

**dr hab. inż. Maciej Sułowicz prof. PK**  
Katedra Inżynierii Elektrycznej  
Wydział Inżynierii Elektrycznej i Komputerowej  
Politechnika Krakowska im. Tadeusza Kościuszki  
ul. Warszawska 24, 31-155 Kraków  
Tel. 12 628 26 58, e-mail: [maciej.sulowicz@pk.edu.pl](mailto:maciej.sulowicz@pk.edu.pl)

Kraków, 30.08.2021 r.

## **RECENZJA ROZPRAWY DOKTORSKIEJ**

Pana mgr. inż. **Macieja Skowrona** pt.:

*„Diagnostyka uszkodzeń silników indukcyjnych i synchronicznych z magnesami trwałymi przy wykorzystaniu sieci neuronowych z głębokim uczeniem”*

wykonanej na Wydziale Elektrycznym Politechniki Wrocławskiej

Promotor: prof. dr hab. inż. Czesław T. Kowalski

Promotor pomocniczy: dr hab. inż. Marcin Wolkiewicz, prof. PWr

Recenzję wykonano na podstawie uchwały podjętej przez Radę Dyscypliny Naukowej  
Automatyka, Elektronika i Elektrotechnika Politechniki Wrocławskiej  
z dnia 21 czerwca 2021 r., nr pisma 95/RDN\_AEE/2021

## **1. Ogólna charakterystyka rozprawy doktorskiej**

Recenzowana rozprawa doktorska obejmuje 169 strony i składa się ze spisu treści, wykazu ważniejszych oznaczeń, 9 rozdziałów w tym wprowadzenia i wniosków końcowych, spisu literatury zawierającego 255 pozycji, w tym 1 pozycji autorskiej i 9 pozycji współautorskich Autora rozprawy. Na końcu rozprawy zamieszczono trzy załączniki z jednostkami bazowymi do obliczeń wielkości względnych w modelu matematycznym silnika indukcyjnego oraz parametry znamionowe zastosowanych do badań diagnostycznych silników indukcyjnych klatkowych i zastosowanego silnika synchronicznego z magnesami trwałymi.

Przedstawione w rozprawie wyodrębnione i ponumerowane rozdziały to:

### **Rozdział 1. Wprowadzenie**

Rozdział 1 zawiera wprowadzenie w tematykę rozprawy i przegląd aktualnego stanu wiedzy w zakresie diagnostyki maszyn elektrycznych prądu przemiennego ze szczególnym ukierunkowaniem na zastosowanie różnych typów sieci neuronowych w metodach diagnostycznych w ocenie stanu tych maszyn. Na podstawie obszernego przeglądu literatury określono stan wiedzy związany z zagadnieniami poruszonymi w rozprawie, sprecyzowano cel, tezę i zakres pracy. Sformułowano wnioski po rozpoznaniu stanu wiedzy i wskazano te obszary zastosowań sieci neuronowych w diagnostyce maszyn elektrycznych, które są aktualnie nie do końca jeszcze rozpoznane i dobrze zbadane.

### **Rozdział 2. Charakterystyka uszkodzeń silników elektrycznych prądu przemiennego**

W rozdziale 2 przedstawiono podział uszkodzeń obwodów stojana i wirnika silników prądu przemiennego. Omówiono najczęściej występujące problemy przy eksploatacji silników, które wpływają na powstawanie uszkodzeń. Podano przyczyny występowania uszkodzeń dla silników indukcyjnych i silników synchronicznych z magnesami trwałymi. Zilustrowano miejsca powstawania poszczególnych uszkodzeń.

### **Rozdział 3. Modelowanie matematyczne uszkodzeń stojana oraz wirnika silników indukcyjnych i PMSM**

W rozdziale 3 przedstawiono modele matematyczne wykorzystane do modelowania uszkodzeń stojana i wirnika silników indukcyjnych oraz silników PMSM. Do uwzględnienia uszkodzeń Doktorant zastosował modele obwodowe oraz model połowy. Do modelowania uszkodzeń stojana silnika indukcyjnego został przyjęty model oparty na wektorowym współczynniku uszkodzenia z układem współrzędnych  $\alpha$ - $\beta$  nieruchomy względem stojana.

