

Szczecin, 28 maja 2025 r.

dr hab. inż. **Szymon Banaszak**, prof. ZUT
Zachodniopomorski Uniwersytet Technologiczny w Szczecinie
Wydział Elektryczny, Katedra Wysokich Napięć i Elektroenergetyki
ul. Sikorskiego 37; 70-313 Szczecin
e-mail: szymon.banaszak@zut.edu.pl

RECENZJA ROZPRAWY DOKTORSKIEJ

mgr. inż. **Szymona Stoczko**

pod tytułem: **“Trójcewkowy siłownik elektrodynamiczny do zastosowania w napędzie
szybkim wyłącznika”**

Promotorem rozprawy jest dr hab. inż. **Marcin Szewczyk**, prof. PW

Podstawą opracowania recenzji jest pismo Przewodniczącego Rady naukowej Dyscypliny Automatyka, Elektronika, Elektrotechnika i Technologie Kosmiczne prof. dr. hab. inż. Pawła Szczepańskiego oraz uchwała Rady Naukowej dyscypliny Automatyka, Elektronika, Elektrotechnika i Technologie Kosmiczne Politechniki Warszawskiej nr 77/III/2025 z dnia 22 kwietnia 2025 r.

1. Ocena układu, tematyki i celu rozprawy doktorskiej

Recenzowana praca doktorska składa się z siedmiu rozdziałów, które można podzielić na część wprowadzającą do tematyki (rozdziały 1 i 2) oraz badawczą, symulacyjno-praktyczną (rozdziały 3-6). Dodatkowo zawarto w niej podsumowanie (rozdział 7) i bibliografię. Spis literatury liczy 152 pozycje. Niestety nie wszystkie z nich zostały w pracy zacytowane, co zostanie omówione w dalszej części recenzji. Objętość pracy wynosi również 152 strony.

Tematyka rozprawy dotyczy opracowania nowego trójcewkowego siłownika elektrodynamicznego, który przeznaczony jest do napędów wyłączników elektroenergetycznych. W pracy zawarto zarówno badania symulacyjne, jak i badania przeprowadzone na modelu fizycznym oraz na przykładowym przemysłowym wyłączniku.

We wstępie pracy (rozdział 1) przedstawiono wprowadzenie do poruszanej problematyki i opisano – w odniesieniu do literatury – konstrukcje napędów łącznikowych. Szczególną uwagę autor poświęcił na porównanie napędów elektromagnetycznych i elektrodynamicznych. Wskazano na potrzebę opracowania napędu, będącego tematem rozprawy, zwłaszcza dla łączników próżniowych, z którymi napędy elektrodynamiczne lepiej pracują niż z gazowymi. Autor na podstawie przeglądu literatury wskazuje, że obecnie badania koncentrują się rozwijaniu konstrukcji siłownika typu Thomsona, którego charakterystyki pracy nie predysponują go do zastosowania w aparaturze

wysokonapięciowej. Jego wad, zdaniem autora, pozbawione są siłowniki trójcewkowe, które są przedmiotem symulacji i badań. Dodatkowo, siłowniki takie, dzięki krótkim czasom zadziałania, skutecznie wyłączają obwody prądu stałego.

W dalszej części wstępu przedstawiono tezę pracy: „Możliwe jest opracowanie trójcewkowego siłownika elektrodynamicznego o jednej ruchomej cewce, pozwalającego na uzyskanie w czasie krótszym niż 10 ms pełnego skoku styków łącznika o długości 15 mm i o podziałce międzybiegunowej nie większej niż 210 mm do zastosowania w napędach szybkich łączników średniego napięcia”. Tezę oceniam jako prawidłowo postawioną, chociaż w mojej ocenie dość precyzyjne określenie parametrów działania opracowywanego siłownika zawęża obszar badań do konkretnego rozwiązania technicznego. Poza tym pojawia się ryzyko, że siłownik taki już został opracowany np. w przemyśle, a tym samym teza może okazać się z góry udowodniona.

