

Gliwice, 18.02.2019

Dr hab. inż. Zbigniew Rymarski, prof. nzw. Pol. Śląskiej  
Wydział Automatyki, Elektroniki i Informatyki  
Politechniki Śląskiej  
Instytut Elektroniki  
ul. Akademicka 16  
44-100 Gliwice

Recenzja rozprawy doktorskiej mgr. inż. Krzysztofa Górskiego  
pt. „Nieliniowy elektrotermiczny model transformatora impulsowego stosowanego w  
elektronicznych układach zasilających”,  
promotor: prof. dr hab. inż. Krzysztof Górecki,  
promotor pomocniczy: dr inż. Kalina Detka

## 1. Uwagi ogólne

Niniejsza ocena pracy doktorskiej mgr. inż. Krzysztofa Górskiego została przygotowana na zlecenie Dziekana Wydziału Elektrycznego Uniwersytetu Morskiego w Gdyni, prof. dr hab. inż. Krzysztofa Góreckiego.

Promotorem Doktoranta jest prof. dr hab. inż. Krzysztof Górecki, a promotorem pomocniczym - dr inż. Kalina Detka. Praca doktorska obejmuje zagadnienia z dziedziny nauk technicznych, dyscypliny naukowej elektronika.

Zakres pracy obejmuje problematykę modelowania impulsowych transformatorów przeznaczonych do układów zasilających, uwzględniając wpływ temperatury, zarówno rdzenia jak i uzwojeń, na jego parametry, biorąc pod uwagę nieliniowość tego wpływu rozumianą jako zmiana impedancji/rezystancji termicznej uzwojeń i rdzenia wraz ze zmianą temperatury oraz wprowadzając do modelu wzajemne wpływy temperatury uzwojeń i rdzenia, wyliczanych odrębnie, co umożliwia ustalenie ich zróżnicowanych względem siebie temperatur.

Tworzenie takiego skupionego (Autor definiuje określenie „model skupiony” jako „model makroskopowy” na str. 25), nieliniowego modelu uwzględniającego wzajemne oddziaływanie zjawisk elektrycznych, magnetycznych oraz cieplnych jest wyzwaniem dla naukowca starającego się stworzyć model w jak najlepszym stopniu odpowiadający rzeczywistemu obiektowi (co zresztą porównując wyniki doświadczalne z obliczeniami Autor osiągnął). Autor nazywa takie modele elektro-magneto-termicznymi.

Autor opracował metodykę pomiarów parametrów termicznych zarówno rdzeni jak i uzwojeń, a uzyskany model teoretyczny sformułował w postaci modelu programu SPICE i porównał wyniki pomiarów z wynikami uzyskanymi analitycznie otrzymując zgodność lepszą niż w stosowanych dotąd modelach.

Celem Autora było 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 (tani i popularny materiał – „iron-powder” Material Mix No.-26 firmy Micrometals, ferryty manganowo-cynkowe 3F3, F-867, N-48, nanokrystaliczny stop - nanoperm M-070) oraz konstrukcji mechanicznej (rdzenie toroidalne o różnych wymiarach, rdzenie kubkowe i planarne EI) na jego zaciskowe charakterystyki elektryczne oraz nieliniowość zjawisk odpowiedzialnych za rozpraszanie ciepła generowanego w rdzeniu i uzwojeniach transformatora.

Zagadnienie to jest ważne dla projektantów impulsowych układów zasilających małej i średniej mocy (rzędu kilkudziesięciu - kilkuset watów) wykorzystywanych praktycznie w

każdej dziedzinie techniki, ze względu na swoją wysoką sprawność, która zależy również od strat mocy w rdzeniu i uzwojeniach.

## 2. Ocena merytoryczna pracy

Praca liczy 112 stron, 13 rozdziałów, spis literatury z podziałem na 13 prac autorskich i 113 pozostałych, z dużym udziałem prac (w tym prac notowanych w bazach WoS/JCR) ze swojego ośrodka (co świadczy, że Uniwersytet Morski na którym doktoryzuje się Autor, od lat prowadzi badania nad modelami termicznymi, a jego pracownicy są uznanymi fachowcami w tej dziedzinie), wydruk instrukcji pliku wejściowego programu SPICE z opracowanym modelem transformatora, szacunki błędów pomiarów oraz zestaw tabel z parametrami modeli badanych transformatorów (w ustawieniu poziomym lub pionowym) oraz tabel dotyczących wyników obliczeń i pomiarów temperatury badanych transformatorów.

