

Łódź, 01-12-2023 r.

prof. dr hab. inż. Sławomir Wiak, *mutli dr h.c.*  
Instytut Mechatroniki i Systemów Informatycznych  
Wydział Elektrotechniki, Elektroniki, Informatyki i Automatyki  
Politechnika Łódzka

## **Recenzja rozprawy doktorskiej** ***mgr inż. Sebastiana Bartela***

**p.t. "Elektromagnetyczna pompa o programowalnej charakterystyce wydajności z synchronicznym silnikiem liniowym o magnesach trwałych"**

wykonanej pod opieką:

**prof. dr hab. inż. Krzysztofa Kluszczyńskiego, jako promotora**  
oraz **dr inż. Zbigniewa Pilcha, jako promotora pomocniczego**

### **1. Podstawa i cel opinii**

Opinię niniejszą opracowałem na podstawie pisma dr hab. inż. Macieja Sułowicza, prof. P.K., Dziekana Wydziału Inżynierii Elektrycznej i Komputerowej Politechniki Krakowskiej z dnia 21.09.2023 r.

Podstawą opinii jest ocena osiągnięć naukowych Kandydata zawartych w przygotowanej Pracy Doktorskiej. Niniejsza opinia dotyczy wniosku o nadanie stopnia naukowego dr inż. Panu mgr inż. Sebastianowi Bartelowi w dziedzinie nauk inżynieryjne - technicznych, dyscyplina: Automatyka, Elektronika, Elektrotechnika i Technologie Kosmiczne.

### **1. Ocena wyboru tematu rozprawy**

Praca doktorska zatytułowana „**Elektromagnetyczna pompa o programowalnej charakterystyce wydajności z synchronicznym silnikiem liniowym o magnesach trwałych**” dotyczy aktualnej i rozwijanej w ostatnich latach dziedziny projektowania przetworników elektromechanicznych wspomaganego komputerowo.

Tematyka rozprawy ukierunkowana na problemy modelowania pól magnetycznych w połączeniu z analizą obwodową w synchronicznym silniku z magnesami trwałymi o ruchu liniowym niesie ze sobą nowe wyzwania od strony badawczej i wdrożeń. Pomyślnie rozwiązanie zadań podjętych w recenzowanej pracy doktorskiej przyczyniło się do opracowania unikalnej kompleksowej metodologii analizy stanów pracy elektromagnetycznej pompy z magnesem trwałym, jako tłokiem/biegnikiem o programowalnej charakterystyce wydajności.

Duże zainteresowanie tą tematyką wynika wprost z ogromnego zapotrzebowania w zakresie medycznym, a także z niezadowolającego stanu oferowanych aktualnie rozwiązań napędów i z potrzeby zintensyfikowania prac badawczych nad nowymi rozwiązaniami w zakresie silników elektrycznych liniowych z magnesami trwałymi, układów zasilania oraz metod sterowania napędem.

Wniknięcie we współczesne tendencje badawcze, w tym technologie komputerowe w dziedzinie zastosowań elektromagnetyzmu oraz tzw. „elektromagnetyzmu obliczeniowego” wspartego nowoczesnymi systemami informatycznymi prowadzi do następujących konstatacji:

- w większości struktur elektrotechnicznych podstawową rolę odgrywa pole elektromagnetyczne;
- rozbudowane systemy komputerowe potrafią już dać odpowiedź na pytanie, jaki jest rezultat działania systemu, w tym przypadku rozkład pola elektromagnetycznego, dla różnych struktur geometrycznych analizowanych obiektów, przy różnych warunkach granicznych;
- posiadane narzędzia numeryczne pozwalają na prowadzenie obliczeń elektromagnetycznych dla złożonych systemów i urządzeń.

Opinię tę potwierdza duża liczba publikacji opisujących nowe konstrukcje przetworników elektromechanicznych. Nowe konstrukcje przetworników mają mniejsze gabaryty i lepsze wykorzystanie materiałów czynnych w odniesieniu do jednostki objętości (lub mocy).

Właściwości przetworników elektromechanicznych są silnie zindywidualizowane i dopiero dokładna analiza „szerokiego” zbioru konstrukcji spełniających zadane parametry, w tym również predefiniowane funkcje celu, pozwoli na ich ocenę jakościową. Do tej klasy przetworników należy zaliczyć pompy z napędem elektrycznym.

Autor rozprawy stwierdza: cytuję (str. 9 – rys. 1.1): „Pompa z takim napędem stanowi urządzenie elektromagnetyczne, stąd też w dalszej części pracy będzie krótko określana mianem **pompy elektromagnetycznej**.

Taką definicję przetwornika elektromagnetycznego tej klasy należy uznać poprawną.

**Tematykę rozprawy uważam za w pełni aktualną i nowoczesną.** Szerokie spektrum problemów, które pojawiły się w trakcie wykonywania badań, w szczególności: zagadnienia modelowania komputerowego struktur 2D (struktury osiowo-symetryczne), wsparte badaniami laboratoryjnymi dla modeli rzeczywistych, jak również aktualność tej tematyki z punktu widzenia technicznego gwarantują, iż badania oraz wdrożenia zaproponowanych konstrukcji te będą kontynuowane w przyszłości.

## **2. Cel i tezy pracy (str. 40)**

Doktorant definiuje poprawnie cel pracy (rozdz. 2.1 – str. 38), cytuję:

*„Celem pracy jest opracowanie koncepcji i projektu oraz budowa prototypu napędu elektromagnetycznej pompy zintegrowanej z elektrycznym silnikiem liniowym z magnesem trwałym, jak też stanowiska laboratoryjnego do badania jego właściwości w stanach statycznych i dynamicznych“.*

**Cele pracy są zdefiniowane poprawnie.**

Jednakże, proponowałbym zmodyfikowanie tekstu w celu jego lepszego brzmienia.

