

Prof. dr hab. inż. Krzysztof Szabat

Wrocław 2025-04-02

Katedra Maszyn, Napędów i Pomiarów Elektrycznych

Wydział Elektryczny, Politechnika Wrocławska

ul Smoluchowskiego 19

50-372 Wrocław

RECENZJA

Rozprawy doktorskiej mgr inż. Piotra Tetlaka

pt. **Poprawa efektywności energetycznej przekąźnika elektromagnetycznego**

Opracowana na podstawie zlecenia dr. hab. inż. Pawła Szczęśniaka, prof. uczelni Przewodniczącego Rady Naukowej Automatyki, Elektroniki, Elektrotechniki i Inżynierii Kosmicznych Uniwersytetu Zielonogórskiego

1. CHARAKTERYSTYKA DZIEDZINY I OCENA TEMATU ROZPRAWY

W przemyśle można zauważyć ciągły trend zwiększania efektywności energetycznej, zarówno całych procesów przemysłowych jak i poszczególnych urządzeń. Dąży się do redukcji emisji dwutlenku węgla przez optymalizację już istniejących jak również wprowadzanie alternatywnych rozwiązań. Co jest naturalne, działania te dotyczą w większości przypadków najbardziej energochłonnych urządzeń i procesów. Redukcja zapotrzebowania na moc jednostkową ma w tym przypadku najbardziej spektakularny efekt. Znacznie mniejsza uwaga poświęcona jest minimalizacji zużycia energii przez niewielkie urządzenia o mocy z zakresu kilku watów. W tym przypadku istotnym jest wolumen sprzedaży tych urządzeń. W przypadku znacznej ilości ich zastosowanie posiada bardzo duży wpływ na sumaryczną emisję dwutlenku węgla, często większy niż w przypadku pojedynczych procesów dużej mocy. Z tego powodu prace w tym zakresie należy uznać za jak najbardziej wskazane. Należy podkreślić, że minimalizacja zużycia energii znajduje się na liście priorytetów w wielu krajach, w tym wchodzących skład Unii Europejskiej.

W rozprawie doktorskiej przedstawiono zagadnienia związane z optymalizacją konstrukcji przekąźnika elektromagnetycznego mającej na celu zwiększenie jego efektywności energetycznej. Jest to problem bardzo istotny zarówno naukowego, przemysłowego i biznesowego punktu widzenia. W celu jego rozwiązania Autor rozprawy wykorzystał szereg wzajemnie uzupełniających się podejść. Zastosował nowoczesne narzędzia symulacyjne, wykonał szereg prototypów, przeprowadził badania laboratoryjne i w końcowej fazie wdrożył

proponowane rozwiązania do produkcji seryjnej. W mojej opinii, oceniana rozprawa doktorska nawiązuje do istotnych, nowoczesnych i cieszących się dużym zainteresowaniem zagadnień z dyscypliny Automatyka, Elektronika, Elektrotechnika i Technologie Kosmiczne badanych przez szereg ośrodków naukowych i przemysłowych.

2. CHARAKTERYSTYKA ROZPRAWY

Przedstawiona do zaopiniowania rozprawa doktorska składa się z ośmiu rozdziałów podstawowych, spisu treści, wykazu ważniejszych oznaczeń, bibliografii i pięciu załączników. Całość pracy zawarta jest na 204 stronach. Dodatkowo, na początku rozprawy zamieszczono jej streszczenie. Autor odnosi się do 120 pozycji literatury. Zawiera ona zarówno prace klasyczne jak i opublikowane w ostatnich latach.

Celem pracy jest zaproponowanie rozwiązań, które pozwolą na znaczące ograniczenie poboru energii elektrycznej po stronie sterowania w przekaźnikach elektromagnetycznych. Cel ten będzie realizowany przy dodatkowym założeniu, aby zaproponowane rozwiązania, mogły być łatwo i efektywnie wdrożone do produkcji.