W pierwszym rozdziale Autor przedstawia tezę pracy doktorskiej, mówiącą o tym, że *„możliwe jest sformułowanie 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 uzwojania”*.

Teza ta została następnie w rozprawie udowodniona (oprócz wpływu *„sposobu uzwojania”*, co zostało przeniesione do przyszłych prac – str. 94) przez Autora poprzez stworzenie własnego skupionego, nieliniowego elektrotermicznego modelu transformatora i wykazanie zbieżności pomiarów i analitycznych obliczeń.

W rozdziale 2 przedstawiono przegląd rozwiązań konstrukcyjnych transformatorów i materiałów magnetycznych. Przy opisie materiałów ferrytowych na str. 12 wydaje się, że celowy byłby podział tych materiałów na najważniejsze dwie grupy o różniących się parametrach – MnZn i NiZn (są oczywiście jeszcze inne materiały ferrytowe). Autor w pracy bada rdzenie z materiałów MnZn (3F3, F-867, N-48). Wydaje się, że tym miejscu warto było zacytować książkę Mariana K. Kazimierczuka *„High-Frequency Magnetic Components” Second Edition, John Wiley & Sons, Ltd, Chichester, UK, 2014*, gdzie dość dokładnie przedstawiono właściwości poszczególnych materiałów ferromagnetycznych (a także podstawowy model termiczny transformatora – rozdział 7.28, str. 464). Przy opisie nanokrystalicznych materiałów magnetycznych (Autor stosuje materiał - nanoperm M-070) najważniejsze są wymiary ziaren (*grain*) rzędu 10 nm (w pracy na str. 13 mowa o warstwach amorficznych o grubości rzędu 15-25  $\mu\text{m}$ ), niespotykana dla innych materiałów przenikalność magnetyczna rzędu 100000 i bardzo wąska pętla histerezy (widać to w tab. 5.1 – najmniejsze natężenia pola koercji dla M-070, 50 razy mniejsze niż dla proszku żelaznego -26). Przy opisie rdzeni ferrytowych podaje się zwykle w katalogu tzw. parametry równoważne (dotyczące rdzenia toroidalnego o takiej samej reluktancji jak dany rdzeń, w zakresie natężenia pola nie przekraczającym górnej granicy obszaru Rayleigh'a). Doktorant nic o tym nie napisał w punkcie 2.2. Na str. 14 napisano, że wadą rdzeni pierścieniowych jest złe odprowadzanie ciepła. Recenzentowi jednak się wydaje na podstawie własnych doświadczeń z projektowaniem układów zasilających, że to podstawowa wada rdzeni kubkowych, gdzie uzwojenie jest zamknięte wewnątrz kubka z bardzo utrudnioną wymianą ciepła przez konwekcję. W praktyce inżynierskiej recenzenta zdarzało się, że odkształceniemu ulegał plastikowy karkas uzwojenia w rdzeniu kubkowym. Cytat z książki M. K. Kazimierczuka charakteryzujący rdzenie kubkowe potwierdza to stwierdzenie (str. 101): *“These cores are used for high-Q inductors and low-power transformers and are the most expensive to*

*manufacture. However, they suffer from heat buildup because their windings are surrounded by core material that does not conduct heat well and prevent air circulation”.*

W rozdziale 3 przedstawiono literaturowe modele transformatorów powołując się na pozycję [11] z 1995 i [50] z 2009. Dobrym uzupełnieniem byłaby wspomniana książka M. K. Kazimierczuka z 2014. Równocześnie Autor przy opisie prądu odpowiadającego stratom wiroprowadowym, zapewne myląc numerację pozycji literaturowych, cytuje pozycje [14] i [15] o niezawodności tranzystorów MOSFET: „*Reliability Analysis and Modeling of Power MOSFETs...*”. Prace te pewnie miały zostać dalej cytowane przy opisie zastępczych modeli termicznych w postaci sieci Foster’a, czyli w rozdziale 4. W rozdziale 3 przedstawiono najpierw izotermiczny model transformatora, a następnie elektrotermiczny model transformatora z pozycji [99] oparty na modelu Jilesa-Athertona, przy czym jego modyfikacja polegała na uwzględnieniu wpływu traconej mocy na parametry, zmieniając ich domniemaną wartość. Zdaniem Autora wadą modelu z [99] jest założenie jednej temperatury rdzenia i uzwojeń. W dalszym ciągu Autor omawia model elektrotermiczny z prac [28] i [36], w których model termiczny w postaci sieci Foster’a (rys. 3.6) uwzględnia odrębną temperaturę rdzenia i uzwojeń oraz ich wzajemne sprzężenia cieplne, z tym, że upraszczając obliczenia, przyjęto stały współczynnik tych sprzężeń (0,8).

