

Dr hab. inż. Adam Penczek, prof. AGH
Akademia Górniczo-Hutnicza w Krakowie
Katedra Energoelektroniki i Automatyki
Systemów Przetwarzania Energii

RECENZJA ROZPRAWY DOKTORSKIEJ

„Poprawa efektywności energetycznej przekaźnika elektromagnetycznego” autorstwa
mgr inż. Piotra Tetlaka

Wykonana na zlecenie Rady Dyscypliny Automatyka, Elektronika, Elektrotechnika i Technologie
Kosmiczne Uniwersytetu Zielonogórskiego (uchwała nr 78 z dnia 22 stycznia 2025 r.).

I. Charakterystyka rozprawy doktorskiej

Przedłożona do recenzji rozprawa doktorska pt. „Poprawa efektywności energetycznej przekaźnika elektromagnetycznego” została przygotowana jako doktorat wdrożeniowy we współpracy z największym polskim producentem przekaźników elektromagnetycznych – firmą RELPOL S.A. (numer umowy DWD/5/0254/2021). Promotorem pracy jest prof. dr hab. inż. Robert Smoleński (Uniwersytet Zielonogórski), a promotorem pomocniczym dr inż. Piotr Leżyński (Uniwersytet Zielonogórski).

Doktorat wdrożeniowy to program Ministerstwa Edukacji i Nauki, uruchomiony w 2017 roku i realizowany na podstawie art. 376 ust. 1 i ust. 2 pkt 1 Ustawy z dnia 20 lipca 2018 r. – Prawo o szkolnictwie wyższym i nauce. Jego celem jest umożliwienie uzyskania stopnia naukowego doktora osobom zatrudnionym w przedsiębiorstwach lub innych jednostkach spoza systemu szkolnictwa wyższego poprzez realizację kształcenia w szkołach doktorskich we współpracy z tymi podmiotami. Istotą programu jest równoległe prowadzenie badań naukowych i działalności zawodowej, przy czym tematyka rozprawy doktorskiej powinna wynikać z potrzeb rozwojowych danego przedsiębiorstwa. Kluczowym wymogiem jest opracowanie rozwiązania, które posiada charakter wdrożeniowy i znajduje praktyczne zastosowanie w gospodarce. Program wspiera bezpośrednie wykorzystanie wiedzy naukowej w praktyce, tworząc pomost pomiędzy środowiskiem akademickim a przemysłowym. Przygotowywane dysertacje powinny zawierać nie tylko oryginalne rozwiązanie problemu naukowego, ale również stanowić podstawę jego praktycznej aplikacji.

Rozprawa doktorska mgr inż. Piotra Tetlaka przedstawiona jest na 204 stronach. Zawiera ona 8 rozdziałów (str. 1–155) oraz 5 załączników: Dodatek A „Sprawozdanie z badań konstruktorskich przekaźników bistabilnych” (str. 157–170), Dodatek B „Plan badań przekaźnika bistabilnego” (str. 171–174), Dodatek C „Decyzja Urzędu Patentowego” (str. 175–178), Dodatek D „Wyprowadzenie równań” (str. 179–184) oraz Dodatek E „Dokumentacja produktu” (str. 185–186). Bibliografia (str. 187–204) obejmuje 120 pozycji, wśród których 107 stanowią odwołania do literatury naukowej (w tym jedna publikacja współautorstwa Doktoranta), natomiast pozostałe 13 to normy, noty aplikacyjne oraz dokumentacja techniczna i źródła internetowe. Ponadto, w rozprawie zamieszczono: streszczenie w języku polskim (str. v–viii), listę użytych skrótów (str. xv) oraz listę symboli (str. xvii–xviii).

Na wstępie została przez Doktoranta sformułowana teza rozprawy:

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

Aby dowieść postawionej tezy, Doktorant określił cele do realizacji:

„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.”

Rozprawa obejmuje swym zakresem badania naukowe (począwszy od przeglądu istniejących rozwiązań, poprzez opracowanie modeli matematycznych i przeprowadzenie badań symulacyjnych weryfikowanych iteracyjnie badaniami eksperymentalnymi prototypów) oraz zaprojektowanie i weryfikację działania bistabilnych przekaźników elektromagnetycznych pod kątem spełnienia rygorystycznych norm i wymagań związanych z wdrożeniem do produkcji seryjnej.