Do udowodnienia tezy postawiono cel rozprawy: „Wykonanie wszechstronnych badań trójcewkowego siłownika elektrodynamicznego, zarówno modelowego, jak i współpracującego z napędem elektromagnetycznym fabrycznego wyłącznika średnich napięć, w celu uzyskania odpowiedniej charakterystyki siłowo-kinematycznej dla spełnienia warunków określonych w tezie rozprawy.”

Na potrzeby realizacji celu przedstawiono 10 zadań, które dotyczą zagadnień symulacyjnych i badawczych na obiekcie fizycznym.

Uważam takie podejście za bardzo dobre i wskazujące na przemysłany zakres badań i analiz wykonywanych podczas realizacji doktoratu. Rozpoczęcie prac od zapoznania się z narzędziami do symulacji, a dzięki temu podstawami teoretycznymi, umożliwiło wykonanie modeli symulacyjnych, które w dalszych częściach rozprawy zrealizowano w postaci modeli fizycznych i poddano testom z wyłącznikiem przemysłowym. Jest to modelowa ścieżka badawcza w dziedzinie nauk inżynieryjno-technicznych.

Następnie autor we wprowadzeniu zamieszcza wykaz własnych osiągnięć: publikacje, zgłoszenia patentowe i udziały w projektach badawczych oraz pracach zleconych dla przemysłu. Osiągnięcia te oceniam jednoznacznie pozytywnie, wskazują one na umiejętność pracy badawczej na styku nauka-przemysł. Na końcu wprowadzenia zamieszczono krótki przegląd zawartości rozprawy.

Rozdział 2 przedstawia podstawy teoretyczne zjawisk zachodzących w siłownikach elektrodynamicznych. Przedstawiono w nim zależności dotyczące pola magnetycznego: energię, indukcyjności uzwojeń i indukcyjności wzajemnych cewek. Na podstawie analiz teoretycznych przyjęto metodę odwzorowania geometrycznego konturu cewki w postaci zbioru koncentrycznych kołowych konturów oraz spirali Archimedesesa. Opisano metody obliczeń numerycznych stosowanych w pracy, do których zastosowano oprogramowanie Ansys Maxwell. Opisano uproszczenia, które zastosowano do dalszych obliczeń, tj. uproszczenie geometrii zwojów oraz uproszczenie struktury zwojowej prowadzące do wykorzystania w modelu cewki litej. Autor wykazał, że takie uproszczenia umożliwiają dostatecznie dokładne obliczenia indukcyjności, a w dalszej części pracy siły napędowej siłownika trójcewkowego.

W rozdziale 3 przedstawiono koncepcję napędu z trójcewkowym siłownikiem. Na wstępie zawarto w nim opis matematyczny siłownika, a następnie symulacje statyczne jego modelu. Ze względu na osiowość geometrii uzwojeń, symulacje przeprowadzono jako

dwuwymiarowe. W rozdziale zawarto rysunki rozkładu pola magnetycznego siłownika oraz charakterystyki energii pola indukcyjności oraz siły funkcji położenia cewki ruchomej siłownika. Wykonano także badania wariantowe dla różnych konstrukcji cewek, której wynikiem było wskazanie optymalnego wariantu konstrukcji cewki środkowej oraz dolnej. W dalszej części rozdziału przedstawiono opracowany model polowo-obwodowy, dzięki któremu możliwe było sprzężenie symulacji geometrii siłownika z obwodową reprezentacją układu kinematycznego. W ich wyniku określono możliwość osiągnięcia założonego w tezie pracy przemieszczenia cewki ruchomej siłownika na odległość 15 mm w czasie 3,34 ms. Wskazano na możliwość skalowania rozpatrywanej konstrukcji siłowni i ewentualne zastosowanie jej do łączników wyższych napięć. W rozdziale tym brakuje – moim zdaniem – choćby krótkiego komentarza na temat prognozowanej wytrzymałości zaproponowanej konstrukcji.