Do modelowania uszkodzeń klatki wirnika silnika indukcyjnego Doktorant wybrał uproszczony model wirnika o uszkodzonej klatce z modelowaniem prętów jako równoległe połączonych rezystancji o wartościach zależnych od stanu technicznego poszczególnych prętów. Dla silnika PMSM na potrzebę modelowania zwarć przyjęto model w układzie współrzędnych ABC wyrażony w jednostkach fizycznych. Model ten umożliwia symulowanie dowolnej konfiguracji zwarć oraz degradacji izolacji zwojowej. Do modelowania uszkodzeń wirnika silnika PMSM zastosowano model połowy 2D silnika synchronicznego z magnesami trwałymi opracowany w środowisku Maxwell ANSYS. Wszystkie te modele pozwoliły na uwzględnienie rozważanych w pracy uszkodzeń. Zweryfikowano eksperymentalnie dokładność odzwierciedlenia uszkodzeń i dokonano oceny dokładności odwzorowania ich w modelu, którą Doktorant oszacował i podał, że jest to wartość do kilku procent.

#### **Rozdział 4. Analityczne metody detekcji uszkodzeń silników elektrycznych**

Rozdział 4 zawiera opis analitycznych zależności do poszukiwania charakterystycznych symptomów uszkodzeń w analizowanych sygnałach diagnostycznych. Autor w tym rozdziale przedstawia końcowe zależności na poszukiwanie charakterystycznych cech dla występowania zwarć zwojowych w obu typach rozważanych silników, uszkodzenia klatki silnika indukcyjnego oraz uszkodzenia magnesów dla silnika synchronicznego PMSM. Oprócz analizy sygnałów prądów fazowych z wykorzystaniem FFT do lokalizacji charakterystycznych cech dla zwarć zwojowych, zastosowano również analizę widm składowych symetrycznych. Oprócz sygnałów prądów fazowych do analizy zastosowano sygnał strumienia poosiowego, który jak pokazano jest cennym sygnałem diagnostycznym, umożliwiającym w pełni bezinwazyjny pomiar. Wszystkie podane zależności na poszukiwanie charakterystycznych cech do oceny diagnostycznej poparto ilustracjami graficznymi z zaznaczeniem miejsc ich występowania w widmach sygnałów.

#### **Rozdział 5. Charakterystyka podstawowych struktur klasycznych oraz głębokich sieci neuronowych w diagnostyce maszyn elektrycznych**

W rozdziale 5 Doktorant w syntetyczny sposób przedstawił przegląd wybranych struktur i własności klasycznych sieci neuronowych oraz dokładniej przedstawia tzw. głębokie sieci neuronowe. W zakresie klasycznych sieci neuronowych przedstawiono perceptron wielowarstwowy oraz samoorganizującą sieć Kohonena. Sieci te później zostały zastosowane w opracowanych detektorach uszkodzeń. Opisano to w rozdziale 6. W dalszej części rozdziału 5 Autor opisuje ideę, zasadę działania i rodzaje sieci neuronowych o uczeniu głębokim. Po

informacjach dotyczących głębokich sieci neuronowych DNN (ang. *Deep Neural Networks*) podano informacje o konwolucyjnych sieciach neuronowych CNN (ang. *Convolutional Neural Network*). Opisano ich budowę, główne własności, sposób uczenia oraz oceniono przydatność tych sieci do realizacji zadań związanych z zadaniami diagnostycznymi. Opisano również najczęściej stosowany w procesie treningu sieci DNN algorytm stochastycznego spadku gradientu SGD (ang. *Stochastic Gradient Descent*) oraz jego modyfikacje.