Cele pracy proponuję zdefiniować następująco:

- opracowanie koncepcji wraz z projektem oraz budowa prototypu napędu elektromagnetycznej pompy zintegrowanej z elektrycznym silnikiem liniowym z magnesem trwałym,
- projekt i budowa stanowiska laboratoryjnego do badania jego właściwości w stanach statycznych i dynamicznych.

Dla tak zdefiniowanych celów pracy Doktorant określa koncepcję struktury modułowej pompy, wraz z oryginalnymi cechami proponowanego rozwiązania (str. 38), cytuję:

*„W przyjętej koncepcji elektryczny silnik liniowy jest zintegrowany z częścią hydrauliczną pompy w taki sposób, że biegnik silnika jest równocześnie tłokiem pompy. Pompa hydrauliczna będzie miała budowę modułową (moduł pompy odpowiada fragmentowi cylindra z pojedynczą cewką wzbudzenia), a układ zasilania każdego modułu będzie niezależny”.*

Efektom proponowanej koncepcji jest: „Zintegrowanie układu napędowego z częścią hydrauliczną w jedną kompaktową całość. Powyższe rozwiązanie prowadzi do zmniejszenia gabarytów pompy, upraszcza jej konstrukcję oraz zwiększa niezawodność jej działania.” Proponowane rozwiązanie należy uznać za oryginalne.

Doktorant definiuje dwie tezy pracy, cytuję (str. 40):

Teza I: Jest możliwe opracowanie nowej metody rozwiązywania modelu matematycznego bezrdzeniowego elektrycznego silnika liniowego z magnesem trwałym oraz modelu matematycznego N-cewkowego napędu pompy elektromagnetycznej, która wykorzystuje do opisu rozkładu siły elektromagnetycznej działającej na tłok/biegnik funkcję aproksymującą (przybliżającą).

Teza I została zweryfikowana eksperymentalnie dla stanów statycznych i dynamicznych na odpowiednio zaprojektowanych stanowiskach badawczych.

Teza II: Jest możliwe kształtowanie charakterystyki objętości przepompowanej cieczy oraz charakterystyki wydajności pompy elektromagnetycznej poprzez odpowiednią zmianę napięć zasilających cewki wzbudzenia.

Teza II została zweryfikowana na podstawie badań symulacyjnych, bazujących na zweryfikowanym pomiarowo modelu matematycznym napędu pompy elektromagnetycznej.

W wyniku prowadzonych badań, analiz i symulacji tezy 1 i 2 zostały udowodnione:

Teza 1 – w wyniku prowadzonych badań dla stanów statycznych i dynamicznych na odpowiednio zaprojektowanych stanowiskach badawczych (precyzyjną analizę przedstawiono w podrozdziale 4.4 oraz rozdziałach 5 i 6).

Teza II została udowodniona na podstawie badań symulacyjnych, bazujących na zweryfikowanym pomiarowo modelu matematycznym napędu pompy elektromagnetycznej (rozdziały 7 i 8).

*Przedstawiona do oceny rozprawa doktorska znajduje się w głównym nurcie współczesnego projektowania przetworników elektromechanicznych /elektromagnetycznych z wykorzystaniem nowoczesnych technik komputerowych.*

### Moje uwagi, jako recenzenta:

1. Należy odróżnić od siebie dwa pojęcia: aproksymację i przybliżenie.
2. Jeśli „stawiamy” tezy to należy je udowodnić; natomiast weryfikacja jako proces jest zadaniem matematycznym. Niniejsza uwaga dotyczy również tezy nr. 2.

### **3. Rozdział 3** - Opis budowy oraz zasady działania elektromagnetycznej pompy liniowej z magnesem trwałym jako tłokiem - biegnikiem (str. 41-47)

W niniejszym rozdziale Doktorant z dużą starannością przedstawia i omawia osiowo-symetryczny przestrzenny model elektromagnetycznej pompy o programowalnej charakterystyce wydajności wraz poszczególnymi elementami konstrukcji (rys. 3.1-3.3). Układ napędowy pompy stanowi konstrukcja składająca się z 9-cewkowego stojana oraz biegnika wykonanego z neodymowego magnesu trwałego, pracującego jako tłok (biegnik).

Doktorant definiuje następujące zadanie badawcze: „**Dokonana będzie parametryzacja wielkości geometrycznych przestrzennego modelu oraz szczegółowo zostanie opisana budowa i zasada działania pompy**”.

Wyniki poprawnie przeprowadzonej parametryzacji geometrycznej dla predefiniowanej struktury płaskiej, opracowywanej przez Doktoranta, konstrukcji elektromagnetycznej pompy liniowej przedstawiono dla 2-wymiarowego osiowo-symetrycznego schematu pompy (rys. 3.5).

### **4. Rozdział 4** - Badania symulacyjne i laboratoryjne pompy elektromagnetycznej z pojedynczą aktywowaną cewką przy zadanym położeniu tłoka (str. 48-113)

W pierwszym etapie prowadzonych analiz numerycznych dotyczących obliczeń rozkładów pola magnetycznego dla modelu 2D Doktorant definiuje model geometryczny w postaci pojedynczej aktywowanej (włączonej) cewki wzbudzenia oraz tłoka/biegnika elektromagnetycznej pompy, unieruchomionego dla zadanej pozycji bez cieczy. Obliczenia rozkładów pola magnetycznego dla modelu płasko-równoległego z pojedynczą aktywowaną cewką zostały przeprowadzone z wykorzystaniem pakietu FEMM 4.2 (rys. 4.2 – 4.6).