Rozdział 4 zawiera wyniki badań przeprowadzonych na modelu fizycznym siłownika trójcewkowego. Został on wykonany w oparciu o wyniki modelowania z poprzedniego rozdziału. Autor opisał kolejne kroki konstruowania cewek, zespołu zasobnikowo-sterującego (opartego na kondensatorach), oraz konstrukcji wsporczej i przeniesienia napędu. Cewki siłownika wykonano z izolacją z żywicy epoksydowej. Autor nie podał jednak jej typu ani właściwości. Czy w jej doborze uwzględnione zostały prognozowane naprężenia mechaniczne lub też warunki termiczne pracy? W rozdziale opisano charakterystykę siłową sprężyn dociskowych oraz parametry pętli prądowej układu zasobnika kondensatorowego. Odniesiono się przy tym do charakterystyki fabrycznego próżniowego wyłącznika SN, nie podając jednak jego typu ani producenta. Uzyskano między innymi bardzo dobrą zgodność pomiędzy pomiarem i symulacją dla przebiegu prądu rozładowania zasobnika kondensatorowego na uzwojenie siłownika. W dalszej części wykonano pomiary przemieszczenia elementu wykonawczego siłownika na specjalnie opracowanym stanowisku laboratoryjnym. Dokonywano rejestracji prądów oraz przemieszczeń zarejestrowanych przetwornikiem optycznym oraz potencjometrycznym. Wykazano korzyści z zastosowania metody optycznej pomiaru przemieszczenia. Kolejne cenne analizy przedstawione w tym rozdziale to zbadanie wpływu masy stykowej oraz wpływu początkowej siły oporowej na przebiegi przemieszczania. Tak wiele analiz wskazuje na szerokie spojrzenie autora na prezentowaną problematykę, a tym samym potwierdza jego znajomość tematu. Kolejne zadania jasno wynikają z poprzednich, jak np. modelowanie i badania symulacyjne kinematyki ruchu. Autor konkluduje na podstawie wyników badań i symulacji, że rozpatrywany siłownik elektrodynamiczny nadaje się do zastosowania w aparaturze łączeniowej SN.

W **rozdziale 5** przedstawiono badania opracowanego przez autora trójcewkowego siłownika elektrodynamicznego zastosowanego w napędzie fabrycznego wyłącznika SN firmy Tavrida (12 kV/1000 A/ 20 kA). Wybór tego typu wyłącznika podyktowany był m.in. cechami konstrukcyjnymi umożliwiającymi łatwą rozbudowę o dodatkowy siłownik. Opisano pokrótce konstrukcję wyłącznika i jego fabrycznego napędu, w tym sterownika oraz dokonano analizy możliwości technicznych dołączenia dodatkowego siłownika. Zawarto także dokładny opis montażu siłownika w fabrycznym napędzie i uzyskane w ten sposób stanowisko do badań laboratoryjnych. Zdaniem recenzenta w tym miejscu zabrakło komentarza lub szerszej analizy dotyczącej innych konstrukcji (np. innych producentów)

wyłączników. Nie wiadomo bowiem na ile wyniki badań zależne są od cech konkretnej konstrukcji wyłącznika, a na ile uniwersalne i możliwe do zastosowania wprost do urządzeń pochodzących od różnych producentów.