Bazując na przedstawionym celu pracy w rozprawie zaproponowano następującą tezę naukową:

Możliwe jest znaczące ograniczenie zużycia energii standardowego przekaźnika elektromagnetycznego poprzez wprowadzenie niskokosztowych modyfikacji, które w sposób istotny nie zmienią bazowej struktury oraz technologii produkcji tego przekaźnika.

Dowodząc tezy naukowej rozprawy przyjęto czytelny sposób postępowania. W rozdziale pierwszym poruszono zagadnienia wprowadzające w tematykę przekaźników elektromagnetycznych (PEM). Zwrócono uwagę na ich szerokie zastosowanie w przemyśle jako elementu pośredniczącego pomiędzy torami nisko- i wysoko- napięciowymi (prądowymi). Podkreślono ich zalety, np. zapewnienie separacji galwanicznej w obwodach roboczych. Zwrócono uwagę również na ich wady w tym mniej oczywiste. Jedną z nich związana jest z powszechnością ich stosowania, co powoduje że całościowe straty generowane przez PEM są bardzo duże. Uzasadnia to podjęcie tematyki doktoratu – konstrukcji PEM o znacząco mniejszym zapotrzebowaniu na moc. W dalszej części rozdziału podano cel pracy oraz tezę rozprawy. Kolejno omówiono sposoby budowy oszczędnych przekaźników PEM oraz oszacowano moce przez nie pobierane.

Metodykę projektowania oraz analizy PEM przedstawiono w rozdziale drugim. Omówiono metodę obwodu równoważnego do obliczania strumieni magnetycznych w magnetowodach oraz wskazano na jej ograniczenia. Następnie wprowadzono metodę elementów skończonych. Omówiono jej podstawowe założenia i cechy charakterystyczne przy podejściu 2D i 3D. Przeanalizowano wpływ siatki obliczeniowej na wyniki symulacji magnetowodu. Następnie wprowadzono do eksperymentalnych metod badania PEM. Omówiono pomiary siły trzymania zwory, napięć zadziałania i resetu, poboru energii przez elektromagnes oraz testy trwałościowe i środowiskowe. Na końcu rozdziału przedstawiono metodę projektowania *Design Thinking* zastosowaną w omawianej pracy.

W rozdziale trzecim przedstawiono zagadnienia wstępne związane z projektem nowego przekaźnika bistabilnego. W pierwszej części skupiono się na dostępnych na rynku PEM o podobnych parametrach oferowanych przez różne firmy. Do porównania przyjęto urządzenia oferowane przez Omron, Finder, Releco i Hongfa. Przeanalizowano ich parametry oraz sposoby wprowadzenia bistabilności. Następnie przedstawiono założenia nowego rozwiązania. Dotyczyło one utrzymania standardów używanych w produkowanym PEM typu R4N. Przeanalizowano siły występujące w PEM pod kątem prawidłowości działania w różnych warunkach. Poruszono również problemy dotyczące doboru odpowiednich parametrów cewki i materiałów magnetowodów w celu optymalizacji efektywności energetycznej przekaźnika.

Najbardziej oryginalna i wartościowa część pracy zaczyna się od rozdziału czwartego. Przedstawiono w niej prace związane z uzyskaniem autorskiego przekaźnika bistabilnego. W rozdziale czwartym omówiono prace związane z szukaniem coraz bardziej doskonalszych rozwiązań PEM. Jako pierwszy analizowano możliwość uzyskania bistabilności przez wprowadzenie półtwardego magnetycznie materiału o wysokiej remanencji. Analizę proponowanego rozwiązania oparto o metodę MES 3D. W jej wyniku wyznaczono teoretyczne właściwości PEM. Zostały one zweryfikowane na podstawie badań prototypowych. Pomimo uzyskania poprawnych wyników zrezygnowano z tego rozwiązania ze względu na trudności technologiczne. Kolejno przeanalizowano rozwiązanie z magnesem trwałym w rdzeniu elektromagnesu. W celu uzyskania wyników teoretycznych posłużono się analizą zarówno MOR jak i MES. Kolejno wykonano prototyp opracowanego urządzenia. Pomimo spełnienia założeń projektowych zrezygnowano z jego wdrożenia do produkcji. Przesądziły o tym względy technologiczne. Zagadnienia związane z projektowaniem PEM z magnesem stałym równoległym (MSR) do rdzenia są przedstawione najbardziej obszernie, co wynika z ich końcowego sukcesu. Kolejno omawiane są kolejne iteracje konstrukcyjne MSR od najprostszych (najmniej korzystnych) do najbardziej złożonych (najbardziej korzystnych) – omówionych jest łącznie pięć konstrukcji. Przedstawione są wyniki badań symulacyjnych