W Rozdziale I, 10 Autor dokonał przeglądu literatury związanej z zastosowaniem przekaźników elektromechanicznych oraz wskazał wymagania, jakie stawiają przed producentami obecne uwarunkowania rynkowe. Jednym z najważniejszych wyzwań jest potrzeba ograniczenia zużycia energii poprzez poprawę efektywności jej wykorzystania. Autor wykazał, że najbardziej skuteczną metodą jest zastosowanie przekaźników bistabilnych, które w odróżnieniu od przekaźników monostabilnych wymagają dostarczenia energii jedynie w momencie zmiany stanu (załączenia lub wyłączenia). Efektywność energetyczna nie jest jednak jedynym kryterium oceny przekaźników. Aby produkcja seryjna przekaźników bistabilnych była opłacalna, ich wyższy koszt wytworzenia (a co za tym idzie wyższa cena detaliczna) powinien być akceptowalny dla odbiorcy końcowego, co w praktyce oznacza, że mniejsze zużycie energii w trakcie eksploatacji powinno zrekompensować wyższe koszty zakupu.

W rozdziale III przeanalizowano dostępne na rynku przekaźniki bistabilne, aby ocenić przydatność wykorzystanych w nich rozwiązań do modernizacji produkowanego seryjnie przez firmę RELPOL S.A. przekaźnika monostabilnego R4N. Szczególny nacisk położono na zachowanie wymiarów zgodnych z oryginałem, co umożliwia wykorzystanie istniejącej technologii i linii produkcyjnej. Porównano kilka modeli różniących się sposobem realizacji bistabilności, wybierając te najbardziej zbliżone do wymagań projektowych. Na podstawie przeprowadzonej analizy sformułowano założenia projektowe do budowy nowego przekaźnika bistabilnego R4B oraz wytypowano trzy rozwiązania do przeprowadzenia szczegółowych badań: z rdzeniem półtwardym magnetycznie (MPR), z magnesem w magnetowodzie przekaźnika (MSS) oraz z magnesem trwałym umieszczonym poza magnetowodem przekaźnika (MSR).

Zgodnie z metodyką opisaną w rozdziale II, w rozdziale IV poddano analizie trzy alternatywne konstrukcje przekaźnika bistabilnego (różniące się m.in. układem mechanizmu zatraskowego, sposobem realizacji blokady, konstrukcją elektromagnesu), dla których wykonano szczegółowe modele analityczne i numeryczne (metoda obwodu równoważnego MOR oraz metoda elementów skończonych – MES), a także przeprowadzono symulacje komputerowe w środowiskach ANSYS Maxwell oraz MATLAB/Simulink. Wyniki badań symulacyjnych zostały zweryfikowane badaniami eksperymentalnymi z wykorzystaniem zbudowanych prototypów, co umożliwiło doskonalenie modeli numerycznych metodą iteracyjną. Na podstawie uzyskanych rezultatów dokonano porównania poszczególnych rozwiązań. Jako kryteria oceny przyjęto: minimalizację poboru energii w cyklu przełączania, niezawodność działania części mechanicznej i elektromagnetycznej, łatwość wdrożenia w warunkach przemysłowych, zgodność z istniejącą technologią produkcji oraz stabilność parametrów w zmiennych warunkach środowiskowych.



W kontekście uzyskanych wyników, do dalszych prac wybrano rozwiązanie z magnesem trwałym równoległym do rdzenia elektromagnesu (MSR), które zapewnia bistabilność przekaźnika bez konieczności istotnych modyfikacji w procesach jego wytwarzania.

Rozdział V poświęcono weryfikacji funkcjonalnej i środowiskowej zaprojektowanego przekaźnika R4B, opisano procedury testowe oraz zaprezentowano wyniki badań empirycznych przeprowadzonych zgodnie z normami przemysłowymi. Sprawdzano m.in. poprawność przełączania, siłę trzymania zwory, trwałość mechaniczną oraz stabilność parametrów w różnych warunkach temperaturowych. Uzyskane wyniki potwierdziły skuteczność zastosowanego rozwiązania i jego przydatność do wdrożenia przemysłowego.