## **Rozdział 6. Diagnostyka uszkodzeń silników indukcyjnych i PMSM z zastosowaniem klasycznych sieci neuronowych**

W rozdziale 6 przedstawiono realizację systemów do wykrywania uszkodzeń silników indukcyjnych i silników PMSM, w których zastosowano klasyczne sieci neuronowe. Opis sposobu zastosowania tych sieci oraz uzyskane wyniki i osiągniętą dokładność oceny rozpoczęto od silnika indukcyjnego. Do wykrywania zwarć zwojowych tego typu silnika zastosowano sieć MLP (perceptron wielowarstwowy). Sygnałem wejściowym do tego typu sieci był składowe sygnału napięciowego proporcjonalny do strumienia poosiowego. Dla tego typu silnika opracowano również algorytm detekcji uszkodzeń wykorzystujący samoorganizacyjne sieci Kohonena (SOM). Tu jako sygnał diagnostyczny wykorzystano sygnały prądów stojana przetworzony do składowych symetrycznych. Dla obu typu sieci uzyskano bardzo dobre wyniki oceny. Dla silnika PMSM zastosowano do oceny również te same typy sieci. Dla sieci neuronowych MLP sygnałem, który posłużył do przygotowania zestawu cech był prądu stojana. Natomiast dla detekcji uszkodzeń wirnika z wykorzystaniem sieci Kohonena wybrano sygnał napięciowy indukowany w cewkach pomiarowych służących do pomiaru strumienia poosiowego. Zastosowano też hybrydowe struktury neuronowe łączące MLP, SOM oraz sieć rekurencyjną Hopfielda. To połączenie struktur neuronowych pozwoliło uzyskać lepsze wyniki w dokładności oceny w stosunku do wyników dla zastosowanych pojedynczych struktur neuronowych. W końcowej części rozdziału Doktorant podsumował uzyskane wyniki oceny. Ze zbiorczego zestawienia uzyskanych wyników oceny można wnioskować, że skuteczność detekcji uszkodzenia jest duża, w niektórych przypadkach nawet sięgająca 100%. Sieci te znacznie gorzej radzą sobie w zadaniu klasyfikacji uszkodzeń, gdzie skuteczność klasyfikacji waha się pomiędzy 61 a 98,8%.

## **Rozdział 7. Diagnostyka uszkodzeń silników elektrycznych z wykorzystaniem głębokich sieci neuronowych**

W rozdziale 7 przedstawiono realizację neuronowych detektorów uszkodzeń, w których

zastosowano głębokie sieci neuronowe. Do zastosowań diagnostycznych wybrano sieci konwolucyjne CNN. Przedstawiono zastosowanie konwolucyjnej sieci neuronowej w procesie detekcji uszkodzeń silników indukcyjnych oraz synchronicznych z magnesami trwałymi. Oceniono możliwości wczesnej detekcji uszkodzeń uzwojeń i klatki wirnika dla silników indukcyjnych oraz zwarć zwojowych i uszkodzenia magnesów dla silnika PMSM. Przeanalizowano wpływ rodzaju informacji diagnostycznej, struktury sieci oraz parametrów procesu uczenia na precyzję systemu detekcji zrealizowanego na konwolucyjnej sieci neuronowej. Uzasadniono wybór sygnałów diagnostycznych. Sformułowano wstępne wnioski co do możliwości zastosowania sieci konwolucyjnych do bezpośredniego przetwarzania sygnałów diagnostycznych.

## **Rozdział 8. Realizacja praktyczna neuronowych detektorów uszkodzeń silników indukcyjnych i synchronicznych z magnesami trwałymi**

W rozdziale 8 przedstawiono metodykę badań eksperymentalnych. Opisano 3 stanowiska laboratoryjne wykorzystywane do badań. Opisano realizację uszkodzeń uzwojenia stojana i wirnika dla silnika indukcyjnego oraz uszkodzeń stojana i magnesów dla silnika PMSM. Opisano użytą aparaturę pomiarową do badań eksperymentalnych. Badane silniki były zasilane z przetwornic częstotliwości co dodatkowo utrudniało opracowanie skutecznych algorytmów diagnostycznych bazujących na sieciach neuronowych. W końcowej części rozdziału podano schemat blokowy systemu diagnostycznego przygotowanego w środowisku LabVIEW i MATLAB.

## **Rozdział 9. Wnioski końcowe**

W rozdziale 9 Doktorant przedstawił wnioski i omówił najważniejsze osiągnięcia przedstawione w niniejszej rozprawie oraz nakreślił kierunki prowadzenia dalszych prac badawczych.

Podsumowując przedstawiony opis zawartości poszczególnych rozdziałów w recenzowanej rozprawie mogę stwierdzić, że ma ona charakter teoretyczno-praktyczny i przedstawia obszerne wyniki badań, które wystarczająco pozwalają udowodnić postawioną główną tezę pracy. Pracę czyta się dobrze a układ i struktura recenzowanej rozprawy jest przedstawiona logicznie i we właściwy sposób.