W wyniku przeprowadzonych obliczeń rozkładów pola magnetycznego dla modelu 2D (rys. 4.4 - model dyskretny FEMM-mesh) pompy z pojedynczą aktywowaną cewką dla wstępnie predefiniowanego położenia biegnikiem można wyznaczyć wartość siły elektromotorycznej działającej na biegnik.

### Uwaga recenzenta:

Na podstawie opracowanego modelu polowego, relatywnie prostego, Doktorant może dokonać doboru optymalnych wymiarów geometrycznych cewki wzbudzenia z punktu widzenia siły działającej na biegnik.

Dobór optymalnych wymiarów geometrycznych cewki (LC i TC) przyjęto jako zmienne konstrukcyjne dyskretne, przy założeniu stałej wartości powierzchni przekroju poprzecznego cewki (SC). Jest on nakierowany na zapewnienie „właściwej” dynamiki biegnika oraz jego płynne przemieszczanie się wzdłuż cylindra pompy wielo-wzbudnikowej. Jako zbiór danych wejściowych przyjęto 5 wariantów przekrojów poprzecznych cewki wzbudzenia (rys. 4.7).

Kluczem do sukcesu jest poprawne sformułowanie funkcji celu (jako kryterium jakości) w ramach realizowanej procedury doboru optymalnych wymiarów geometrycznych cewki.

Jak słusznie stwierdza Doktorant, cytując (str. 55): „Istotnym założeniem jest to, że przy rozpatrywaniu różnych wariantów konstrukcji cewek, powierzchnia przekroju poprzecznego cewek  $S_C$  jest stała:  $S_C = L_C T_C = const.$  (z punktu widzenia procedury optymalizacji jest to funkcja ograniczająca zbiór rozwiązań dopuszczalnych)”.

Na podstawie przeprowadzonych obliczeń rozkładów pola magnetycznego dla wybranych pięciu wariantów geometrii cewek wzbudzenia (Tab. 4.1 i rys. 4.7) wyznaczono rozkłady sił elektromagnetycznych działających na biegnik w funkcji jego położenia dla wszystkich wariantów cewek (rys. 4.8).

Doktorant stwierdza, iż istotą poprawnej pracy pompy elektromagnetycznej jest położenie tłoka/biegnika w lokalnym układzie współrzędnych (rys. 4.9) w chwili przełączania cewek. Biegnik w chwili przełączania cewek znajduje się w pozycji  $z_R = L_C$ .

Przedstawione przez Doktoranta wyniki analizy wskazują, że dla dokonania doboru optymalnych wymiarów cewki wzbudzenia należy wziąć pod uwagę dwie charakterystyczne wartości siły: wartość maksymalną siły  $F_{max}$  (występującą przy współrzędnej  $z_{Rmax}$ ) oraz wartość siły w chwili przełączenia cewek (występującą przy współrzędnej  $z_R = L_C$ ); patrz rysunki 4.12 i 4.13.

Dla prowadzonych analiz nakierowanych na wybór/dobór struktury geometrycznej przetwornika, w szczególności dobór optymalnych wymiarów geometrycznych cewki, zdefiniowano funkcję celu (kryterium jakości) w postaci średniej arytmetycznej dwu sił  $Q_A$  (wzór 4.6, rys. 4.14) i  $Q_G$  (wzór 4.7, rys 4.15).

Prowadzone badania, w tym analizy porównawcze dla poszczególnych rozwiązań (konstrukcji) prowadzą do następującego, w pełni poprawnego, wniosku (cytuje):

„W kontekście obu zaproponowanych funkcji celu optymalny jest wariant 3, jak stwierdza Doktorant, charakteryzujący się proporcją wymiarów geometrycznych  $T_C$  do  $L_C$  równą  $1 \times 1$  (przedstawiony na rys. 4.16). Dla tego wariantu wyznaczono rozkład siły elektromagnetycznej działającej na biegnik w funkcji jego położenia dla prądu wzbudzenia cewki (rys. 4.17).”

Wyznaczono ponadto rozkład siły elektromagnetycznej działającej na biegnik w funkcji jego względnego położenia, czyli położenia w stosunku do długości cewki:  $z_R/L_C$  dla wszystkich rozpatrywanych wariantów cewek (rys. 4.18 i 4.19).

Doktorant definiuje problem: „W odniesieniu do rys. 4.12c i 4.13c i dokonanej analizy można postawić pytanie - Czy jest możliwe takie ukształtowanie cewki wzbudzenia, aby siła działająca na biegnik w chwili przełączenia cewek była równa wartości siły maksymalnej:  $F_{max} = F(z_R = L_C)$  ?.”

W wyniku przeprowadzonych symulacji Doktorant stwierdza, iż: „...przypadek taki występuje przy wymiarach cewki:  $T_C = 12,5$  mm i  $L_C = 8$  mm (proporcji  $1,25 \times 0,8$ ). Wariant cewki wzbudzenia  $F_{max} = F(z_R = L_C)$  przedstawiono na rys. 4.20. Porównano go z wybranym wariantem optymalnym (wariant 3) na kolejnych rysunkach 4.21 i 4.22. W kontekście przyjętej funkcji celu (rys. 4.22c) optymalnym wariantem pozostaje wariant 3. Dla wariantu  $F_{max} = F(z_R = L_C)$  opracowano rys. 4.23 analogiczny do rysunków 4.12 i 4.13”.

Istotnym elementem podsumowania przeprowadzonej przez Doktoranta analizy jest zestawienie rozkładów siły elektromagnetycznej działającej na biegnik w funkcji jego położenia dla 6 rozpatrywanych wariantów cewek oraz procesu optymalizacji geometrii cewek przy założeniu stałej długości cylindra (rys. 4.24).