Autor w rozdziale 4 przedstawia modele termiczne elementów elektronicznych, podział na modele mikroskopowe i makroskopowe nazywane dalej skupionymi, omawia mechanizmy odprowadzania ciepła, przedstawia dynamiczne modele skupione w postaci sieci Foster’a i sieci Cauera. Definiuje także stosowane dalej pojęcie impedancji termicznej dla stanu nieustalonego. Równocześnie pojawia się bardzo ważne dla dalszego ciągu pracy stwierdzenie, że na podstawie prac autorskich i pracy [28] można wykazać, że temperatury rdzenia i poszczególnych uzwojeń są zróżnicowane, ale rozkład temperatury w każdym z tych elementów transformatora jest równomierny. Autor przedstawia także modele termiczne transformatora z wcześniejszych publikacji, podkreślając, że nie uwzględniają one zróżnicowania temperatur uzwojeń i rdzenia, nieliniowości zjawisk termicznych oraz sprzężeń termicznych występujących między elementami transformatora. Trzeba jednak zauważyć, że w modelu [28] (pełny model na rys. 3.6, powtórzony fragmentarycznie na rys. 4.6) uwzględniono jednak takie sprzężenia, lecz w sposób uproszczony (stały współczynnik 0,8).

Autor w rozdziale 5 przedstawia badane modele eksperymentalne transformatorów. W tabeli 5.1 trochę brakuje dokładniejszego opisu rodzajów stosowanych materiałów (np. ferryty MnZn, nanoperm, „iron-powder”). Materiał „Material Mix No. -26” firmy Micrometals, typu „iron-powder” jest popularny i tani (katalog *Micrometals Iron Powder Cores, February 2007*), o dużych stratach mocy, a dławiki toroidalne z rdzeniem z tego materiału zmieniają indukcyjność o kilkadziesiąt procent (metoda badania i wyniki pomiarów dla materiału -26 opisane są między innymi w Z. Rymarski: “*Measuring the real parameters of single-phase voltage source inverters for UPS systems*”, *International Journal of Electronics* 2017, vol. 104 issue 6, pp. 1020-1033, DOI: 10.1080/00207217.2017.1279232, K. Bernacki, Z. Rymarski, Ł. Dyga: “*Selecting the coil core powder material for the output filter of a voltage source inverter*”, *IET Electronic Letters* 2017 vol. 53 issue 15, pp. 1068-1069, DOI: 10.1049/el.2017.1534) wraz ze zmianą natężenia zmiennego pola magnetycznego (w zakresie do  $H_{max}=600$  A/m, znacznie poniżej indukcji nasycenia). W tabeli „Material Applications” z katalogu Micrometals Iron Powder Cores, February 2007 napisano, że materiał -26 nadaje się do pracy dla częstotliwości prądu magnesującego poniżej 50 kHz. Dlatego prawdopodobnie w tabeli 5.1 jest tak mała wartość indukcji  $B_m=14$  mT dla określenia stratności rdzenia z tego materiału przy 100 kHz. Równocześnie należy się zastanowić jak porównywać stratność dla  $B_m=14$  mT materiału -26 i np.  $B_m=300$  mT nanokrystalicznego materiału M-070. Być może duża stratność materiału -26 powoduje, że jest on bardzo

„dydaktyczny” – nadaje się do demonstracji modeli temperaturowych. Przy analizie dalszych charakterystyk (np. napięcia wyjściowego w funkcji obciążenia na rys. 12.5) należy zauważyć, że uzwojenia pierwotne i wtórne mają tę samą liczbę uzwojeń w badanych modelach eksperymentalnych.