Rozdział VI zawiera opis działań niezbędnych do wdrożenia przekaźnika R4B do produkcji seryjnej. Autor przedstawił wymagania techniczne dla nowych komponentów (magnes stały i jarzmo wtórne) oraz określił zakres koniecznych modyfikacji procesów technologicznych. W rozdziale VII dokonano porównania nowego przekaźnika bistabilnego R4B z konkurencyjnymi rozwiązaniami dostępnymi na rynku. Z zestawienia parametrów wynika, że jest on jednym z najlepszych urządzeń w swojej klasie. W rozdziale VIII przedstawiono ogólne podsumowanie pracy połączone z zestawieniem najważniejszych dokonań. Autor wskazał także kierunki dalszych prac badawczo rozwojowych oraz potencjalne możliwości udoskonalenia zaprojektowanego przekaźnika bistabilnego.

II. Ocena merytoryczna i wykaz najważniejszych osiągnięć Autora

Rozprawa doktorska mgr inż. Piotra Tetlaka stanowi modelowy przykład realizacji doktoratu wdrożeniowego, który w sposób wzorcowy łączy cele naukowe z rzeczywistymi potrzebami przemysłu. Jest to wartościowe opracowanie naukowo-inżynierskie, wpisujące się w bieżące wyzwania związane z poprawą efektywności energetycznej elementów wykonawczych automatyki. Autor podjął się ambitnego zadania przeprojektowania seryjnie produkowanego przekaźnika monostabilnego R4N na wersję bistabilną, przy zachowaniu wszystkich założeń konstrukcyjnych oraz parametrów elektrycznych pierwotnego rozwiązania. Ze względu na wdrożeniowy charakter rozprawy, jednym z kluczowych założeń była minimalizacja kosztów produkcji nowego przekaźnika, co wymagało maksymalnego wykorzystania istniejącej linii technologicznej oraz parku maszynowego używanego do produkcji modelu R4N. Praca cechuje się dojrzałością merytoryczną, trafnym doбором metod badawczych oraz kompleksowym podejściem do problemu. Warto zaznaczyć, że realizacja pracy doktorskiej była integralnie związana z projektem badawczo-rozwojowym dofinansowanym ze środków Programu Operacyjnego Inteligentny Rozwój (POIR) pod tytułem „Opracowanie konstrukcji nowej generacji przekaźników bistabilnych miniaturowych dla przemysłu elektromaszynowego” – numer umowy POIR.01.01.01-00-0964/20. Projekt ten stanowił podstawę do wdrożenia rezultatów badań do praktyki przemysłowej, a jego beneficjentem była firma RELPOL S.A.

Należy podkreślić, że praca doktorska została wykonana w pełnym cyklu badawczym: począwszy od części teoretycznej, przez budowę modeli numerycznych i przeprowadzenie badań symulacyjnych, aż po zaprojektowanie i wykonanie prototypów, które następnie poddano dokładnym badaniom laboratoryjnym.

Uzyskane rezultaty mają charakter aplikacyjny i zostały zweryfikowane w praktyce przemysłowej. Wysoką jakość badań potwierdzają wyniki analiz porównawczych z konkurencyjnymi rozwiązaniami dostępnymi na rynku (zaprojektowany przekaźnik należy do najlepszych w swojej klasie pod względem parametrów elektrycznych i mechanicznych), a także rzetelne uzasadnienie wyboru



finalnego rozwiązania. Opracowana konstrukcja przekaźnika R4B przeszła wszystkie testy definiowane przez obowiązujące normy przemysłowe oraz badania niezbędne do wdrożenia do produkcji seryjnej.

Do najważniejszych osiągnięć Autora należy zaliczyć:

- opracowanie modeli numerycznych i symulacyjnych w środowisku ANSYS Maxwell i MATLAB/Simulink dla różnych wariantów wykonania przekaźnika,
- przygotowanie założeń konstrukcyjnych oraz zaprojektowanie bistabilnego przekaźnika elektromagnetycznego R4B kompatybilnego z produkowanym seryjnie przekaźnikiem R4N,
- przeprowadzenie pełnego cyklu badań eksperymentalnych i środowiskowych prototypów przekaźników,
- przygotowanie dokumentacji konstrukcyjno-technologicznej umożliwiającej wdrożenie rozwiązania do produkcji seryjnej,
- uzyskanie Patentu na wynalazek "Przekaźnik bistabilny ze stabilizacją strumienia magnetycznego" (PL245744B1)

Rozprawa świadczy o bardzo wysokim poziomie kompetencji Autora w zakresie projektowania i wdrażania do seryjnej produkcji układów automatyki przemysłowej. Stanowi kompletne udokumentowanie całego procesu badawczo-rozwojowego poczynwszy od analizy bieżącego stanu wiedzy i opracowania założeń konstrukcyjnych, przez budowę modeli i badania symulacyjne, aż po opracowanie, testowanie i doskonalenie prototypów. Na podkreślenie zasługuje fakt, że finałem kilkuletnich prac prowadzonych w ramach doktoratu wdrożeniowego jest wprowadzenie przez firmę RELPOL S.A. do oferty rynkowej przekaźnika bistabilnego R4B w czterech wersjach (stan na początek kwietnia 2025).



