problemy Autor rozwiązał w zaproponowanym przez siebie modelu termicznym, opisanym w kolejnych rozdziałach. W mojej ocenie rozdziały drugi, trzeci i czwarty mogły być zredagowane i połączone razem, z uwagi na ich przeglądowy i czysto teoretyczny charakter oraz to, że odwołują się do tych samych zagadnień, jedynie prezentowanych w innym ujęciu.

W rozdziale piątym opisano konstrukcje badanych transformatorów impulsowych, a w rozdziale szóstym Autor zaprezentował metodę wyznaczania rozkładu temperatury w takich transformatorach. Przedstawił też wybrane wyniki badań doświadczalnych ilustrujących wpływ rozmiarów, materiału rdzenia transformatora, jego ustawienia oraz warunków zasilania na nierównomierność rozkładu temperatury na jego powierzchni. W rozdziale siódmym opisano postać skupionego modelu termicznego transformatora, uwzględniającego zróżnicowanie temperatury rdzenia i każdego z uzwojeń. Rozpatrywany liniowy model termiczny transformatora charakteryzuje się tym, że skuteczność odprowadzania ciepła nie zależy od żadnych czynników.

Oryginalny dorobek Autora został przedstawiony w rozdziałach od ósmego do dwunastego rozprawy doktorskiej. W rozdziale ósmym Doktorant opisał projekt i konstrukcję układu pomiarowego do

wyznaczania charakterystyk elektrycznych, magnetycznych i termicznych transformatora impulsowego, w szerokim zakresie zmian częstotliwości, amplitudy i kształtu sygnału wejściowego. Przedstawione zostały również wybrane wyniki pomiarów charakterystyk elektrycznych analizowanych transformatorów oraz ocena dokładności zastosowanych metod pomiarowych. Uzyskane rezultaty pokazały, iż przebiegi przejściowych impedancji termicznych zmieniają się wraz z mocą wydzielaną w poszczególnych elementach transformatora, co pozwoliło Autorowi na sformułowanie wniosku, iż celowe jest opracowanie nieliniowego modelu termicznego transformatora, który został przedstawiony w rozdziale dziewiątym. Zaproponowany przez Doktoranta model uwzględnia nieliniowość zjawisk odpowiedzialnych za odprowadzanie ciepła oraz sprzężenia termiczne między wszystkimi elementami składowymi transformatora. Opracowany nieliniowy model termiczny transformatora ma postać dedykowaną dla programu SPICE. Model uwzględnia zróżnicowanie wartości temperatury rdzenia i wszystkich uzwojeń transformatora, które są wynikiem zjawiska samonagrzewania, tych komponentów i wzajemnych sprzężeń termicznych. W oparciu o wyniki pomiarów oraz dla uproszczenia modelu Autor przyjął, że zmiany wartości mocy wydzielanej w poszczególnych komponentach transformatora wpływają tylko na wartości rezystancji termicznych występujących w modelu termicznym, natomiast pojemności cieplne nie zależą od tej mocy. W celu weryfikacji poprawności i praktycznej przydatności zaprezentowanego modelu wykonano pomiary i obliczenia czasowych przebiegów temperatury komponentów transformatora planarnego oraz transformatorów toroidalnych, które zostały zaprezentowane i omówione na Rys. od 9.2 do 9.8. Doktorant zestawiał wyniki obliczeń wykorzystujących autorski nieliniowy elektrotermiczny model transformatora z wynikami pomiarów, co pozwoliło na stwierdzenie, że zapewnia on lepszą zgodność z wynikami pomiarów niż modele dotychczas stosowane. Przedstawione wyniki obliczeń i pomiarów świadczą również o tym, że moc rozpraszana w elementach transformatora wpływa głównie na rezystancję termiczną, a jej wpływ na pojemność cieplną może być pominięty. Ponadto uzyskane w wynikach różnice między wartościami temperatury poszczególnych komponentów transformatora osiągają nawet 50°C, co uzasadnia stosowanie w modelu termicznym różnych temperatur każdego uzwojenia i rdzenia transformatora. Zaproponowany model umożliwia uzyskanie dobrej zgodności między wynikami obliczeń i pomiarów w szerokim zakresie zmian amplitudy mocy wydzielanej w uzwojeniach lub w rdzeniu badanych transformatorów.