## 2. Ocena rozprawy doktorskiej

### 2.1. Motywy podjęcia tematu rozprawy doktorskiej

Motywy podjęcia tematu rozprawy przez Doktoranta zostały przedstawione w rozdziale 1 i wynikają one ze światowego trendu i zainteresowania sieciami neuronowymi z głębokim uczeniem i próbami ich zastosowaniem w różnych dziedzinach, w tym również w systemach diagnostyki maszyn elektrycznych.

W rozdziale pierwszym Doktorant przedstawił cel pracy, który sformułował następująco:  
*Celem rozprawy jest analiza i ocena możliwości zastosowania sieci neuronowych z głębokim uczeniem do wczesnego wykrywania uszkodzeń stojana i wirnika w silnikach indukcyjnych i synchronicznych z magnesami trwałymi.*

Na potrzebę realizacji tak postawionego celu pracy Doktorant dokonał obszernego przeglądu literatury po sporządzeniu, którego wysnuł wnioski co do pewnych ograniczeń klasycznych sieci neuronowych. Zostały tu wymienione przez Doktoranta przede wszystkim: konieczność wstępnego przetwarzania danych pomiarowych, wzrost złożoności algorytmów przetwarzania sygnałów wydłużające znacznie czas uzyskania zbioru cech, potrzeba dość długiego czasu na zebranie danych oraz konieczność uczestniczenia człowieka i wykorzystania jego wiedzy w procesie diagnostycznym.

Następnie Doktorant wskazał, jak można rozwiązać te mankamenty związane ze stosowaniem klasycznych sieci neuronowych w diagnostyce maszyn elektrycznych. Wybór padł na konwolucyjne sieci neuronowe, przy konstruowaniu których można pominąć etap preprocesingu w rozumieniu teorii sieci neuronowych. Dane wejściowe do sieci neuronowych z głębokim uczeniem są przygotowywane na podstawie surowych danych zawartych bezpośrednio w mierzonych sygnałach. Przetwarzanie to może się odbywać nawet bez udziału człowieka (eksperta) i jego doświadczenia w dziedzinie maszyn elektrycznych. Kluczowym dla zobrazowania idei działania nowych typów sieci neuronowych, które rozpoczęto stosować w diagnostyce maszyn elektrycznych, jest rysunek 1.6. na którym Doktorant dobrze zobrazował ideę działania sieci neuronowych klasycznych oraz sieci neuronowych z uczeniem głębokim.

Zastosowanie głębokich struktur neuronowych w procesie diagnozowania stanu maszyn elektrycznych pozwala na pominięcie procesu ekstrakcji istotnych cech do oceny diagnostycznej, która jest powszechnie stosowana do tej pory dla klasycznych sieci neuronowych. Zadanie wydobycia istotnych cech do oceny diagnostycznej pozostawia się



strukturze głębokiej sieci neuronowej podczas procesu uczenia. Cały proces oceny diagnostycznej może być więc realizowany przez strukturę głębokiej sieci neuronowej w skończonym krótkim czasie porównywalnym z zadziałaniem dedykowanych zabezpieczeń dla ochrony maszyn elektrycznych np. od skutków zwarć.

Możliwość bezpośredniego wykorzystania mierzonych sygnałów, bez konieczności wstępnego przetwarzania danych jest bardzo ważna do konstrukcji nowoczesnych systemów diagnostycznych o wysokiej skuteczności, szybkości działania i trafności oceny diagnostycznej, szczególnie we wczesnym stadium powstawania uszkodzenia.

Uważam, że podjęty temat rozprawy dotyczący zastosowania sieci neuronowych z uczeniem głębokim w systemach diagnostycznych silników indukcyjnych i silników synchronicznych z magnesami trwałymi jest bardzo ważnym i aktualny. Bardzo obszerny zakres tematyczny rozprawy oraz motywacja do podjęcia tak trudnego tematu zasługuje na duże uznanie.