**Na szczególne podkreślenie zasługuje również podrozdział 4.3** dotyczący analizy porównawczej wyników modelowania matematycznego (komputerowego) zweryfikowanej w oparciu o badania laboratoryjne siły elektromagnetycznej. Schemat stanowiska laboratoryjnego przedstawiono na rys. 4.25. Składa się on z trzech kluczowych komponentów: napędu pompy elektromagnetycznej, układu pozycjonowania biegnika pompy i tensometrycznego układu pomiarowego (przedstawionego na rysunkach 4.26 - 4.29).

**Prowadzone badania laboratoryjne były nakierowane na pomiar rozkładu siły elektromagnetycznej działającej na biegnik silnika w funkcji jego położenia.**

W celu oceny dokładności opracowanego modelu połowego układu "pojedyncza aktywowana cewka wzbudzenia – tłok/biegnik silnika"; rozkład siły elektromagnetycznej uzyskanych z pomiarów (rys. 4.30) z rozkładem siły elektromagnetycznej, uzyskanym w wyniku obliczeń komputerowych (rys. 4.31) przedstawiono na rys. 4.32. Należy podkreślić dużą zgodność uzyskanych wyników.

Powyższa analiza i jej wyniki upoważniają do sformułowania następującego wniosku:

Wniosek: Model komputerowy/połowy silnika liniowego jest poprawny i stanowi podstawę do dalszych analiz numerycznych i procedur projektowych.

Istotnym wnioskiem wynikającym z prowadzonych obliczeń rozkładów sił dla pól wektorowych z wykorzystaniem pakietów klasy CAD są również próby definiowania zastępczych modeli analitycznych, w tym modeli o parametrach skupionych.

Taką próbę z sukcesem podejmuje Doktorant (podrozdział 4.4) definiując następujące kluczowe zagadnienia dotyczące (cytuje):

- Opracowania odpowiedniej metody analitycznego opisu siły elektromagnetycznej działającej na biegnik w elektromagnetycznej pompie (znalezienie funkcji aproksymującej/przybliżającej) jest kluczowe z punktu widzenia proponowanej nowej metody rozwiązywania modelu matematycznego bezrzedniowego silnika liniowego z magnesem trwałym,
- Aproksymacji rozkładu siły elektromagnetycznej działającej na biegnik, bazująca na funkcji Gauss'a,
- Aproksymacji rozkładu siły elektromagnetycznej działającej na biegnik, bazująca na funkcji Kloss'a oraz jej modyfikacjach,
- Aproksymacji rozkładu strumienia sprzężonego z cewką wzbudzenia w funkcji położenia biegnika,
- Analitycznego wyznaczenia siły elektromotorycznej rotacji indukowanej w cewce wzbudzenia.

Oddzielnym i kluczowym zagadnieniem jest opracowanie koncepcji stanowiska badawczego do pomiaru przebiegu czasowego położenia biegnika pompy elektromagnetycznej z wykorzystaniem szybkiej kamery (podrozdział 4.4.7).

Stanowisko zostało zaprojektowane i zbudowane z następujących komponentów: pompy elektromagnetycznej z pojedynczą zasilaną cewką wzbudzenia i układu pomiarowego szybkiej kamery, rejestrującej 240 obrazów na sekundę. Dzięki temu stanowisku można było prowadzić badania w zakresie pomiarów przebiegu czasowego położenia biegnika pompy elektromagnetycznej w funkcji czasu. Ponadto można wyznaczyć maksima wychylenia biegnika, które stanowią bazę wiedzy do wyznaczenia stałej czasu zanikania ruchu oscylacyjnego biegnika (rys. 4.59).

Wnioski Doktoranta (str. 113); cytuję:

*„Zaproponowana metoda pomiarowa z użyciem szybkiej kamery dobrze się sprawdziła. Jej zaletą jest niewielki koszt stanowiska laboratoryjnego, łatwa obsługa i możliwości wielokrotnego łatwego powtarzania pomiarów w krótkim przedziale czasu. Metodę ta można uznać za najbardziej adekwatną na obecnym etapie realizacji układu zasilania i badania własności dynamicznych napędu pompy. W przyszłości, przy badaniu różnych strategii sterowania pompą (w eksperymentach przeprowadzanych z cieczą roboczą) konieczne będzie rozbudowanie stanowiska pomiarowego, umożliwiające jeszcze większą dokładność pomiaru położenia tłoka/biegnika. Rozważana jest możliwość wykorzystania optycznych metod pomiarowych (dalmierza laserowego o częstotliwości próbkowania wyższej, niż częstotliwość próbkowania szybkiej kamery). Na etapie konstrukcji prototypu możliwe jest też zabudowanie odpowiedniego zespołu cewek pomiarowych. Propozycje te należy uwzględnić w przyszłości jako kierunki dalszych prac rozwojowych.”*

*Powyższą analizę, wraz w pełni poprawnymi wynikami obliczeń, należy uznać za osiągnięcie Doktoranta w obszarze badań nakierowanych na uzyskanie stopnia doktora w dziedzinie nauk technicznych.*

## **5. Rozdział 5** - Badania symulacyjne i laboratoryjne pompy elektromagnetycznej z pojedynczą aktywowaną cewką przy zadanym położeniu tłoka (str. 114-144)

W niniejszym rozdziale Doktorant realizuje dalszy etap badań nakierowany na zdefiniowanie i budowę modelu matematycznego bezrdzeniowego silnika liniowego z magnesem trwałym o strukturze „skupionej” w następujących krokach:

- Definicja modelu matematycznego układu "cewka wzbudzenia – tłok/biegnik" z pojedynczą cewką wzbudzenia dla stanów dynamicznych oraz jego badania symulacyjne: równania równowagi mechanicznej (dla tłoka/biegnika) i równania równowagi elektrycznej (dla cewki wzbudzenia),
- Koncepcja i budowa modelu matematycznego pompy elektromagnetycznej dla stanów dynamicznych, opisująca jego wielkości wejściowe i wyjściowe oraz wielkości zakłócające (rys. 5.1),
- Dla powyższego modelu matematycznego napędu pompy Doktorant opracował model symulacyjny w środowisku MATLAB Simulink, (rys. 5.2 i 5.3),

Niniejszy model zawiera następujące parametry:  $R$  (rezystancja cewki wzbudzenia),  $L$  (indukcyjność cewki wzbudzenia) i  $m$  (masa biegnika).

