

Dr hab. inż. Witold Mazgaj  
Katedra Inżynierii Elektrycznej  
Politechnika Krakowska  
ul. Warszawska 24, 31-155 Kraków  
email: pemazgaj@cyfronet.pl  
kom. +48 604 418 730

Kraków, 30 sierpnia 2023 r.

## RECENZJA

rozprawy doktorskiej Pana mgr. inż. Dawida Webera pt.  
„Obliczanie pola i regulacja prądu w transformatorze rozproszonym”

Recenzja została wykonana w odpowiedzi na pismo z dnia 10 lipca 2023 r. skierowanego przez Pana dr. hab. inż. Andrzeja Waindoka Przewodniczącego Rady Naukowej Dyscypliny Automatyka, Elektronika, Elektrotechnika i Technologie Kosmiczne Politechniki Opolskiej.

### 1. Ocena aktualności tematyki rozprawy

Kilkanaście lat wstecz dość powszechnie pokutował pogląd, że wraz z rozwojem energoelektroniki przestaną być produkowane spawarki transformatorowe, a ich miejsce zajmą spawarki inwertorowe, których zaletami są mniejsze gabaryty, mniejszy ciężar i wyższa sprawność w porównaniu do spawarek transformatorowych. Jednakże wbrew ówczesnym przypuszczeniom nie zaniechano wytwarzania spawarek transformatorowych. Są one produkowane przez takie firmy jak Lincoln Electric, ESAB, Sherman, Dedra itd. Zaletą spawarek transformatorowych jest przede wszystkim prostota budowy, nie zawierają one wrażliwych na przepięcia i przetężenia elementów jak np. tranzystory IGBT. Spawarki transformatorowe mają większe gabaryty i gorszą sprawność w porównaniu ze spawarkami inwertorowymi, to jednak ze względu na wymienione wyżej zalety znajdują nadal nabywców, zwłaszcza wśród osób zajmujących się spawaniem w sposób doraźny.

Zasadniczym elementem spawarek transformatorowych jest specjalny transformator o dużej indukcyjności rozproszenia. Regulacja prądu spawania odbywa się najczęściej ręcznie przez zmianę położenia ruchomego bocznika magnetycznego względem rdzenia transformatora. Z tego względu określenie reaktancji rozproszenia, a tym samym prądu uzwojenia wtórnego, jest zagadnieniem złożonym, gdyż po pierwsze szczelina między bocznikiem a rdzeniem transformatora najczęściej nie jest równomierna, a po drugie zagadnienie wyznaczania pola magnetycznego w takim transformatorze ma charakter mocno nieliniowy. Wskazane więc było przeprowadzenie m.in. szerokiej analizy zależności reaktancji rozproszenia transformatora od położenia bocznika magnetycznego oraz od prądu uzwojenia wtórnego. Również w aspekcie projektowania ważna jest ocena wpływu ukosowania bocznika magnetycznego na wartość reaktancji rozproszenia. Należy podkreślić, że

wiarygodne wyznaczanie rozkładu pola magnetycznego i reaktancji rozproszenia transformatora wymaga wykorzystania do obliczeń metod elementów skończonych z uwagi na stosunkowo złożony obiekt badań oraz na jego mocno nieliniowy charakter.

## 2. Cel i charakterystyka rozprawy

Autor rozprawy w sposób jasny określił jej główny cel, którym było „wykonanie modelu matematycznego do symulacji podstawowych charakterystyk transformatorów rozproszonych i ich weryfikacja pomiarowa”. Z tym celem związana jest główna teza rozprawy, która brzmi: „Rozwiązanie trójwymiarowego zagadnienia brzegowego pozwala na symulację pola magnetycznego transformatora rozproszony z uwzględnieniem różnych położenia bocznika magnetycznego i określenie parametrów całkowych niezbędnych do wyznaczenia charakterystyk statycznych i dynamicznych transformatorów rozproszonych w całym zakresie położenia ich boczników.” Z tak sformułowanej tezy pracy można wywnioskować jaki będzie zakres rozprawy doktorskiej. Główny cel rozprawy został uzupełniony dwoma dodatkowymi celami i tezami dotyczącymi wykonania układu samoczynnej regulacji prądu w transformatorze o rozproszeniu radialnym oraz wykonania układu obniżającego napięcie w stanie jałowym transformatora rozproszony.