## 2.2. Teza rozprawy doktorskiej i zadania badawcze

Doktorant sformułował następującą tezę pracy:

*Zastosowanie konwolucyjnej sieci neuronowej umożliwi detekcję uszkodzeń stojana i wirnika silników indukcyjnych oraz synchronicznych z magnesami trwałymi na bardzo wczesnym etapie przy wykorzystaniu bezpośredniej analizy sygnałów.*

Dla udowodnienia postawionej tezy, Doktorant założył realizację następujących zadań badawczych, które zostały przez Niego zapisane w poniższych punktach i obejmują:

- *analizę aktualnego stanu wiedzy w zakresie wykrywania uszkodzeń silników prądu przemiennego wykorzystujących metody sztucznej inteligencji,*
- *analizę i ocenę obecnie stosowanych typów sztucznych sieci neuronowych w zagadnieniach diagnostyki silników prądu przemiennego,*
- *zapoznanie się z rodzajami, budową i uczeniem głębokich sieci neuronowych,*
- *uruchomienie uniwersalnego stanowiska do badań diagnostycznych silników indukcyjnych oraz synchronicznych z magnesami trwałymi,*
- *opracowanie i weryfikację eksperymentalną neurodetektorów uszkodzeń silnika indukcyjnego oraz PMSM wykorzystujących płytke struktury neuronowe,*
- *analizę krytyczną systemów diagnostycznych opartych na klasycznych strukturach neuronowych,*

- *opracowanie i weryfikację detektorów uszkodzeń stojana silnika indukcyjnego oraz PMSM wykorzystującego konwolucyjną sieć neuronową,*
- *ocenę wpływu sygnału diagnostycznego na precyzję systemów wykorzystujących konwolucyjną sieć neuronową,*
- *analizę wpływu parametrów struktury oraz procesu treningu na precyzję neurodetektora uszkodzeń SI oraz PMSM opartego na konwolucyjnej sieci neuronowej,*
- *analizę i ocenę przydatności głębokich sieci neuronowych w diagnostyce silników indukcyjnych i synchronicznych z magnesami trwałymi.*

Należy dodać, że Doktorant w rozprawie dla realizacji powyższych zadań musiał jeszcze zrealizować wiele prac, które nie zostały ujęte w tym wykazie. Nie wspomina o całości prac, które były związane z modelowaniem uszkodzeń stojanów i wirników silników indukcyjnych i silników PMSM. Tu wykazał się umiejętnością modelowania uszkodzeń z użyciem modeli obwodowych i polowych. Zastosował łącznie 4 różne modele, które pozwoliły mu uzyskać jakościowo i ilościowo wiarygodne sygnały diagnostyczne. Z punktu widzenia realizacji systemu diagnostycznego na strukturach sieci neuronowych wydawać się może, że nie był to konieczny etap. Mając jednak na uwadze większą świadomość Doktoranta przy wyborze istotnych cech dla przygotowania skutecznych detektorów neuronowych zbudowanych na klasycznych sieciach neuronowych uważam, że etap ten był potrzebny.

Kolejnym bardzo ważnym aspektem, szczególnie dla opracowania algorytmów diagnostycznych wykorzystujących klasyczne sieci neuronowe, jest przetwarzanie sygnałów diagnostycznych. Tu Doktorant wykazał się bardzo dużą umiejętnością wyboru charakterystycznych cech jako danych wejściowych dla sieci neuronowych. Wypunktowane prace badawcze przez Doktoranta oraz dodatkowo wskazane przeze mnie aspekty pozwalają w pełni na udowodnienie postawionej w rozprawie tezy.

### **2.3. Realizacja rozprawy doktorskiej**

Rozdział 6 i 7 to dwa główne rozdziały rozprawy zawierające większość uzyskanych wyników z opracowaniem i weryfikacją użytecznych algorytmów diagnostycznych wykorzystujących klasyczne i głębokie sieci neuronowe. Te rozdziały stanowią główną część naukową rozprawy. Odpowiednio rozdział 6 dotyczy opracowania neuronowych detektorów uszkodzeń bazujących na klasycznych sieciach neuronowych MLP i SOM dla uszkodzeń stojana i wirnika silnika indukcyjnego oraz uszkodzeń uzwojeń stojana i magnesów wirnika



silnika PMSM. Rozdział 7 natomiast zawiera cenne wyniki badań i opis metodyki zastosowania sieci konwolucyjnych do diagnostyki tych samych uszkodzeń silnika indukcyjnego i silnika PMSM, które były rozważane w rozdziale 6. Tu Autor, poza opracowaniem skutecznych neuronowych detektorów uszkodzeń stojana i wirnika dla silników indukcyjnych i silnika PMSM, dokonał analizy wpływu sygnału diagnostycznego na skuteczność detekcji uszkodzeń dla tych silników.