Ta sama uwaga dotyczy się wyników badań przeprowadzonych na powyższym stanowisku, które zawarto w **rozdziale 6**. Wykonano kolejno pomiary czasów własnych napędu fabrycznego wyłącznika, czasu własnego fabrycznego siłownika elektromagnetycznego oraz czasu własnego fabrycznego sterownika napędu. W dalszej części wykonano pomiary charakterystyk ruchu wyłącznika z napędem szybkim. Analiza wyników umożliwiła stwierdzenie, że możliwa jest autonomiczna praca obu napędów: fabrycznego i szybkiego. Jednak do poprawnej pracy obu napędów w warunkach eksploatacyjnych konieczne okazało się opracowanie nowej konstrukcji sterownika, co autor planuje wykonać w przyszłości. Autor zsynchronizował pracę obu napędów, co zostało potwierdzone testami i wynikami zawartymi na rys. 6.10, gdzie widać dla zaprezentowanych wielkości fazy zadziałania napędu szybkiego oraz napędu fabrycznego. W dalszych analizach sprawdzano wpływ napięcia ładowania baterii kondensatorów, co przekładało się na zmianę wartości szczytowej siły napędowej oraz przemieszczeń styków. Na tej podstawie wyznaczono wartość napięcia U_C dla różnych wartości pojemności C baterii kondensatorów. W wyniku prób potwierdzono możliwość wykorzystania napędu szybkiego w testowanym modelu wyłącznika, z czasem zadziałania krótszym o rząd wielkości. Ważnym punktem poruszonym przez autora jest wątpliwość co do wytrzymałości mechanicznej fabrycznej konstrukcji przy stosowaniu napędu szybkiego.

Przedstawione w tym rozdziale wyniki badań jednoznacznie wskazują na udowodnienie tezy i zrealizowanie celu pracy.

Wszystkie rozdziały badawcze zawierają podsumowania z jasno przedstawionymi wnioskami, co uważam za bardzo cenne i ułatwiające czytelnikom zapoznanie się z treścią rozprawy.

Rozdział 7 zawiera podsumowane pracy. Zebrano w nim wnioski końcowe, oparte na wnioskach zawartych we wcześniejszych rozdziałach. Autor przypomina tu także kolejne realizowane zadania, poczynając od obliczeń i symulacji, poprzez konstrukcję modelu fizycznego siłownika, jego przebadanie i integrację z wyłącznikiem fabrycznym. W każdym z tych zadań autor wykazał się umiejętnością prowadzenia badań naukowych i wyciągania wniosków. Efekty realizacji zadań przedstawionych w pracy oceniam bardzo wysoko. Interesującym podejściem do podsumowania badań jest odniesienie się do poziomów gotowości technologicznej TRL, gdzie autor wykazał zrealizowanie pięciu pierwszych poziomów. W części tej brakuje jednoznacznego odniesienia się do tezy i potwierdzenia jej udowodnienia i realizacji celu. W mojej ocenie cel pracy został zrealizowany, a teza udowodniona. Za to autor przedstawia dalsze kierunki badań nad opracowanym napędem.

Uwzględniając powyższe uważam, że tematyka poruszana w pracy jest bardzo aktualna, ma duże znaczenie praktyczne i została podjęta w ramach rzeczywistych potrzeb sektora elektroenergetycznego. Jednoznacznie wpisuje się w tematykę dyscypliny Automatyka, Elektronika, Elektrotechnika i Technologie Kosmiczne. Autor wykazał umiejętność planowania i przeprowadzania badań naukowych oraz przedstawiania uzyskanych wyników.

Pracę zamyka **bibliografia**. Jak wspomniano na wstępie tej recenzji, nie wszystkie pozycje w niej zamieszczone zostały zacytowane w tekście, recenzent nie odnalazł pozycji:

8, 25, 61, 70, 97, 100, 101, 104, 106, 114 i 140. Do tego kolejności umieszczenia cytowań w tekście nie jest ani alfabetyczna, ani wg kolejności cytowania, tylko losowa. W wielu miejscach w tekście odniesienia do literatury umieszczone w większej liczbie obok siebie są nie po kolei, np. str. 15 „[75], [80], [51], [40], [79]” lub str. 19 „[28], [29], [35], [34], [36], [37], [43], [48], [52], [53], [68], [78]”. Dodatkowo można by się zastanowić czy cytowanie tytułu źródeł w jednym miejscu jest konieczne? Niestety, sposób przedstawienia odniesień do literatury jest najsłabszym aspektem recenzowanej pracy.