W rozdziale 6 przedstawiono metodę pomiaru rozkładów temperatury w transformatorze za pomocą pirometru OPTEX PT-3S i kamery termowizyjnej FLIR i5. Uzwojenie pierwotne transformatora pobudzano albo prądem stałym (dla pomiarów strat mocy w uzwojeniach i wzajemnego sprzężenia cieplnego – wpływu temperatury uzwojeń na temperaturę rdzenia – rys. 6.3) i sygnałem zmiennym o częstotliwościach 5,5 kHz, 25 kHz i 75 kHz. Zestawienie pomiarów temperatury dla transformatorów z rdzeniami toroidalnymi w tabeli 6.1 wykazuje tylko niewielką nierównomierność w rozkładzie temperatury na uzwojeniu ( $4^{\circ}\text{C}$ ) i temperatury rdzenia ( $3^{\circ}\text{C}$  do  $10^{\circ}\text{C}$ ). Natomiast temperatura uzwojenia i rdzenia różni się nawet o  $45^{\circ}\text{C}$ . Należy jednak zauważyć, że ma to miejsce przy nienaturalnym dla transformatora zasilaniu prądem stałym, gdy elementem emitującym ciepło jest jedynie uzwojenie. Przy zasilaniu prądem zmiennym (gdy występują straty i w uzwojeniu i w rdzeniu) różnice temperatur nie są aż tak istotne (na podstawie tabeli 6.1, rzędu  $10^{\circ}\text{C}$ ). We wniosku z pomiarów Autor pisze na str. 44, że przy zasilaniu prądem stałym uzwojenia pierwotnego transformatora temperatura uzwojenia była wyższa od temperatury rdzenia, co jest oczywiste, bo to uzwojenie było źródłem energii cieplnej, a temperatura rdzenia wynikała z rezystancji termicznej uzwojenie – rdzeń. Cenne jest potwierdzenie wcześniejszych założeń Autora w rozdziale 4 o równomierności temperatury uzwojeń i rdzenia, a zróżnicowaniu temperatury pomiędzy nimi.

W rozdziale 7 Autor przedstawia skupiony liniowy model termiczny transformatora dla dwóch uzwojeń (rys. 7.1). Autor definiuje własne i wzajemne przejściowe impedancje termiczne umożliwiające wyliczenie temperatur uzwojeń i temperatury (wzory 7.1, 7.2, 7.3) rdzenia (zróżnicowanych, lecz wzajemnie zależnych).

W rozdziale 8 przedstawiono pomiary parametrów termicznych transformatorów na zbudowanym przez Autora stanowisku pomiarowym. W trzech pierwszych metodach mierzono temperatury rdzeni i uzwojeń pirometrem. W pierwszej metodzie opartej na wymuszeniu sinusoidalnego napięcia na uzwojeniu pierwotnym transformatora, głównym problemem było uzyskanie odpowiednio dużej pętli histerezy. W zakresie badań własnych i wzajemnych przejściowych impedancji termicznych transformatorów planarnych zmodyfikowano metodę pomiarową wstępnie podgrzewając badany rdzeń, wymuszając przez niego przepływ stałego prądu (należałoby określić, że taka metoda nadaje się np. do rdzeni z ferrytów MnZn, ze względu na małą rezystywność tego materiału). W trzeciej metodzie wymuszano skokową zmianę prądu w uzwojeniu pierwotnym. W ostatniej, czwartej metodzie mierzono temperatury uzwojeń metodą elektryczną, wykorzystując znajomość temperaturowego współczynnika rezystywności uzwojeń. Ocena dokładności zastosowanych metod pomiaru do wyznaczenia rezystancji termicznej (impedancji termicznej w stanie ustalonym), wskazuje, że błąd jej pomiaru jak wynika z tabeli 8.1 mieści się w zakresie od 4% do 23%. Przedstawiono także porównanie czasowych zmian impedancji termicznych – zmierzonych i obliczonych analitycznie. Ciekawa by była jednak dokładna interpretacja rys. 8.10b. Dlaczego własna impedancja termiczna uzwojenia  $Z_{thw1}(t)$  dla rdzenia kubkowego jest pośrodku charakterystyk impedancji termicznych rdzeni toroidalnych. Wydaje się, że zamknięcie uzwojenia wewnątrz ferrytowego kubka powinno powodować, że własna impedancja termiczna uzwojenia jest największa i będzie powodować najwyższą temperaturę uzwojenia (co zresztą jest wskazywane w literaturze). Z rys. 6.12 wynika, że właśnie najwyższe temperatury uzwojenia (większe od  $100^{\circ}\text{C}$ ) występowały w rdzeniu kubkowym (choć stosowano różne stałe prądy pobudzenia i trudno bezpośrednio porównywać wyniki pomiarów). Przeprowadzone badania prowadzą do wniosku, że zmienność impedancji

termicznych w funkcji wydzielanej mocy w poszczególnych elementach transformatora powoduje konieczność sformułowania nieliniowego modelu termicznego transformatora.