Rozprawa doktorska zawiera dziesięć rozdziałów głównych wraz z podsumowaniem, spis literatury, dziewięć załączników, a na końcu dołączone zostały streszczenia w języku polskim i angielskim. Rozdziały rozprawy poprzedzone są spisem treści i wykazem użytych oznaczeń i symboli. W pierwszym rozdziale zawarta jest m.in. analiza stanu zagadnienia i przegląd literatury związanej z tematyką rozprawy. Cel główny rozprawy wraz z tezą przedstawiony jest w rozdziale drugim. W rozdziale trzecim opisane zostały konstrukcje dwóch typów spawalniczych transformatorów rozproszonych tj. transformatora o rozproszeniu osiowym i transformatora o rozproszeniu radialnym. Przedstawione zostały dane konstrukcyjne oraz parametry znamionowe tych transformatorów. Matematyczny opis trójwymiarowego pola magnetycznego generowanego przez transformatory rozproszone przedstawiony jest w rozdziale czwartym, przy czym znaczna część tego rozdziału poświęcona jest metodzie wykorzystanej do wyznaczania rozkładu pola magnetycznego w wymienionych transformatorach rozproszonych. Dwa kolejne rozdziały tj. rozdział piąty i szósty zawierają analizę pola magnetycznego generowanego przez oba typy transformatorów. Na szczególną uwagę zasługuje nie tylko fakt wyznaczenia niezbędnego obszaru analizy rozkładu pola magnetycznego, ale przede wszystkim analiza rozkładu pola magnetycznego dla różnych wysunięć bocznika magnetycznego. Również cenna jest weryfikacja pomiarowa modelu matematycznego przeprowadzona dla obu typów transformatorów. Rozdział siódmy zawiera opis modelu połowo-obwodowego transformatora rozproszony, który to model wykorzystano do analizy numerycznej stanów nieustalonych. W rozdziale tym przedstawiony jest także model obwodowy wykonany w środowisku Matlab/Simulink.

Znaczna część tego rozdziału poświęcona jest weryfikacji pomiarowej modelu polowo-obwodowego. Dwa przedostatnie rozdziały rozprawy doktorskiej mają charakter użytkowy, gdyż rozdział ósmy opisuje budowę i badania laboratoryjne układu obniżającego napięcie strony wtórnej transformatora w jego stanie jałowym, a rozdział dziewiąty przedstawia opis układu automatycznej regulacji prądu uzwojenia wtórnego transformatora. Wnioski wynikające z analiz teoretycznych oraz pomiarów weryfikacyjnych zostały stosunkowo obszernie przedstawione w rozdziale dziesiątym.

Zamieszczona w rozprawie literatura zawiera 96 pozycji, w zdecydowanej większości w języku angielskim; jest zrozumiałe, że pozycje literatury mające charakter podręczników są w języku polskim. Uzupełnieniem spisu literatury jest lista trzech stron internetowych, których informacje wykorzystane zostały do realizacji rozprawy doktorskiej

### 3. Najważniejsze osiągnięcia rozprawy

W mojej opinii jednym z najważniejszych osiągnięć rozprawy doktorskiej jest przeprowadzenie kompleksowej analizy rozkładu pola magnetycznego transformatorów rozproszonych przy uwzględnieniu różnych położenia bocznika magnetycznego. Również niepodważalnie istotnym osiągnięciem jest opracowanie modelu polowo-obwodowego, który pozwala badać stany nieustalone transformatora rozproszony.