2. Uwagi ogólne

Praca doktorska p. Szymona Stoczko zawiera opis dobrze zaplanowanych badań naukowych o charakterze wdrożeniowym. Doktorant wykonał analizy teoretyczne, wybrał i przygotował narzędzia symulacyjne, dokonał stosownych obliczeń i dzięki temu stworzył fizyczny model proponowanego rozwiązania trójcewkowego siłownika, wybrany z szeregu wariantów przy kilku zmiennych cechach konstrukcyjnych. Następnie model został przebadany i zastosowany w przemysłowym rozwiązaniu wyłącznika SN. Zaprezentowane rozwiązanie jest oryginalnym osiągnięciem autora. Całość przedstawiony analiz i wyników badań oceniam jednoznacznie pozytywnie, choć pojawiło się według mnie kilka wątpliwości o których wyjaśnienie poproszę autora w odpowiedzi na recenzję, a podczas obrony poproszę o publiczne odniesienie się do wybranych odpowiedzi. Moje uwagi przedstawiam w poniższych punktach.

- 2.1. Na str. 22 autor w ostatnim akapicie stwierdza, że „...nie napotkano w literaturze na badania symulacyjne, laboratoryjne, jak również eksploatacyjne takiej konstrukcji siłownika”, jednocześnie odnosząc się do trzech pozycji z literatury: [39], [67] i [71]. Pozycje te mają lata publikacji kolejno 2000, 2005 i 1969 i stanowią opracowania przemysłowe lub patenty. Czy na pewno w literaturze naukowej nie ma badań dot. tej tematyki, szczególnie z ostatniej dekady?
- 2.2. Na stronach 66 i 74 autor pisze o wykorzystaniu jako izolacji i zarazem elementu konstrukcyjnego żywicy epoksydowej. Czy autor sprawdził właściwości zastosowanej żywicy i porównał do spodziewanych warunków długotrwałej pracy wyłącznika? Jak obciążenia mechaniczne (np. związane z przyspieszeniami i wibracjami) i termiczne (warunki pracy, prąd) wpłyną na żywicę? Jak autor szacuje jej czas życia?
- 2.3. W pracy brakuje też analizy wytrzymałości i żywotności całej konstrukcji wyłącznika opartego o zaproponowany siłownik trójcewkowy. Na str. 71, na koniec podsumowania autor stwierdza, że wybrał wariant „o najkorzystniejszych cechach z punktu widzenia zarówno konstrukcji, jak i parametrów siłowo-kinematycznych”. Dalej, na str. 108, pojawia się stwierdzenie „Zastosowanie w napędzie fabrycznego wyłącznika [...] elektrodynamicznego siłownika szybkiego SIS, pozwala na zwiększenie (w stosunku do napędu fabrycznego NF) szybkości rozejścia się styków wyłącznika...”. Jak autor ocenia żywotność zaproponowanej konstrukcji oraz wpływ jej zastosowania w fabrycznych wyłącznika na ich żywotność? Czy da się zaproponowany siłownik zastosować w każdym wyłączniku, czy powinno się przeprowadzać każdorazowo analizę jego zastosowania? A może należy opracować

konstrukcje wyłącznika o parametrach mechanicznych dostosowanych do zaproponowanego rozwiązania?

- 2.4. Na rys. 4.9 zawarto charakterystykę siły stosu sprężyn dociskowych ciągną fabrycznego wyłącznika próżniowego, a na rys. 4.11 podobną charakterystykę dla stosu wykonanego przez autora, opartego o sprężyny talerzowe. Na końcu str. 83 autor konkluduje, że „Do uśrednionego współczynnika sprężystości stosu sprężyn bieguna wyłącznika próżniowego $c_{wył} = 0,46$ kN/mm (Rys. 4.9) najbardziej zbliżonym okazał się stos sprężyn talerzowych składających się z 18 ogniw, dla którego $c_s = 0,45$ kN/mm”. Uśredniony współczynnik c dla pierwszego przypadku obliczono z charakterystyki, która składa się z dwóch zakresów pracy (do i od ok. 0,7 mm) o różnym nachyleniu, podczas gdy dla drugiego przypadku uzyskano charakterystyki liniowe. Proszę o komentarz, czy takie uproszczenie, widoczne na rys. 4.9 jako różnica między charakterystyką zmierzoną, a linią przerywaną (wartość średnia) nie wprowadza błędów do założeń projektowych i dlaczego rozwiązanie z zaproponowaną charakterystyką liniową zostało wybrane przez autora.
- 2.5. Na str. 129 autor podaje najbardziej korzystne wartości pojemności i napięcia zasobnika kondensatorowego. Zależą one oczywiście od badanego obiektu, czyli zastosowanego wyłącznika fabrycznego. Jak autor zaleca dobieranie tych parametrów zasobnika w przyszłości, np. po wdrożeniu prototypu do produkcji, przy zastosowaniu innych typów/producentów wyłączników? Czy każdorazowo konieczne będzie wykonywanie badań w celu ustalenia wartości pojemności i napięcia?