W rozdziale 9 przedstawiono autorski nieliniowy model termiczny transformatora (rys. 9.1), w którym pomijając inne różnice, rezystancje termiczne z rys. 7.1 zastąpiono sterowanymi źródłami prądowymi, które modelują zmiany rezystancji termicznej w funkcji wydzielanej mocy. Natomiast na podstawie wcześniejszych badań uznano, że pojemności cieplne nie zależą od mocy wydzielanej w komponentach transformatora. Właśnie ten model termiczny transformatora stanowi podstawowe osiągnięcie Doktoranta (w stosunku do poprzednich, uproszczonych modeli przedstawionych w [99] i [28], a także np. w niecytowanej pracy M. K. Kazimierczuka). Autor wykazuje, posługując się przebiegami temperatur uzwojeń i rdzenia po skokowym pobudzeniu uzwojenia pierwotnego, że jego model znacznie lepiej odwzorowuje przebiegi temperatur niż tzw. model podstawowy.

W rozdziale 10 przedstawiono całościowy skupiony elektrotermiczny model transformatora będący rozwinięciem klasycznego modelu Jilesa-Athertona i jego modyfikacji w pracy [28]. Model ten, dedykowany dla programu SPICE składa się z trzech bloków – modelu rdzenia, modelu uzwojeń i przedstawionego w rozdziale 9 nieliniowego modelu termicznego. Funkcje występujące w modelu rdzenia i uzwojeń są zależne od temperatury rdzenia i temperatur uzwojeń wyliczonych w modelu termicznym. Autor odnosi się do wcześniejszej swojej współautorskiej pracy [A4] dotyczącej modelowania termicznego rdzeni ferrytowych. W tekście rozdziału 10, w opisie modelu, pojawiają się nazwy parametrów (źródeł napięciowych  $V_{dH}$ ,  $V_{dB}$  i  $V_{dMa}$ ) występujące w opisie modelu w Dodatku A, a nie występujące bezpośrednio w dalszych równaniach w rozdziale 10. Jednak są one pośrednio wprowadzone do równań opisujących sterowane źródła prądowe jako pochodne magnetyzacji, indukcji i natężenia pola magnetycznego. Autor estymuje parametry nieliniowego elektrotermicznego modelu transformatora. Czy z liniowości wykresu z rys. 11.2b (dla  $B_m = \text{const}$ ) wynika, że pominięto straty w rdzeniu na prądy wirowe i straty pozostałe (tzw. opóźnienie magnetyczne)? Być może dla stosowanych materiałów i częstotliwości pobudzenia jest to uzasadnione. Jednak rezystancja materiału MnZn nie jest wysoka (problem prądów wirowych).

W rozdziale 12 pozytywnie zweryfikowano model. Między innymi porównano zmierzone i obliczone charakterystyki magnesowania małych rdzeni toroidalnych na rys. 12.1, przy częstotliwości napięcia pobudzającego transformator 10 kHz. Autor opisuje, że zakres nasycania się rdzenia uzyskano jedynie dla rdzenia ferrytowego RTF. Należałoby się zastanowić, co tak naprawdę widać na charakterystyce rdzenia nanokrystalicznego RTN (zmierzonej niesymetrycznej charakterystyce, gdzie indukcja nasycenia dla dodatniego natężenia pola magnetycznego jest dużo mniejsza niż katalogowa). Analizowano także zmierzoną i obliczoną sprawność energetyczną transformatora w funkcji rezystancji obciążenia. Na rys. 12.3 przedstawiono zmierzone i obliczone temperatury rdzenia transformatora dla 100 kHz napięcia pobudzenia. Niespodziewanie dobre są wyniki zbieżności pomiarów i obliczeń temperatury dla rdzenia RTP z materiału „iron powder” -26 firmy Micrometals dla pobudzenia o częstotliwości 100 kHz, ponieważ materiał ten nie jest przewidziany do pracy przy tak dużych częstotliwościach pobudzenia (<50 kHz wg katalogu). Zaskakujące są bardzo niskie sprawności transformatora z rdzeniem RTP (materiał -26) dla  $R_O = 100 \Omega$  i niskich częstotliwości, a wzrost tej sprawności z częstotliwością pobudzenia (500 kHz) przekraczającą katalogowe przeznaczenie tego materiału (rys. 12.4a). Ogólnie należy uznać dobrą zgodność badań modelu eksperymentalnego i obliczeń, wskazując na znacznie większą dokładność odwzorowania badań za pomocą autorskiego modelu transformatora opracowanego przez Doktoranta niż tzw. modelu podstawowego.