obrazujących ich właściwości. Kolejno zaprezentowane są poszczególne prototypy MSR. Przy pomocy OPTIMETRICS dobrano poszczególne parametry PEM. Na podstawie analizy MES i MOR wyznaczono charakterystyki rozwiązania końcowego. Na końcu rozdziału zawarto krytyczne porównanie poszczególnych rozwiązań.

Wyniki testów funkcjonalnych i środowiskowych przekaźnika w wersji MSR przedstawiono w rozdziale piątym. Wykonano pomiary siły trzymania zwory, badano napięcia zadziałania i resetu w standardowej i podwyższonej temperaturze, testy trwałościowe (wytrzymałość zarówno elektryczna jak i mechaniczna). Wyniki badań MES porównano z wartościami uzyskanymi na drodze badań eksperymentalnych. Uzyskano zadawalającą zbieżność charakterystyk. Przeprowadzone badania potwierdziły wysoką niezawodność i efektywność opracowanych PEM.

Kolejnym rozdziale opisano proces wdrożenia dodatkowych komponentów: magnesu stałego i jarzma wtórnego. Magnes stały posiada standardowe wymiary i parametry wobec czego może być pozyskany z rynku. Dla jarzma wtórnego opracowano technologię produkcji i montażu (do jarzma podstawowego) za pomocą spawania. Dobrano optymalną grubość drutu nawojowego cewki przy wykorzystaniu funkcji Matlaba. Kolejno opisano linie automatycznego montażu opracowanego PEM. W celu ochrony wartości intelektualnych rozwiązania wystąpiono i uzyskano patent.

W rozdziale siódmym przeprowadzono analizę porównawczą PEM bistabilnych dostępnych na rynku. Uwzględniono w nim następujące urządzenia: Omron MY2K, Finder 2Z 10A 230V, Releco C9-R20, Hongfa HFE19-90 oraz Relpol R4B. Zwrócono uwagę na następujące parametry: energię oraz czasy zarówno załączania jak i wyłączenia. Z przeprowadzonych rozważań wynika, że opracowany produkt posiada parametry zbliżone do przekaźnika Omron. Oba te przekaźniki zapewniają najlepsze parametry użytkowe.

W podsumowaniu zawarto najważniejsze wnioski dotyczące rozprawy. W sposób szczegółowy opisano wkład własny Autora do dyscypliny naukowej. Po zakończeniu głównego tekstu rozprawy zamieszczono załącznik obrazujący szczegółowe aspekty związane z wykonaną pracą.

3. OCENA PRACY

W opiniowanej pracy przedstawione zastały zagadnienia związane projektowaniem bistabilnych PEM. Tematyka i prezentowane wyniki są oryginalne zarówno w skali krajowej jak również światowej. Dodatkowym czynnikiem wyróżniającym pracę jest fakt, że Autor nie ograniczył się tylko do jednego rozwiązania, ale zaprezentował krytyczną analizę porównawczą różnych podejść. Kolejną zaletą pracy jest podejście wybrane przez Autora i przedstawienie w rozprawie pełnego cyklu badawczego. Analiza teoretyczna jest poparta

licznymi wynikami badań symulacyjnych oraz eksperymentem laboratoryjnym, dzięki czemu założony cel pracy został osiągnięty a teza rozprawy w pełni udowodniona. Wdrożenie opracowanego przełącznika do produkcji seryjnej (kilkaset tysięcy sztuk) świadczy dobitnie o znaczeniu rozprawy. Należy podkreślić, że opracowany PEM z powodzeniem konkuruje z produktami czołowych światowych firm.