Powyższe uwagi i pytania mają charakter dyskusyjny i nie wpływają na jednoznacznie pozytywną ocenę pracy doktorskiej przeze mnie. Mogą za to wskazać dalsze kierunki badań i analiz.

3. Uwagi szczegółowe

Poziom edytorski pracy jest generalnie dobry. Występują nieliczne literówki i błędy edytorskie czy też błędy interpunkcyjne. Poniżej przedstawię najważniejsze ich przykłady:

- str. 3: jest „dopełniono wskazanie” zamiast „dopełniono o wskazanie”;
- str. 11: jest „komory gaszeniowych” zamiast „komory gaszeniowe”;
- str. 12: jest „aktywnymi układy” zamiast „aktywnymi układami”;
- str. 16: błędne podzielenie słowa „elektroenergetycznych” pomiędzy wierszami;
- str. 17: utracone formatowanie pierwszego akapitu p. 1.2.2;
- str. 23: jest „w oparciu siłownik” zamiast „w oparciu o siłownik”;
- str. 31: jest „odvodu” zamiast „obvodu”;
- str. 49, str. 111: jest „dwoma cewkami” zamiast „dwoma cewkami”;
- str. 53: „przyjęto jako na tyle duży” – styl;
- str. 60, rys. 3.8 i kolejne mają za cienkie linie;
- w wielu miejscach niepotrzebna kropka po liczbie, np. str. 74 „30. zwojami”, str. 75 „czas 7. dni”, str. 83 „12. ogniw”, „16. ogniw” itd.
- str. 91, rys. 4.18 i tekst: raz występuje wartość 400 V (podpis pod rysunkiem), a raz 500 V (legenda, tekst);

- str. 101, rys. 4.26 i tekst: raz występuje cytowanie [54] (podpis pod rysunkiem i tekst powyżej), a raz [55] (legenda);
- str. 114: jest „opiera się na z trzech” zamiast „opiera się na trzech”.

Powyższe uwagi natury redakcyjnej nie obniżają poziomu merytorycznego pracy, stronę edytorską pracy niezmiennie oceniam dobrze.

4. Podsumowanie

Praca doktorska stanowi ważne oryginalne osiągnięcie naukowe autora. W mojej ocenie cele naukowe oraz badawcze zostały zrealizowane, a uzyskane wyniki posłużyły do wyciągnięcia wartościowych wniosków, które mogą znaleźć znaczenie w praktyce przemysłowej. Uważam, że jednoznacznie wykazano w pracy udowodnienie postawionej tezy. Przeprowadzenie badań (i ich wcześniejsze przygotowanie) wymagało od autora dużego nakładu pracy i staranności badawczej. Autor wykazał się umiejętnościami planowania i przeprowadzania eksperymentów i analizy uzyskanych wyników oraz rozwiązywania problemów naukowo-technicznych z dyscypliny Automatyka, Elektronika, Elektrotechnika i Technologie Kosmiczne. Pomimo zgłoszonych przeze mnie uwag o charakterze dyskusyjnym, praca mgr. inż. Szymona Stoczko jednoznacznie spełnia wymagania stawiane rozprawom doktorskim i wnoszę o dopuszczenia doktoranta do dalszych etapów przewodu doktorskiego.