Niepokoją długie czasy obliczeń przy wykorzystaniu rozważanych modeli (ale wcześniejsze, prostsze modele także wymagały długich czasów obliczeń). Wykreślenie

niektórych przedstawionych charakterystyk trwało całe godziny. Jednak podając czasy obliczeń warto by podać na jakim sprzęcie ich dokonywano (tabele 12.1 i 12.2). Sprzęt ulega modyfikacji i pewnie w najbliższym czasie obliczenia ulegną przyspieszeniu.

Rozdział 13 to podsumowanie, w którym przedstawiono wnioski z przeprowadzonych badań. Podkreślono znaczenie pracy i eksperymentalną weryfikację poprawności zaproponowanego modelu wskazując równocześnie niedoskonałość wcześniejszych modeli.

Wskazano 5 najważniejszych osiągnięć badawczych Autora, a mianowicie:

- sformułowanie nieliniowego termicznego modelu transformatora impulsowego dla programu SPICE;
- opracowanie metod pomiaru parametrów cieplnych transformatora;
- sformułowanie nieliniowego elektrotermicznego modelu transformatora impulsowego dla programu SPICE;
- weryfikację doświadczalną rozważanych modeli;
- doświadczalne potwierdzenie uniwersalności opracowanych modeli dla różnych materiałów ferromagnetycznych.

Przedstawiono także kierunki dalszych badań nad uszczegółowieniem modelu.

Praca opiera się na 13 współautorskich pracach Doktoranta, z których 1 opublikowano w czasopiśmie z listy WoS/JCR (dawna Ministerialna Lista A), 3 opublikowano w ogólnokrajowych czasopismach (dawna Ministerialna Lista B), 2 w Zeszytach Naukowych Akademii Morskiej, a pozostałe w materiałach międzynarodowych konferencji. Zatem dokonania Autora były już wielokrotnie pozytywnie oceniane przez niezależnych recenzentów.

Pozostały wykaz literatury obejmuje 113 pozycji. Dobór tych pozycji świadczy o znajomości zagadnień modelowania zjawisk termicznych przez Doktoranta. Duży ich procent, to renomowane publikacje (w czasopismach z bazy WoS/JCR) z ostatnich lat, z ośrodka Doktoranta, obejmujące zagadnienia modelowania urządzeń elektronicznych uwzględniając zjawiska cieplne. Należy to podkreślić, ponieważ takie zaplecze dało możliwość rozwoju naukowego Doktoranta w zakresie tworzenia modeli termicznych. Wydaje się, że w opisie materiałów magnetycznych i podstawowych modelach transformatorów warto by jeszcze uwzględnić książkę *M. K. Kazimierczuka „High-Frequency Magnetic Components” Second Edition, John Wiley & Sons, Ltd, Chichester, UK, 2014*, być może obok pozycji [11], czy [13]. Jeżeli chodzi o straty mocy w materiałach magnetycznych, podstawą jest cytowana przez Autora publikacja G. Bertottiego [8] z 1988, a obecnie zagadnieniem tym zajmują się np. naukowcy z wiodącego w Europie w zakresie elektroniki mocy Aalborg University z prof. F. Blaabjergiem, o czym świadczą ich ostatnie publikacje.

### 3. Uwagi ogólne

W pracy przedstawiono wyniki pracy naukowej Autora nad sformułowaniem nowatorskiego skupionego, nieliniowego elektrotermicznego modelu transformatora impulsowego (razem z odrębnym blokiem modelu termicznego) uwzględniającym odrębne temperatury uzwojeń i rdzenia (przyjmując, potwierdzony doświadczalnie, równomierny rozkład temperatury na rdzeniu i na uzwojeniu), wzajemne wpływy temperaturowe uzwojeń i rdzenia oraz zależność impedancji termicznych od temperatury, co wprowadza nieliniowość modelu. Autor opracował metodę pomiaru parametrów cieplnych transformatora, co umożliwiło eksperymentalną weryfikację sformułowanego modelu transformatora dla

różnych typów rdzeni i materiałów magnetycznych. Praca jest starannie zredagowana i napisana poprawnym językiem. Tytuł pracy w pełni odzwierciedla jej treść.