W rozdziale dziesiątym Doktorant zaproponował autorski nieliniowy elektrotermiczny model transformatora impulsowego, w którym uwzględniono dodatkowo właściwości elektryczne rdzenia, wzajemne sprzężenia termiczne pomiędzy wszystkimi komponentami transformatora oraz nieliniowość procesu chłodzenia transformatora. Model oparty jest o zmodyfikowany model elektrotermiczny przedstawiony w pracy doktorskiej M. Godlewskiej pt. „Modelowanie zjawisk cieplnych w transformatorach stosowanych w tranzystorowych przetwornicach dc-dc”, AM w Gdyni 2017, który jest z kolei rozwinięciem klasycznego modelu Jilesa-Athertona. Zaproponowany model należy do grupy skupionych modeli elektrotermicznych, umożliwia obliczenie napięć i prądów na zaciskach modelowanego transformatora oraz temperatury wnętrza jego rdzenia i każdego z uzwojeń. Ma postać podukładu, składa się z trzech bloków: modelu rdzenia, modelu uzwojeń oraz nieliniowego modelu termicznego i jest dedykowany dla programu SPICE. W stosunku do poprzednich modeli, Autor dodatkowo uwzględnił elementy opisujące właściwości elektryczne rdzenia przy przyłożeniu do niego zewnętrznego pobudzenia elektrycznego.

W rozdziale jedenastym przedstawiono metody wyznaczania wartości parametrów zaproponowanego nieliniowego elektrotermicznego modelu transformatora, co umożliwia jego praktyczne zastosowanie. Wyznaczane parametry obejmują parametry magnetyczne, (określające właściwości rdzenia ferromagnetycznego), elektryczne (określające rezystancje szeregowo uzwojeń) oraz termiczne (opisują skuteczność odprowadzania ciepła generowanego w elemencie). Dane o wartości parametrów materiałów ferromagnetycznych oraz o wartości parametrów geometrycznych rdzeni używanych w konstrukcjach transformatorów impulsowych są dostępne w danych katalogowych producentów, natomiast część parametrów modelu wymaga zmierzenia charakterystyk i parametrów eksploatacyjnych transformatorów impulsowych w szerokim zakresie częstotliwości i temperatury

w opisanym w rozdziale ósmym stanowisku pomiarowym. Odpowiednia procedura estymacji tych parametrów została szczegółowo omówiona w rozdziale jedenastym.

W rozdziale dwunastym przedstawiono wyniki weryfikacji doświadczalnej poprawności nieliniowego elektrotermicznego modelu transformatora dla różnych konstrukcji transformatorów, amplitud sygnału wejściowego i rezystancji obciążenia. Autor dokonał analizy wyników obliczeń wykonanych za pomocą zaproponowanego modelu, oceniając poprawność otrzymanych wyników w odniesieniu do pomiarów rzeczywistych oraz do wcześniejszych modeli opisanych w literaturze. Otrzymano dobrą zgodność wyników pomiarów z wynikami obliczeń wykonanych za pomocą modelu autorskiego, dużo lepszą od modeli dotychczasowych. W rozdziale trzynastym Doktorant podsumował zrealizowane prace, wymienił swoje najważniejsze osiągnięcia i wskazał na możliwości dalszego rozwoju i kontynuowania prac badawczych związanych z rozwojem modeli elektrotermicznych transformatorów impulsowych oraz ich weryfikacji doświadczalnej.

Omawiając zakres i tematykę poszczególnych rozdziałów zawarłem już kilka spostrzeżeń co do struktury i zawartości merytorycznej pracy. Dodatkowo poniżej przedstawiam kilka uwag. Mają one charakter dyskusyjny i nie wpływają na moją bardzo dobrą ocenę rozprawy:

- W rozdziale dwunastym w tabelach 12.1 i 12.2 zawarto zestawienia czasów trwania obliczeń w programie SPICE, dla transformatorów z wykorzystaniem modelu podstawowego (dotychczasowego) oraz modelu autorskiego. Przedstawione wyniki wskazują na istotne zwiększenie czasu obliczeń dla modelu autorskiego, ale niestety poszczególne wyniki wykazują duże rozbieżności, co utrudnia ich ocenę. Uważam, iż zwiększenie kosztu obciążenia numerycznego dla proponowanego modelu powinno być wskazane bardziej precyzyjnie.
- W mojej ocenie Doktorant powinien zamieścić w Dodatku przykładową symulację układową przetwornicy impulsowej dc-dc, z wykorzystaniem autorskiego modelu transformatora oraz modeli dotychczasowych. Takie przedstawienie wyników, nie tylko dla pojedynczego elementu transformatora impulsowego, ale całego układu przetwornicy, pozwoliłoby projektantom impulsowych układów elektronicznych oraz innym badaczom na pełniejszą ocenę proponowanego rozwiązania.