Należy podkreślić również inne istotne osiągnięcia rozprawy doktorskiej m.in.:

- uzyskanie dużej zgodności obliczonych wartości reaktancji rozproszenia z wartościami zmierzonymi dla obu typów transformatora rozproszony, zwłaszcza że analiza dotyczyła obiektu o charakterze silnie nieliniowym,
- określenie wpływu ukosowania bocznika na wartość reaktancji rozproszenia transformatora, co może być wykorzystane na etapie projektowania rdzenia transformatora o rozproszeniu radialnym,
- opracowanie układu obniżającego napięcie strony wtórnej w stanie jałowym transformatora, co jest istotne w aspekcie bezpieczeństwa użytkownika spawarki z transformatorem rozproszonym,
- wykonanie układu regulacji prądu przez zmianę położenia bocznika magnetycznego.

### 4. Uwagi merytoryczne

Nie podważając wartości i znaczenia naukowego rozprawy pozwalam sobie jednak zwrócić uwagę na kilka kwestii merytorycznych:

- a) jako przykład transformatora o rozproszeniu radialnym Autor posłużył się transformatorem STA225 - czy Autor mógłby wyjaśnić jakie korzyści wynikają z zastosowania dwóch osobnych uzwojeń wtórnych (oprócz lepszego chłodzenia), bo podpierając się przywołaną literaturą (poz. [62]) ten transformator pochodzi chyba sprzed roku 1989,

- b) str. 27: Autor pisze: „Potencjał  $T$  pozwala na wyznaczenie z zależności (4.17) wartości gęstości prądów wirowych w obszarze przewodzącym...” – obszar przewodzący to obszar  $\Omega_2$  czyli obszar cewek; czy Autor wyznacza gęstość prądów wirowych w cewkach?
- c) str. 27: ponieważ obszar  $\Omega_1$  dotyczy rdzenia, to Autor zakłada niewystępowanie prądów wirowych w rdzeniu – oczywiście rdzeń jest blachowany, ale powinno to być wyraźnie zaznaczone, że wpływ prądów wirowych w rdzeniu jest pomijany; czy Autor mógłby ustosunkować się do pytania o wpływ prądów wirowych na rozkład pola magnetycznego zwłaszcza w stanach nieustalonych,
- d) str. 31, rys. 5.1: Autor przedstawia krzywą magnesowania stali – proszę o podanie wartości natężenia pola magnetycznego  $H$  przy prądzie znamionowym,
- e) str. 34, 1. wiersz od dołu: Autor pisze o długich czasach obliczeń – proszę podać jakie te czasy były i na jakim sprzęcie te obliczenia były wykonywane,
- f) dotyczy rysunków 5.51, 5.52, 5.53 oraz rysunków od 6.31 do 6.35: jak uzasadnić zmniejszanie się indukcyjności rozproszenia przy rosnącym prądzie dla tych samych pozycji bocznika magnetycznego,
- g) dotyczy rys. 5.70: jak wyjaśnić wzrost reaktancji rozproszenia transformatora przy wzroście szerokości bocznika magnetycznego,
- h) dotyczy rysunków 5.72 – 5.85: należy podkreślić dobrą zgodność między wartościami reaktancji obliczonej i zmierzonej, ale w dużym zakresie prądów wartości reaktancji są podane „na wiarę”,
- i) rdzeń transformatora o rozproszeniu radialnym jest wykonany z typowej blachy prądnicowej; należało zwrócić na to uwagę, gdyż pętla histerezy tej blachy jest znacznie szersza niż typowej blachy transformatorowej,
- j) str. 69, kilka wierszy od dołu: Autor pisze o większym udziale pozostałych składowych wektora indukcji magnetycznej – proszę o szersze wyjaśnienie tego zagadnienia,
- k) str. 70: chyba coś się nie zgadza ze skalowaniem w osi „z”, gdyż szerokość bocznika wzdłuż tej osi wynosi 5 mm; proszę o wyjaśnienie,
- l) dotyczy rysunków 6.19 do 6.25: jak Autor uzasadni znaczne różnice między zmierzonymi a obliczonymi wartościami składowych  $B_x$ ,
- m) dotyczy tabeli 6.2: jak Autor wyjaśni relatywnie małe błędy dla prądu 5 A w porównaniu do błędów określonych dla pozostałych prądów,
- n) dotyczy rysunków 7.14, 7.15 i 7.17: występują dość znaczne różnice między wynikami symulacji a pomiarami zwłaszcza na rys. 7.17; czy Autor nie zastanawiał się na ewentualnym wpływie histerezy, gdyż symulacje i pomiary były prowadzone dla transformatora, którego rdzeń jest wykonany z blachy prądnicowej,
- o) str. 113. 4. i 5. wiersz od góry: Autor pisze „Ponadto prąd upływu wymusza zastosowanie dodatkowych przekaźników mechanicznych zapewniających przerwę galwaniczną”; jaki prąd upływu miał Autor na myśli, bo prądy tyrystorów