Do najważniejszych osiągnięć Doktoranta zaliczyłbym

- sformułowanie nowego, dokładniejszego niż wcześniejsze, skupionego, nieliniowego elektrotermicznego modelu transformatora impulsowego, którego opis może być wykorzystany w programie SPICE, a zatem w przyszłości w praktyce projektowej;
- opracowanie metod pomiaru parametrów termicznych transformatorów;
- wykazanie poprawności autorskiego modelu i jego większej dokładności w zestawieniu z wcześniejszymi modelami, na podstawie weryfikacji eksperymentalnej.

W prezentowanych badaniach Autor zastosował nowe metody badawcze i prawidłowo zinterpretował wyniki. Wydaje się, że dużą zaletą pracy jest sformułowanie modelu, który można zastosować w programie SPICE do symulacji w pracach konstrukcyjnych. Natomiast model jest tak zaawansowany, że jak podaje Autor, do wykreślenia niektórych z charakterystyk potrzeba kilku godzin pracy komputera. Praca Autora pozwala na przeniesienie wyników badań naukowych do praktyki inżynierskiej, co jest jej wielką zaletą.

Najważniejsze uwagi i pytania jakie się nasuwają, to:

1. Teza pracy ujmuje uwzględnienie w modelu sposobu uzwajania. W pracy jest omawiany dwu-uzwojeniowy transformator z różnego typu kształtami rdzeni, natomiast szczegółów sposobu uzwajania nie znalazłem w pracy. Autor pisze w podsumowaniu (rozdział 13), że takie prace nad modelowaniem wpływu sposobu uzwajania dopiero będą prowadzone. Zatem lepiej było usunąć ten fragment z tezy, bo praca i tak bez tego fragmentu wnosi nowe wartości do modelowania transformatorów i jako rozprawa doktorska jest zupełnie wystarczająca.

2. Porównując temperatury rdzenia RTP (z materiału „iron powder” -26) na rys. 6.5 rdzeń pobudzany przebiegiem sinusoidalnym napięcia o 3 razy wyższej częstotliwości jest chłodniejszy, czyli ma mniejsze straty. We wzorze na straty mocy w rdzeniu (z kluczowej pozycji Bertotti G. *General properties of power losses in soft ferromagnetic materials. IEEE Trans. on Magnetics, 24/1988, no. 1, pp. 621 – 630*), mamy 3 składniki strat mocy. We wszystkich tych składnikach występuje maksymalna indukcja w takiej samej potęgze jak potęga częstotliwości przez którą ją mnożymy, a maksymalna indukcja przy pobudzeniu sinusoidalnym jest z kolei odwrotnie proporcjonalna do częstotliwości. Takie zależności mogą w jakiś sposób wyrównywać straty mocy w funkcji częstotliwości przy stałej amplitudzie sinusoidalnego napięcia pobudzającego. W katalogach materiałów magnetycznych są zwykle charakterystyki pokazujące wzrost strat mocy w rdzeniu ze wzrostem częstotliwości dla indukcji  $B_m = \text{const}$ . Praktyka uczy, że właśnie ograniczeniem częstotliwości napięcia pobudzenia transformatora jest wzrost strat mocy w rdzeniu. Prosiłbym o wyjaśnienie.

3. Rdzeń kubkowy zapewnia najgorsze odprowadzenie ciepła z uzwojeń. Widać to na rys. 6.12, gdzie osiągnięto najwyższe temperatury na powierzchni transformatora przy pobudzeniu uzwojenia pierwotnego prądem stałym, czyli gdy analizujemy straty mocy w uzwojeniach. Na rys. 8.10b własna impedancja termiczna uzwojenia pierwotnego w transformatorze z rdzeniem kubkowym jest mniejsza niż dla małego rdzenia toroidalnego. Prosiłbym o wyjaśnienie.

4. W pracy dość powierzchownie potraktowano własności katalogowe materiałów magnetycznych, np. nie precyzując typu (MnZn) testowanych materiałów ferrytowych. Ale nie miało to większego wpływu na dalsze badania (z wyjątkiem tego, że wstępne podgrzewanie rdzenia przez wymuszenie przepływu prądu jest możliwe np. dla materiału ferrytowego MnZn o niezbyt dużej rezystywności, a nie dla ferrytów NiZn, które mają  $10^4$ - $10^5$  razy większą rezystywność niż MnZn). Natomiast materiał -26 „iron powder” firmy Micrometals, to popularny, lecz relatywnie niskiej jakości (duża stratność, duża zmiana indukcyjności dławika z takim rdzeniem w funkcji zarówno częstotliwości jak i amplitudy prądu magnesującego) materiał proszkowy żelazny. Firma Micrometals przewiduje jego zastosowania dla częstotliwości poniżej 50 kHz. Autor testował go dla napięcia pobudzenia o częstotliwości do 500 kHz. Czy nie ma to wpływu na badania? Na rys. 12.4a widać, że dokładność obliczeń sprawności transformatora z rdzeniem z takiego materiału wyraźnie pogarsza się wraz z częstotliwością. Prosiłbym o wyjaśnienie.