Pomimo wysokiej staranności z jaką została przygotowana praca doktorska, znalazło się w niej kilka usterek o charakterze edytorskim:

- Powtórzenie tego samego zdania: str. 12 „Odseparowanie od siebie poszczególnych drobin żelaza powoduje, że w takich rdzeniach mamy do czynienia z rozproszoną szczeliną powietrzną”.
- Kilka literówek: np. str. 16 „a część strumienia”, str. 35 „wykorzystując do tego celu pirometry oraz kamerą termowizyjną”.
- Błędy w oznaczeniach w tekście i na rysunkach: np. str. 27 „sprzężonego termicznie z m innymi elementami” podczas gdy na Rys. 4.3 i jego podpisie jest „M”.
- Na początku rozdziału piątego Autor przedstawia, iż badania przeprowadzono dla ośmiu transformatorów: planarnego, kubkowego i sześciu toroidalnych, podczas gdy w pracy zawarto informacje i przedstawiono wyniki jedynie dla siedmiu transformatorów.
- Pomyłona numeracja rysunków, str. 32 Rys. 5.3 – zamiast Rys. 5.4, str. 33 Rys. 5.4 – zamiast Rys. 5.5, Rys. 5.5 – zamiast Rys. 5.6, Rys. 5.6 – zamiast Rys. 5.7.
- Nieliczne błędy stylistyczne: np. str. 68 „stosowanie w modelu termicznego”.

Wnioski końcowe

Recenzowana rozprawa doktorska stanowi podsumowanie kompleksowych badań z udziałem Pana mgr inż. Krzysztofa Górskiego z zakresu modelowania transformatorów impulsowych z uwzględnieniem zjawisk termicznych, mających bezpośredni wpływ na ich właściwości elektryczne i magnetyczne, prowadzonych w latach 2013 - 2018. W ramach zrealizowanych prac badawczych Doktorant przeanalizował dotychczasowe modele transformatorów impulsowych opisane

w literaturze. Opracował stanowisko pomiarowe, wykonał pomiary parametrów cieplnych oraz rozkładów temperatury na powierzchni badanych transformatorów. Sformułował autorski nieliniowy elektrotermiczny model transformatora impulsowego, przeprowadzając weryfikację doświadczalną jego poprawności. Przedstawił wyniki obliczeń i pomiarów, które dowodzą, że opracowany model poprawnie opisuje właściwości transformatorów impulsowych różnej konstrukcji, a jednocześnie jest dokładniejszy od modeli znanych z literatury.

Oceniana praca ma jasno postawiony cel naukowy oraz sformułowaną tezę. Zawiera autorskie rozwiązanie postawionego i prawidłowo określonego problemu naukowego. Jest napisana poprawnym językiem, w sposób przejrzysty i klarowny przedstawia: dotychczasowe osiągnięcia nauki, aspekty teoretyczne, prace badawcze zrealizowane przez Doktoranta dotyczące modeli elektrotermicznych transformatorów impulsowych oraz ich weryfikacji doświadczalnej.

Podsumowując stwierdzam, że rozprawa stanowi oryginalne rozwiązanie zagadnienia naukowego z zakresu modelowania transformatorów impulsowych oraz może stanowić punkt wyjścia do kolejnych prac badawczych w tym zakresie. Do osiągnięć Autora wnoszących wkład do nauki należą:

- opracowanie metod pomiaru parametrów cieplnych transformatora impulsowego,
- sformułowanie nieliniowego elektrotermicznego modelu transformatora impulsowego dla programu SPICE,
- opracowanie metody wyznaczania parametrów nieliniowego elektrotermicznego modelu transformatora impulsowego,
- weryfikacja doświadczalna analizowanych modeli dla rdzeni ferromagnetycznych i transformatorów impulsowych różnych konstrukcji.

Doktorant rozwiązał postawione przed nim zadania używając do tego celu właściwych metod. Treść rozprawy jest potwierdzeniem dużej wiedzy teoretycznej i praktycznej Autora, czego dowodem są m.in. dogłębna znajomość zjawisk termicznych zachodzących w rdzeniach ferromagnetycznych i transformatorach oraz umiejętność tworzenia modeli elektrotermicznych tych elementów. Pracę zaliczam do grupy bardzo dobrych.

Konkluzja

Biorąc pod uwagę moją pozytywną ocenę rozprawy doktorskiej, stwierdzam, że spełnia ona wymagania stawiane przez odnośne przepisy o stopniach i tytule naukowym oraz wnoszę o dopuszczenie Pana mgr inż. Krzysztofa Górskiego do publicznej obrony.

Robert Suszyński