III. Uwagi dyskusyjne i komentarze do rozprawy

Ogólna ocena rozprawy jest pozytywna, niemniej jednak w trakcie lektury nasuwają się również pewne wątpliwości oraz uwagi krytyczne. Zostały one przedstawione w niniejszym rozdziale z uwzględnieniem podziału na uwagi merytoryczne oraz uwagi dotyczące błędów redakcyjnych.

a) Uwagi merytoryczne

W trakcie analizy rozprawy pojawiło się kilka kwestii wymagających doprecyzowania lub pogłębienia. Autor powinien odnieść się do przedstawionych poniżej uwag:

1. W treści rozprawy Autor kilkakrotnie błędnie posługuje się pojęciem mocy w kontekście zużycia energii. Na stronach 3, 15, 16, 55, 70 i 71 użyto nieprecyzyjnego określenia „pobór mocy” w odniesieniu do zjawisk związanych z zużyciem energii, co może prowadzić do nieporozumień interpretacyjnych. Wskazane byłoby w tych miejscach zastosowanie terminu „zużycie energii” lub „zapotrzebowanie na moc chwilową”. Należy zwrócić uwagę, że energia jest wielkością fizyczną reprezentującą całkowitą pracę wykonaną w danym czasie, natomiast moc stanowi jej pochodną względem czasu i wyraża tempo, w jakim energia jest przekazywana lub zużywana. Prawdłowe rozróżnienie obu wielkości ma kluczowe znaczenie dla zachowania poprawności naukowej wywodu oraz spójności merytorycznej opracowań technicznych.
2. W pracy brakuje szacunkowego porównania kosztów eksploatacyjnych przełączników monostabilnych i bistabilnych w odniesieniu do ich typowego cyklu życia. Uwzględnienie takich danych – opartych na przykładzie kilku typowych aplikacji – pozwoliłoby zobrazować realne korzyści ekonomiczne wynikające z zastosowania przełącznika bistabilnego. W kontekście różnicy w cenie pomiędzy przełącznikiem monostabilnym (~35 PLN dla R4N) i bistabilnym (~130 PLN dla R4B), studium przypadków pokazujące czas zwrotu inwestycji przy aktualnych cenach rynkowych energii byłoby cennym uzupełnieniem analizy technicznej i zwiększyłoby użyteczność pracy z punktu widzenia potencjalnych odbiorców przemysłowych.
3. Autor zbyt mało miejsca poświęcił rozważaniom dotyczącym ograniczeń, jakie należy uwzględnić przy zastępowaniu przełączników monostabilnych przez bistabilne. W wielu aplikacjach – zgodnie z wymaganiami bezpieczeństwa funkcjonalnego (np. IEC 61508, PN-EN 60204-1) – po chwilowym zaniku zasilania układ powinien automatycznie powrócić do stanu bezpiecznego lub początkowego. Przełączniki bistabilne, które zachowują swój ostatni stan po zaniku zasilania, nie spełniają tego warunku bez dodatkowych układów nadzorczych. Przykładowo, w aplikacjach związanych z systemami zatrzymania awaryjnego (E-STOP) czy ochroną dostępu, stosowanie przełączników bistabilnych może być niezalecane lub wymagać specjalnych środków kompensacyjnych. Dlatego też zamiana przełącznika monostabilnego na bistabilny nie zawsze jest dopuszczalna i powinna być każdorazowo poprzedzona analizą ryzyka oraz oceną zgodności z wymaganiami aplikacyjnymi i normatywnymi.
4. Na rysunku 4.3 (rozdział 4, str. 76) niepoprawnie opisano jednostki na osi czasu (milisekundy zamiast sekund). Dodatkowo opis i interpretacja zawartości rysunku znajdują się trzy strony wcześniej (str. 73), co utrudnia jego samodzielny analizę.
5. W opisach rysunków 4.4, 4.5 i 4.6, przedstawiających wyniki badań symulacyjnych, nie podano, w których konkretnych chwilach czasowych zarejestrowano rozkład indukcji magnetycznej w magnetowodzie, co utrudnia jednoznaczną interpretację przedstawionych wyników.