Dla zbudowanego prototypu pompy elektromagnetycznej obliczono stosowne wartości: rezystancji cewki wzbudzenia, indukcyjności cewki wzbudzenia (na podstawie opracowanego modelu polowego – struktura 2D), oraz masy biegnika (masa pierścieniowego magnesu trwałego).

Badania symulacyjne przeprowadzono dla 8 przypadków (str. 118-119) zmienności danych wejściowych, traktowanych jako parametry; napięcie zasilania jako wartość skokowa  $u_z(t) = U_z \cdot 1(t)$ , stan obciążenia (wartość zmienna), -  $F_m$  oraz  $Z_{R0}$  (wartość zmienna).

Przykładowe rozkłady sił elektromagnetycznych działających na biegnik w funkcji jego położenia przedstawiono na rysunku 5.4 (str. 119).

Przebiegi przyśpieszenia, prędkości, położenia biegnika oraz prądu cewki wzbudzenia dla pełnego modelu matematycznego napędu pompy elektromagnetycznej (model A), dla różnych wartości siły obciążenia  $F_m$ , napięcia zasilania cewki wzbudzenia i pozycji początkowych biegnika przedstawiano na rys.: 5.5-5.8.

Badania symulacyjne przeprowadzono w celu potwierdzenia poprawności modelu pod względem jakościowym, czyli z punktu widzenia wpływu warunków zasilania, obciążenia silnika oraz warunku początkowego dla położenia biegnika, na charakter przebiegu funkcji czasowych. Szczególną uwagę skupiono na czasie potrzebnym do tego, aby biegnik silnika przemieścił się od pozycji początkowej do środka cewki wzbudzenia (połowa pierwszej oscylacji)  $\Delta T$  oraz na czasie ustalania się przebiegu oscylacyjnego biegnika  $\Delta T_{mech}$ , w odniesieniu do każdego przypadku.

Dla tak zdefiniowanego modelu matematycznego napędu pompy elektromagnetycznej z pojedynczą cewką wzbudzenia przeprowadzono analizę porównawczą wyników położenia biegnika w funkcji wyznaczonych pomiarowo z wynikami wyznaczonymi na podstawie opracowanego modelu matematycznego (rys. 5.15 – str. 130 i rys. 5.16 str. 131) dla modelu A opisanego wzorami (5.39) i (5.40).

[Doktorant definiuje „linię trendu wygasania ruchu oscylacyjnego biegnika” \(rys. 5.17 i rys. 5.18\). Należy podkreślić, iż opracowany model matematyczny bardzo dobrze odwzorowuje przebieg stanu dynamicznego w rzeczywistym obiekcie.](#)

Jak słusznie stwierdza Doktorant (podrozdział 5.3, str. 133), cytując:

*„Bardzo często w różnych procesach sterowania układami napędowymi, zależy nam na tym, aby model matematyczny był jak najprostszy, dając możliwość jak najszybszego uzyskiwania wyników w czasie rzeczywistym. Z tego powodu postanowiono przeanalizować wpływ upraszczania pełnego analitycznego modelu matematycznego napędu pompy elektromagnetycznej (modelu A) na dokładność obliczeń przebiegów czasowych i na wyznaczanie charakterystycznego czasu  $\Delta T$  (kluczowego w procesie sterowania).”*

Konsekwencją tego podejścia są trzy modele:

Model A (równania 5.41 i 5.42),

Model B (równania 5.43 i 5.44) oraz

Model C (równania 5.45 i 5.46) uproszczony.

Istotną zaletą proponowanego podejścia jest uproszczenie procedury obliczeń oraz skrócenie czasu obliczeń, szczególnie przystępnej ocenie projektowanej konstrukcji pompy elektromagnetycznej.



Zestawienie przebiegów czasowych położenia biegnika, prądów w cewce wzbudzenia, prędkości biegnika, przyspieszenia biegnika i położenia biegnika, wyznaczonych na podstawie badań symulacyjnych dla modeli A, B i C biegnika przedstawiono na rysunkach (5.19 – 5.26).

Należy stwierdzić, iż przeprowadzona analiza porównawcza przebiegów w/w wielkości fizycznych stanowi istotny komponent rozprawy, który dowodzi o aplikacyjności modeli A, B i C.