- w stanie zaporowym i blokowania są w tym przypadku pomijalnie małe i według mnie nie jest zasadne stosowanie dodatkowych przekładników mechanicznych,
- p) str. 122, 1. wiersz po rys. 9.1: czym było podyktowane zastosowanie członu D regulatora?

## 5. Uwagi redakcyjne

Autor rozprawy nie ustrzegł się pewnych błędów bądź niedociągnięć o charakterze redakcyjnym. Dostrzeżone przeze mnie przedstawiam poniżej w kolejności ich wystąpienia:

- a) str. 5, 10. wiersz od góry: jeśli mówi się o „optymalizacji konstrukcji”, to należy podać kryterium optymalizacji tzn. czy optymalizacja dotyczy np. gabarytów transformatora czy kosztów itp.,
- b) str. 6, 10. wiersz od dołu: zamiast „puntu” powinno być „punktu”,
- c) str. 25, zależność (4.8): należało wyjaśnić krótko wartości  $A_2$  i  $A'_2$ , podobnie jak to jest zrobione dla  $A_1$  i  $A'_1$ ,
- d) str. 28, 6. wiersz od dołu: we fragmencie „Z tego względu reaktancja ta ...”, ale nie wiadomo jaką reaktancję Autor miał na myśli,
- e) str. 29, wzór (4.25): chyba nawias w tym wzorze nie jest potrzebny,
- f) str. 40, 8. wiersz od dołu: „...przedstawiają płaszczyznę składowych  $B_x$ ...”; są to raczej powierzchnie a nie płaszczyzny, podobne uwagi na stronie 52, 11. wiersz od góry oraz na str. 70, 1. wiersz od góry,
- g) rysunki 5.36 do 5.44 przedstawiają zależność składowej  $B_x=f(z)$  chyba dla kolejnych wartości  $y$  przy tym samym wysunięciu bocznika o czym Autor pisze na stronie 42 ( $w=40$  mm),
- h) str. 46, 9. wiersz od góry: „... wartości te są ponad sto razy większe od...”; chyba tylko kilkanaście razy większe,
- i) str. 53, 4. wiersz od góry: powinno być „magnesowania”,
- j) str. 73, 7. i 9. wiersz od góry: nie jest zachowana kolejność odwołania do rysunków,
- k) str. 107, 3. i 2. wiersz od dołu: zdanie nie zawiera orzeczenia,
- l) str. 108, 11. wiersz od dołu: jaką komutację ma Autor na myśli,
- m) str. 108, 9. wiersz od dołu: niezrozumiała uwaga „Błąd! Nie można....”,
- n) str. 108, 9. i 8. wiersz od dołu: ma być „składowa aperiodyczna”,
- o) na stronie 109 (9. i 8. wiersz od dołu): Autor pisze „Korzyści wynikające z znacznego zmniejszenia napięcia zasilania przewyższają wady zmniejszenia rezystancji szeregowej [11]” – wypadało podać kilka zdań wyjaśnienia a nie tylko powołać się na literaturę,
- p) str. 114, 5. i 6. wiersz od góry: przejęto, że prąd w tyrystorze płynie od anody do katody, a prąd podtrzymania ma znaczenie przy wyłączaniu tyrystorów w układach zasilanych napięciem stałym,
- q) str. 124, rys. 9.3: należało podać sposób pomiaru strumienia magnetycznego,