W podsumowaniu pracy Autor bardzo szczegółowo wymienił bardzo dużą liczbę oryginalnych osiągnięć (łącznie 22). Nie kwestionując ich doniosłości, poniżej przedstawiam moim zdaniem najważniejsze:

- Opracowanie założeń nowej konstrukcji przełącznika bistabilnego w oparciu o krytyczny przegląd rozwiązań występujących na rynku oraz posiadanej wiedzy z zakresu elektrotechniki i technologii.
- opracowanie modeli numerycznych proponowanych w pracy rozwiązań; wykonanie szeregu badań symulacyjnych ukazujących właściwości opracowanych PEM wraz z ich krytyczną analizą;
- wykonanie szeregu prototypów poszczególnych badanych wersji PEM; przeprowadzenie badań i krytyczna analiza ich konstrukcji i właściwości;
- zaprojektowanie, a następnie wszechstronne przebadanie (w testach symulacyjnych i laboratoryjnych) kolejnych wersji PEM z magnesem stałym równoległym; proponowanie kolejnych prototypów eliminujących wady poprzednich modeli wraz ze szczegółowym opisem jest niewątpliwą zaletą pracy;
- optymalizacja poszczególnych parametrów PEM;
- opracowanie technologii produkcji i montażu poszczególnych elementów PEM;
- przeprowadzenie szeregu badań ukazujących trwałość PEM;
- wdrożenie opracowanego rozwiązania do produkcji seryjnej;

Redakcja pracy jest poprawna, tym niemniej autor nie uniknął drobnych błędów edytorskich i stylistycznych, np.:

- przyjęto rzadko spotykany styl edycji: rozdziały i podrozdziały zaczynają się bez wcięcia, pojawia się ono jednak przy kolejnych akapitach;
- strona 7 wiersz 2: jest 'potencjalbe' powinno być 'potencjalne';
- strona 16 wiersz 2 od dołu: jest 'pokazan została sumaryczna' powinno być 'pokazana została sumaryczna';
- strona 73 wiersz 9 od dołu: jest 'poziomie0V' powinno być 'poziomie 0V';
- strona 74 wiersz 13 od dołu: jest 'obliczenie' powinno być 'obliczenia';
- strona 74 wiersz 11 od dołu: jest 'przedstawionaej' powinno być 'przedstawionej';

- strona 74 wiersz 5 od dołu: jest '4.4A' powinno być '4,4A';
- strona 75 wiersz 8 od góry: jest 'uprzenim' powinno być 'uprzednim';
- strona 80 wiersz 9 od dołu: jest 'Wartość moment' powinno być 'Wartość momentu';
- strona 88 wiersz 9 od góry: jest 'xasilania' powinno być 'zasilania';
- strona 94 w tytule: jest 'równoległyn' powinno być 'równoległym';
- strona 128 wiersz 15 od góry: jest 'Równnaniu' powinno być 'równnaniu';
- strona 130 wiersz 7 od góry: brakuje zamykającego nawiasu ')';
- na rys. 3.1 brak jest części e).

Po lekturze pracy nasuwa się kilka uwag o charakterze dyskusyjnym o różnej wadze merytorycznej, na które proszę o odpowiedź:

- Celem pracy jest zaproponowanie rozwiązań pozwalających na znaczące ograniczenie poboru energii. Cel ten bez wątplenia został osiągnięty. Celem dodatkowym jest, aby zaproponowane rozwiązania (liczba mnoga) powinny być proste w produkcji przemysłowej. Moim zdaniem należałoby zmodyfikować cel dodatkowy. Powinien on odnosić się do liczby pojedynczej, czyli jednej konkretnej propozycji. Tak też jest w pracy.

- W podrozdziale 1.6.2 Autor opisuje rynek przekaźników. Używa następujących sformułowań: przekaźniki elektromagnetyczne, przekaźniki elektromechaniczne i przekaźniki mechaniczne. Zwracając uwagę na miejsce wystąpienia wspomnianych określeń i przytoczone liczby wydaje się, że dwa pierwsze określenia są synonimami, a trzecie wskazuje na nadrzędną grupę. Jednakże odnośnie obu grup podana jest liczba 553,73 milionów USD lub sztuk. Proszę o wyjaśnienie.