**6. Rozdział 6** - Iteracyjny model matematyczny n-cewkowego napędu pompy elektromagnetycznej i jego badania symulacyjne, (str. 145-166)

Doktorant definiuje następujący scenariusz badań (cytuje – str. 151), który uznaje za w pełni poprawny:

*„Badania symulacyjne modelu matematycznego N-cewkowego napędu pompy elektromagnetycznej przeprowadzono na przykładzie zaprojektowanego i wykonanego prototypu napędu 9-cewkowego ( $N=9$ ), szczegółowo omówionego w rozdziale 4.3.*

*Badania symulacyjne wykonano dla pracy ciągłej (kolejna cewka jest aktywowana natychmiast po wyłączeniu cewki poprzedniej) dla biegu jałowego  $F_{mw} = 0$  N oraz dla stanu obciążenia  $F_{mw} = 2$  N dla fazy wyrzutowej pierwszego cyklu pracy (rys. 6.2). Dla każdej przeprowadzonej symulacji przedstawiane są najpierw sygnały sterujące (napięcia zasilające) dla poszczególnych cewek wzbudzenia, a następnie zamieszczane są zestawienia przebiegów czasowych: przyspieszenia  $a$ , prędkości  $v$  oraz położenia tłoka/biegnika  $Z_R$  dla pierwszego cyklu dla fazy wyrzutowej.”*

Analizowano następujące przypadki:

1. Amplitudy napięcia dla poszczególnych cewek wzbudzenia są jednakowe. Wyniki analiz są przedstawione na rysunkach (6.5 – 6.12),
2. Amplitudy napięcia dla poszczególnych cewek wzbudzenia są różne. Wyniki analiz są przedstawione na rysunkach (6.13 – 6.16).

Należy stwierdzić, iż opracowany iteracyjny model matematyczny napędu pompy elektromagnetycznej umożliwia komputerową analizę wpływu wartości napięć, przykładanych na cewki wzbudzenia pompy na ruch tłoka/biegnika i jego właściwości dynamiczne.

Podsumowanie: *Należy podkreślić, iż opracowany przez Doktoranta iteracyjny model matematyczny napędu pompy elektromagnetycznej może być stosowany przy badaniu różnych algorytmów sterowania implementowanych w procesie sterowania wydajnością pompy. Proponowane rozwiązanie należy uznać za oryginalne.*

**7. Rozdział 7** - Badania symulacyjne możliwości kształtowania charakterystyki objętości przepompowanej cieczy i wydajności pompy poprzez odpowiednie zmiany napięć cewek wzbudzenia przy pracy ciągłej pompy, (str. 167-179)

Wydajność pompy  $Q_P$  jest określona wzorem (7.47) (w analizowanym przedziale czasu), czyli dla fazy wyrzutowej pierwszego cyklu) jest funkcją prędkości  $v$  tłoka/biegnika oraz jego polem powierzchni  $S_p$ . Z kolei objętość przepompowanej cieczy definiuje wzór  $V_f$  (7.48).

Charakterystyki zmian objętości przepompowanej cieczy przy pracy ciągłej pompy przy jednakowych napięciach zasilania cewek wzbudzenia dla 3 przypadków (8V, 12V i 16 V) przedstawiono na rysunku 7.1.

Z kolei na rysunku 7.2 przedstawiono charakterystyki zmian wydajności pompy przy jednakowych napięciach zasilania cewek wzbudzenia dla pierwszego cyklu dla fazy wyrzutowej – 3 przypadków (8V, 12V i 16 V).

Sygnaly sterujące (napięcia zasilające) dla poszczególnych cewek wzbudzenia przy pracy ciągłej pompy przedstawiono na rysunku 7.3. W tym cyklu kolejna cewka wzbudzenia jest zasilana natychmiast po wyłączeniu napięcia cewki poprzedniej.

Sygnaly sterujące (napięcia zasilające) dla poszczególnych cewek wzbudzenia przy pracy ciągłej pompy przedstawiono na rysunku 7.4. W tym cyklu kolejna cewka wzbudzenia jest zasilana natychmiast po wyłączeniu napięcia cewki poprzedniej.

Na rysunkach 7.5 i 7.6 oraz na rysunkach 7.7 i 7.8 przedstawiono odpowiednio przebiegi czasowe objętości przepompowanej cieczy oraz wydajności pompy. Z kolei na rysunkach 7.9 i 7.10 przedstawiono charakterystyki objętości przepompowanej cieczy oraz wydajności pompy dla 3 różnych przypadków, wybranych z przeprowadzonych powyżej symulacji.

[Przedstawiona przez Doktoranta, w niniejszym rozdziale, bardzo ciekawa analiza trybów pracy pompy elektromagnetycznej poprzez zmianę napięć podawanych na cewki wzbudzenia stwarza możliwości kształtowania charakterystyki wydajności pompy elektromagnetycznej w szerokim zakresie, jak również programowania wydajności pompy.](#)

Istotnie ważny jest drugi wniosek Doktoranta, cytuję:

*[„Zupełnie nowe możliwości kształtowania wydajności pompy oraz jej dynamiki stwarzają algorytmy sterowania, zakładające równoczesne aktywowanie dwóch lub trzech cewek. Prowadzenie badań tego typu należy uznać, jako kierunek dalszych prac.”](#)*

**8. Rozdział 8** Badania symulacyjne możliwości kształtowania charakterystyki objętości przepompowanej cieczy i wydajności pompy poprzez odpowiednią zmianę czasów przełączania cewek wzbudzenia przy pracy skokowej pompy (str. 180-201)

Doktorant wykonał również badania symulacyjne dla modelu matematycznego pompy w odniesieniu do charakterystyk objętości przepompowanej cieczy i wydajności pompy przy pracy skokowej dla dwóch wartości  $F_{mw} = ON$  i  $2N$ . Wyniki badań symulacji przedstawiono na rysunkach 8.1-8.8.

W kolejnym etapie badań postanowiono poddać również analizie wpływ czasu  $T_{delay}$  na charakterystykę objętości przepompowanej cieczy) oraz na charakterystykę wydajności pompy. Do badań przyjęto następujące wartości  $T_{delay}=200, 400$  i  $600$  ms). Charakterystyki zmian objętości przepompowanej cieczy dla pracy skokowej pompy, dla przyjętych powyżej danych wejściowych przedstawiono na rysunku 8.18.