r) str. 126, rys. 9.7: to nie jest schemat ideowy, a raczej schemat blokowy

Szkoda, że rozprawy nie przeczytała osoba, dla której interpunkcja nie ma tajemnic, bo stosowanie przez Autora przecinków w wielu przypadkach pozostawia wiele do życzenia.

## 6. Ocena osiągnięć naukowych Autora rozprawy

Pan mgr inż. Dawid Weber jest autorem dwóch artykułów naukowych opublikowanych w Zeszytach Naukowych, serii Elektryka Politechniki Opolskiej oraz współautorem artykułu zamieszczonego w Przeglądzie Elektrotechnicznym.

Na podstawie treści rozprawy i przekazanych w niej informacjach mogę stwierdzić, że Autor rozprawy wykazał się:

- dobrym rozeznaniem prac prowadzonych w krajowych i zagranicznych ośrodkach naukowych zajmujących się problematyką dotyczącą transformatorów rozproszeniowych, biorąc pod uwagę około pięćdziesięciu kilku pozycji literatury bezpośrednio związanych z tematyką rozprawy,
- znajomością metod polowych wyznaczania rozkładu pola magnetycznego w środowiskach nieliniowych,
- dobrymi umiejętnościami formułowania problemów badawczych dotyczących m.in. analizy zmian reaktancji rozproszenia w transformatorach rozproszeniowych oraz analizy stanów nieustalonych w tych transformatorach,
- znajomością zasad budowy modeli numerycznych układów elektrycznych przy wykorzystaniu środowiska Matlab/Simulink,
- umiejętnością wykonywania laboratoryjnych badań weryfikujących poprawność sformułowanych modeli,
- umiejętnością wyciągania wniosków na podstawie analiz teoretycznych i badań laboratoryjnych.

Rozprawa doktorska potwierdza umiejętność samodzielnego prowadzenia prac naukowo-badawczych Autora rozprawy, co jest wymagane przez zapis w artykule 187, ustęp 1 obowiązującej ustawy „Prawo o szkolnictwie wyższym i nauce”.

## 7. Konkluzja recenzji

Zamieszczone w recenzji uwagi merytoryczne i redakcyjne nie mają wpływu na moją jednoznacznie pozytywną ocenę rozprawy doktorskiej pt. „Obliczanie pola i regulacja prądu w transformatorze rozproszeniowym”, której autorem jest Pan mgr inż. Dawid Weber. Tę rozprawę doktorską można traktować jako oryginalne rozwiązanie sformułowanego przez Autora problemu w zakresie wykorzystania wyników szeroko pojętej analizy teoretycznej do zastosowań projektowych i eksploatacyjnych transformatorów rozproszeniowych stosowanych w spawarkach transformatorowych. Stwierdzam przy tym, że recenzowana przeze mnie rozprawa

doktorska wnosi istotny wkład w rozwój dyscypliny „Automatyka, elektronika, elektrotechnika i technologie kosmiczne”.

Po kompleksowej analizie recenzowanej rozprawy uważam, że rozprawa doktorska Pana mgr. inż. Dawida Webera pt. „Obliczanie pola i regulacja prądu w transformatorze rozproszonym” spełnia warunki stawiane rozprawom doktorskim, które zawarte są w artykule 187 ustawy z dnia 20 lipca 2018 roku „Prawo o szkolnictwie wyższym i nauce” (Dz.U. z 2022 r. poz. 574 z późn. zm.) i stawiam wniosek o dopuszczenie mgr. inż. Dawida Webera do publicznej obrony recenzowanej rozprawy doktorskiej.

Marek Witold