#### 4. Uwagi szczegółowe

Uwagi szczegółowe zamieszczono w punkcie 2 recenzji przy omawianiu poszczególnych rozdziałów. Wybrałem te istotniejsze.

1. Należałoby zwrócić uwagę na niewłaściwe cytowanie pozycji [14] i [15] na str. 16. Dotyczą one modeli termicznych tranzystorów MOSFET, a są cytowane przy opisie strat wirowych w rdzeniu transformatora (prezentowane w nich modele termiczne mogą być cytowane w dalszych rozdziałach pracy).

2. W pracy przy charakteryzacji materiałów magnetycznych jak i literaturowych modeli transformatorów cytowane są podręcznikowe pozycje [11] z 1995 i [13] z 1990. Chyba w 1990 roku dostępnych materiałów nanokrystalicznych jeszcze nie było. Dlatego należałoby także wykorzystać nowszą literaturę, np. wspomnianą już książkę Mariana K. Kazimierczuka z 2014.

3. Przy opisie parametrów rdzeni transformatorów impulsowych w pkt. 2.2 nie wspomniano, że w katalogu podaje się parametry równoważne rdzeni.

4. W tabeli „Material Applications” w katalogu *Micrometals Iron Powder Cores, February 2007* podano, że materiał -26 nadaje się do pracy dla częstotliwości prądu magnesującego poniżej 50 kHz. Chyba dlatego w tabeli 5.1 jest tak mała wartość  $B_m=14$  mT dla określenia stratności rdzenia z tego materiału przy 100 kHz. Równocześnie jak porównywać stratność dla 14 mT dla materiału -26 i np. 300 mT dla nanopermu M-070. W pracy prowadzono badania transformatora z rdzeniem z materiału -26 aż do 500 kHz.

5. W rozdziale 10 odniesienie do opisu modelu w Dodatku A ułatwiłoby czytelnikowi interpretację tekstu zawierającego definicje źródeł napięcia nie występujących bezpośrednio ani na rys. 10.1, ani bezpośrednio w równaniach z rozdziału 10 (pochodne magnetyzacji, indukcji i natężenia pola magnetycznego opisywane przez te źródła występują w równaniach w rozdziale 10).

6. Czy z liniowości wykresu z rys. 11.2b wynika, że pominięto straty w rdzeniu na prądy wirowe i straty pozostałe (na opóźnienie magnetyczne). Straty pozostałe występują dla częstotliwości rzędu MHz, a straty na prądy wirowe zależą od rezystywności materiału magnetycznego. Jednak dla materiałów MnZn rezystywność nie jest duża.



7. Podając czasy obliczeń warto określić na jakim sprzęcie ich dokonywano (tabele 12.1 i 12.2).

#### 5. Wnioski końcowe

Przedstawiona do recenzji praca zawiera oryginalne i wartościowe wyniki stanowiące istotny wkład Doktoranta w modelowanie impulsowych układów zasilających poprzez sformułowanie skupionego nieliniowego elektrotermicznego modelu transformatora impulsowego stosowanego w zasilaczach impulsowych. Doktorant samodzielnie rozwiązał bardzo ważne zagadnienie badawcze i wykazał się znajomością aktualnej literatury naukowej dotyczącej modelowania elementów magnetycznych w elektronice mocy. Należy podkreślić, że rozprawa doktorska wynika z 13 współautorskich publikacji dotyczących procesów termicznych w transformatorach.

Przedstawione w recenzji uwagi mają charakter dyskusyjny i w żaden sposób nie wpływają na wysoką ocenę jakości rozprawy doktorskiej. Sądzę, że Doktorant ustosunkuje się do uwag z punktu 3 na rozprawie.

W mojej opinii praca spełnia całkowicie wymagania stawiane rozprawom doktorskim przez obowiązujące przepisy. W związku z tym zgłaszam wniosek do Rady Wydziału Elektrycznego Uniwersytetu Morskiego w Gdyni o dopuszczenie mgr inż. Krzysztofa Górskiego do publicznej obrony.

Zbigniew Rymarski