**9. Rozdział 9** Podsumowanie pracy doktorskiej w kontekście przyjętego celu oraz postawionych tez I i II (str. 202-203)

Rozdział 9 jest poświęcony syntetycznemu omówieniu zawartości merytorycznej w poszczególnych rozdziałach (str. 202-203). Jest on poprawnie sformułowany.

Zawarta w nim wiedza (wnioski) dają czytelnikowi możliwość wstępnego zapoznania się z filozofią pracy, ideą i celami aproponowanych badań oraz wnioskami końcowymi.

Komplementuję przyjętą filozofię – jako formę podsumowania rozprawy doktorskiej i osiągniętych wyników badań, które oceniam bardzo wysoko.

## 10. LITERATURA

W pracy zawarto 81 pozycji literatury – poprawnie dobranych w kontekście prowadzonych badań w ramach przygotowywanej rozprawy doktorskiej.

### Konkluzja recenzji

Praca Pana mgr inż. Sebastiana Bartela jest wynikiem systematycznych studiów nad zagadnieniem efektywnego połączenia modeli matematycznych sformułowanych dla problemów pola magnetycznego oraz podejścia poprzez schematy obwodowe dla układów zasilania i sterowania.

Stwierdzam, iż recenzowana praca doktorska jest kontynuacją tematyki badawczej realizowanej pod kierunkiem Pana Profesora dr hab. inż. Krzysztofa Kluszczyńskiego. Należy nadmienić, iż praca doktorska mgr inż. Sebastiana Bartela mieści się również w tej samej grupie zagadnień.

Należy wyraźnie stwierdzić, iż zainteresowanie tą tematyką wielu zagranicznych ośrodków badawczych dodatkowo potwierdza jej aktualność.

Tematykę rozprawy uważam za w pełni aktualną i nowoczesną. Szerokie spektrum problemów, które pojawiły się w trakcie wykonywania badań, jak również aktualność tej tematyki z punktu widzenia technicznego gwarantują, iż badania te będą kontynuowane w przyszłości.

Na szczególne podkreślenie zasługuje fakt połączenia analizy polowej z analizą obwodową (przeniesienie wyników analizy polowej na płaszczyznę analizy obwodowej w oparciu o parametry skupione modelu silnika zdefiniowane z wykorzystaniem modeli polowych). Tak postawiony generalny cel pracy uważam za w pełni poprawny.

*Autor wyszczególnia dwie tezy rozprawy (uwagi dotyczące tezy I zawarłem w podrozdziale 2.2).*

*Tezy pracy sformułowano poprawnie. Zaprezentowane wyniki symulacji komputerowych oraz pomiarów mające na celu udowodnienie postawionych tez przedstawiono w sposób czytelny i łatwy do zrozumienia.*

Chciałbym zwrócić uwagę, iż modele polowe przetworników elektromechanicznych (elektromagnetycznych) są praktycznie dzisiaj pewnym standardem. Dopiero ich połączenie z modelami obwodowymi opartymi o wyniki analizy polowej jest wkładem twórczym. Moim zdaniem tezy I i II warto uzupełnić o następujący akapit: **„Opracowanie kompleksowego modelu polowo-obwodowego jest podstawą poprawnej analizy właściwości ruchowych pompy elektromagnetycznej, na etapie projektowania wybranej konstrukcji”.**

Tak sformułowany akapit stanowi pewien imperatyw, który został w pracy udowodniony. Polecam moją propozycję uwadze Doktoranta. Powyższe uwagi nie podważają w żaden sposób postawionej w pracy tezy, lecz jedynie wyraźniej ją precyzują.

### **3. Ocena merytoryczna rozprawy**

Przedstawiona praca została przygotowana jako **praca promocyjna (doktorska)**. Praca składa się z ośmiu rozdziałów podstawowych, podsumowania i spisu literatury (81 pozycji, w tym 11 prac własnych Doktoranta).

Recenzowaną pracę zaliczam do grupy prac interdyscyplinarnych łączących w sobie wiedzę z technik komputerowych/informatycznych jak i przetworników elektromechanicznych. Praca jest nakierowana na rozwiązanie konkretnego problemu naukowego i technicznego, natomiast zastosowane narzędzia, jakimi są techniki komputerowe są podporządkowane temu celowi. Takie postawienie problemu uważam za w pełni poprawne i nowoczesne. Autor posługuje się nowoczesnym narzędziem z dziedziny oprogramowania, mianowicie pakietem FEMM – wersji 4.2. Opanowanie tego narzędzia przez Doktoranta jest wzorcowe.

W dobie rozpowszechniania oprogramowania komercyjnego, warto zauważyć, że użytkowanie nowoczesnych i wyspecjalizowanych pakietów wymaga wysokiej klasy specjalistów. Na szczególną uwagę zasługują również pakiety, tzw. „Open Source”. Do tej klasy zaliczam pakiet FEMM (ang. Finite Element Method Magnetics) dedykowany do obliczeń rozkładów pola elektromagnetycznego w strukturach 2D.