- Jak pisze Autor na stronie 100: '...charakterystyka siłowa otrzymana metodą MES 2D jest niemal liniowa...' Czy możliwe jest dalsze zwiększenie jej liniowości przez optymalizację dostępnych parametrów?

- Autor w podrozdziale 4.3.3 opisuje dobór parametrów poszczególnych rozwiązań przy pomocy 'narzędzia OPTIMETRICS'. Przedstawiona procedura sugeruje, że dobór poszczególnych wielkości przeprowadza się pojedynczo. Czy możliwe jest wykorzystanie wybranego algorytmu metaheurystycznego do przeprowadzenia optymalizacji wszystkich parametrów jednocześnie?

- Autor skupił się na optymalizacji energetycznej PEM. Jednym z parametrów charakteryzujących to urządzenie jest minimalna liczba przełączeń. Czy celowa i możliwa jest taka konstrukcja PEM, aby minimalizować dodatkowo siłę uderzeń styków przy załączeniu? Czy wpłynie to na zwiększenie żywotności urządzenia?

- Czy zmniejszenie siły uderzeń można przeprowadzić przez odpowiednią zmianę sygnału sterującego w cewce. Czy takie prace istnieją w literaturze?

- Na stronie 104 Autor pisze: ...Istnieją metody rozkładu pola w szczelinie poprzez odpowiednie sterowanie prądem cewki. W artykule [56] uzyskano 11.12% poprawę siły bez zmiany prądu cewki... Bardzo proszę o wyjaśnienie przytoczonej metody.

- Badania wytrzymałościowe przeprowadzono na próbce trzech PEM. Rozrzut pomiędzy badanymi próbkami przekraczał w niektórych przypadkach 50%. Czy nie należałoby zwiększyć liczebności próbek?

- Opracowany przekąźnik elektromagnetyczny bazuje na niskokosztowych modyfikacjach (zgodnie z tezą rozprawy). O ile wzrosła cena opisanego w rozprawie rozwiązania w stosunku do podstawowego przekąźnika wybranego na bazę opracowania?

Należy podkreślić, że wymienione uwagi nie mają na celu zmniejszenia znaczenia rozprawy. Autor w sposób przejrzysty formułuje swoje myśli, co korzystnie wpływa na odbiór i zrozumienie pracy.

4. PODSUMOWANIE

Powyższe uwagi mają charakter dyskusyjny i nie wpływają na pozytywną ocenę pracy doktorskiej. Recenzowana rozprawa doktorska mgr inż. Piotra Tetlaka pt. *Poprawa efektywności energetycznej przekąźnika elektromagnetycznego* zawiera rozwiązanie problemu naukowego, dowodzi umiejętności samodzielnego prowadzenia pracy badawczej, potwierdza bardzo dobre przygotowanie z dyscypliny Automatyka, Elektronika, Elektrotechnika i Technologie Kosmiczne a zwłaszcza z obliczeń elektromagnetycznych, metrologii, modelowania i programowania. Dowodem tych umiejętności są nie tylko rozważania teoretyczne i badania symulacyjne, ale również ich praktyczne wykorzystanie, udowodnione poprzez stworzenie rzeczywistego przekąźnika elektromagnetycznego. Na podkreślenie zasługuje fakt uzyskania przez proponowane rozwiązanie ochrony patentowej jak również wdrożenie jej do wieloseryjnej produkcji. W mojej ocenie jest to wzorcowy doktorat wdrożeniowy.

Reasumując, w mojej opinii recenzowana rozprawa doktorska spełnia wymagania stawiane rozprawom doktorskim przez obowiązującą ustawę o tytule i stopniach naukowych i w związku z powyższym stawiam wniosek o dopuszczenie jej do publicznej obrony. Dodatkowo, biorąc pod uwagę jej aspekt teoretyczny a zwłaszcza rozbudowaną część praktyczną wnoszę o wyróżnienie rozprawy.

Marek Szabot