b) Uwagi redakcyjne i edytorskie

Praca pod kątem redakcyjnym i edytorskim została przygotowana bardzo dobrze i zawiera stosunkowo niewiele błędów niemniej jednak nie jest ich pozbawiona. Poniżej przedstawiono zestawienie błędów, na które zwrócono uwagę w trakcie przygotowywania recenzji:

1. Str. 6 – zdanie: „aby zaproponowane rozwiązania, mogły być łatwo i efektywnie wdrożone do produkcji” zawiera zbędny przecinek, a wyrażenie „łatwo i efektywnie” ma charakter potoczny i warto je zastąpić bardziej precyzyjnym sformułowaniem technicznym.
2. Str. vi - vii - w Streszczeniu podano błędne nazwy rozdziału 4 i rozdziału 5
3. Str. 6 – zwrot: „które pozwolą na znaczące ograniczenie poboru energii” – zamiana słowa „poboru” na słowo „zużycia”, lepiej oddałoby intencję autora i odpowiadałoby przyjętym normom terminologicznym w elektrotechnice.
4. Str. 16 – literówka „pokazan została” zamiast „,pokazana została”
5. Str. 28 – zdanie „Zależność siły elektromagnetycznej oddziałującej na zworę F od strumienia magnetycznego Φ , opisuje równanie (2.3)” powinno mieć brzmienie „Zależność siły elektromagnetycznej oddziałującej na zworę (oznaczonej jako F), od strumienia magnetycznego Φ , opisuje równanie (2.3)”,
6. Str. 52. W opisie pod rysunkiem 3.1 wyspecyfikowano przełącznik (oznaczony jako e)) którego nie pokazano na rysunku.
7. Str 73 – literówka „utrzyana” zamiast „utrzymana”
8. Str. 123 – literówka: „babdanej” zamiast „badanej”.
9. Str. 123 – błąd gramatyczny: „parametr wyjściowy została przyjęta” – wymaga poprawy gramatycznej zgodności.
10. Str. 126 – użycie wyrażenia „nie występuje z takim nasileniem” zamiast poprawnej formy „nie występuje w takim nasileniu”.



IV. Podsumowanie oceny rozprawy doktorskiej i wniosek końcowy

Rozprawa doktorska mgr inż. Piotra Tetlaka stanowi wartościowy przykład pracy wdrożeniowej, która w sposób dojrzały i metodyczny rozwiązuje istotny problem inżynierski o wysokim znaczeniu aplikacyjnym. Przedstawione w pracy rozwiązanie konstrukcyjne przełącznika bistabilnego R4B cechuje się innowacyjnością, spełnia rygorystyczne wymagania techniczne oraz zostało kompleksowo przebadane z wykorzystaniem zaawansowanych metod symulacyjnych, eksperymentalnych i analitycznych. Całość prac została przeprowadzona zgodnie z obowiązującą metodyką badań stosowaną w naukach technicznych, a uzyskane wyniki w pełni potwierdzają postawioną na początku tezę.

Na podkreślenie zasługuje fakt, że rozprawa została przygotowana w ramach programu „Doktorat wdrożeniowy” we współpracy z podmiotem gospodarczym i zakończyła się opracowaniem nowego produktu, przełącznika R4B, który został wprowadzony do oferty handlowej firmy RELPOL S.A.

Biorąc pod uwagę poziom merytoryczny pracy, jej wartość naukowo-techniczną, kompletność analizy, poprawność formalną oraz rzeczywisty charakter wdrożeniowy stwierdzam, że rozprawa spełnia wszelkie wymagania stawiane pracom doktorskim, zgodnie art. 187 ustawy z dnia 20 lipca 2018 „Prawo o szkolnictwie wyższym i nauce” (DZ.U.2024 poz. 1771)

W związku z powyższym, wnioskuję o dopuszczenie rozprawy doktorskiej mgr inż. Piotra Tetlaka do publicznej obrony przed Radą Dyscypliny Automatyka, Elektronika i Elektrotechnika i Technologie Kosmiczne Uniwersytetu Zielonogórskiego.



.....
Adam Penczek