***Praca jest skonstruowana poprawnie, zawiera obszerny wstęp wraz z omówieniem stanu wiedzy, wyraźnie sformułowane cele i kierunki badań oraz poprawnie postawione tezy pracy.***

*W wyniku prowadzonych badań, analiz i symulacji tezy I i II zostały udowodnione:*

*Teza I – w wyniku prowadzonych badań dla stanów statycznych i dynamicznych na odpowiednio zaprojektowanych stanowiskach badawczych (precyzyjną analizę przedstawiono w podrozdziale 4.4 i rozdziałach 5 i 6).*

***Teza II została udowodniona na podstawie badań symulacyjnych, bazujących na zweryfikowanym pomiarowo modelu matematycznym napędu pompy elektromagnetycznej (rozdziały 7 i 8).***

***Przedstawiona do oceny rozprawa doktorska znajduje się w głównym nurcie współczesnego projektowania urządzeń elektrotechnicznych za pomocą technik komputerowych należących do elektromagnetyzmu obliczeniowego.***

Dopiero jego połączenie z modelem obwodowym opartym o wyniki analizy polowej jest wkładem twórczym. Moim zdaniem teza pracy winna brzmieć następująco: **„Opracowanie kompleksowego modelu polowo-obwodowego jest podstawą poprawnej analizy właściwości ruchowych pompy elektromagnetycznej, na etapie projektowania wybranej konstrukcji”.**

Tak sformułowane tezy stanowią pewien imperatyw, który został w pracy udowodniony. Polecam moją propozycję uwadze Doktoranta. Powyższe uwagi nie podważają w żaden sposób postawionej w pracy tezy, lecz jedynie wyraźniej ją precyzują.

**Rozdziały 3, 4, 5, 6, 7 i 8 stanowią własny wkład Doktoranta.** Jest to niewątpliwe osiągnięcie Doktoranta i stanowi samodzielne rozwiązanie poprawnie postawionego zadania badawczego. Przedstawione wyniki symulacji oraz ich porównanie z wynikami pomiarów potwierdzają poprawność zaproponowanego podejścia.

Stwierdzam, iż wnioski (podsumowanie) z przeprowadzonej w pracy kompleksowej analizy polowo-obwodowej, zawarte w rozdziale 9, są sformułowane poprawnie i dowodzą poprawności postawionej tezy i realizacji celów pracy.

### **Uwagi ogólne**

Na pracę autora, moim zdaniem, należy patrzeć jak na pewne studium o predefiniowanym zakresie stosowalności. Dotyczy ona wybranej grupy silników prądu stałego z magnesami trwałymi. Jednakże zaproponowane przez Doktoranta podejście może być zaimplementowane do innej grupy silników.

Na podkreślenie zasługuje bardzo precyzyjny i czytelny sposób prezentacji wyników oraz bardzo dobra strona graficzna pracy.

### **5. Uwagi szczegółowe**

W pracy znalazłem jedynie drobne błędy edytorskie, które nie wpływają na ostateczną pozytywną ocenę pracy, nie będę więc ich zamieszczał.

### **6. Konkluzja recenzji**

Stwierdzam, iż praca jest napisana bardzo starannie, układ pracy jest precyzyjny i logiczny, strona graficzna pracy jest wręcz wzorowa. Wnioski końcowe uzyskane w pracy są poprawne i interesujące.

Przedstawione powyżej uwagi ogólne i szczegółowe nie obniżają mojej wysokiej oceny pracy.

Wyniki rozważań zawarte w pracy upoważniają do stwierdzenia, iż zostały udowodnione tezy rozprawy oraz osiągnięto założone cele pracy.

Przedstawiona rozprawa dowodzi, że Doktorant umie korzystać z najnowszej literatury w obranej dziedzinie wiedzy, podchodzi do niej krytycznie a ponadto potrafi twórczo rozwijać osiągnięcia innych autorów.

Doktorant wykazał się bardzo dobrą znajomością nowoczesnej metodyki modelowania złożonych obiektów fizycznych, metod numerycznych i technik programowania. Uważam, że praca stanowi samodzielne rozwiązanie przez Autora szeregu zagadnień naukowych przy użyciu nowoczesnych metod badawczych.

Stwierdzam, iż **przedstawiona rozprawa p.t. "Elektromagnetyczna pompa o programowalnej charakterystyce wydajności z synchronicznym silnikiem liniowym o magnesach trwałych"** autorstwa **Pana mgr prof. Sebastiana Bartela** stanowi samodzielne rozwiązanie zadania badawczego i spełnia wszystkie wymagania stawiane pracom doktorskim przez Ustawę o Tytule Naukowym i Stopniach Naukowych.

Podstawa prawna: „Warszawa, dnia 27 września 2017 r. Poz. 1789, OBWIESZCZENIE MARSZAŁKA SEJMU RZECZYPOSPOLITEJ POLSKIEJ z dnia 15 września 2017 r. w sprawie ogłoszenia jednolitego tekstu ustawy o stopniach naukowych i tytule naukowym oraz o stopniach i tytule w zakresie sztuki”.

**W związku z powyższym stawiam wniosek** o przyjęcie przedstawionej pracy jako rozprawy doktorskiej i dopuszczenie jej Autora Pana mgr inż. Sebastiana Bartela do publicznej obrony pracy.



prof. dr hab. inż. Sławomir Wiak, *dr h.c.*

Łódź, 01-12-2023 r.

prof. dr hab. inż. Sławomir Wiak, *dr h.c.*  
Instytut Mechatroniki i Systemów Informatycznych  
Wydział Elektrotechniki, Elektroniki, Informatyki i Automatyki  
Politechnika Łódzka

## **Recenzja rozprawy doktorskiej mgr inż. Sebastiana Bartela** **Wniosek dodatkowy**

Biorąc pod uwagę wysoki poziom merytoryczny pracy (zastosowane zaawansowane metody modelowania i symulacji komputerowej), nowoczesność podjętej tematyki, bardzo ciekawe wyniki badań, precyzyjnie sformułowane wnioski końcowe oraz wzorcową stroną graficzną pracy uważam recenzowaną pracę za wyróżniającą.

Zgłaszam wniosek o wyróżnienie rozprawy doktorskiej p.t. **Elektromagnetyczna pompa o programowalnej charakterystyce wydajności z synchronicznym silnikiem liniowym o magnesach trwałych** autorstwa Pana mgr inż. Sebastiana Bartela.



prof. dr hab. inż. Sławomir Wiak, *dr h.c.*