Podrozdziałem kończącym analizy w rozdziale 7 jest analiza wpływu parametrów zastosowanej struktury konwolucyjnej sieci neuronowej na skuteczność diagnostyki silników indukcyjnych i silników PMSM. Jest to bardzo cenna naukowo część pracy, która z powodu braku formalnych przesłanek do projektowania konwolucyjnych struktur neuronowych może być bardzo znacznym ułatwieniem dla wielu naukowców rozpoczynających badania z wykorzystaniem głębokich sieci neuronowych w zagadnieniach diagnostyki maszyn elektrycznych czy problemów z innych obszarów techniki.

Uzyskanie tak cennych wyników zaprezentowanych w rozdziałach 6 i 7 stało się możliwe dzięki realizacji wcześniejszych zadań badawczych, na które składało się rozpoznanie aktualnego stanu wiedzy w zakresie zastosowania różnych struktur sieci neuronowych. Takiego przeglądu literatury ze sformułowaniem wniosków co do obszarów potencjalnych możliwych badań dokonano w rozdziale 1.

Rozdział 2 zawiera statystykę i opis najczęściej występujących uszkodzeń z ilustracją graficzną i wskazaniem sygnałów diagnostycznych, w których są zawarte symptomy do wykrywania tych uszkodzeń. Dokonanie charakterystyki uszkodzeń i zestawienie ich w tabeli obrazującej przyczyny i skutki daje bardzo dobry pogląd na znaczenie tych informacji przy właściwym wyborze metod diagnostycznych do skutecznej oceny stanu silników prądu przemiennego.

Rozdział 3 zawiera cenne informacje dotyczące aspektów modelowania maszyn na potrzebę generacji wzorców diagnostycznych. Jest to rozdział również podkreślający naukowe aspekty rozprawy.

Sekwencją prezentacji kolejnych kroków w realizacji prac badawczych jest rozdział 4. W rozdziale tym dokonano zobrazowania wyboru charakterystycznych cech do oceny diagnostycznej stanu silników indukcyjnych i silników PMSM. Realizacja tego etapu badań opisanych w tym rozdziale była niezbędnym elementem do opracowania skutecznej ekstrakcji istotnych symptomów diagnostycznych i przygotowania zestawów danych do uczenia i testowania sieci neuronowych.

Podbudowę teoretyczną do dwóch rozdziałów związanych z sieciami neuronowymi (rozdział 6 i 7) zawiera rozdział 5. W rozdziale 5 Doktorant zamieścił zwięzły opis najważniejszych informacji teoretycznych pozwalających posługiwać się terminologią związaną z klasycznymi i głębokimi sieciami neuronowymi. Dla klasycznych sieci neuronowych w zadaniach detekcji uszkodzeń silników indukcyjnych oraz synchronicznych z magnesami trwałymi zastosowano struktury MLP typu perceptronu wielowarstwowego oraz samoorganizującą sieć typu Kohonena.

Do rozwiązania zadań badawczych związanych z udowodnieniem postawionej w rozprawie tezy wybrano strukturę sieci o głębokim uczeniu. Wybrano sieć neuronową konwolucyjną CNN. W rozdziale 5 zamieszczono niezbędne wprowadzenie teoretyczne a w rozdziale 7 zamieszczono obszernie wyniki badań z zastosowaniem tej struktury neuronowej zastosowanej w opracowanym systemie diagnostycznym.

W rozdziale 8 Doktorant opisał część eksperymentalną przeprowadzonych badań. Realizacja badań przedstawionych w rozprawie, odbywała się w trzech etapach.

Pierwszy etap badań polegał na pomiarze sygnałów diagnostycznych na stanowisku laboratoryjnym z silnikami, w których możliwe było fizyczne modelowanie uszkodzeń stojana i wirnika.

Drugi etap prac eksperymentalnych polegał na wyborze istotnych symptomów z analizowanych sygnałów do przygotowania danych uczących i testujących dla detektorów uszkodzeń wykorzystujących klasyczne sieci neuronowe. Dla sieci neuronowych z uczeniem głębokim dane pomiarowe zostały tylko znormalizowane i przetransponowane do odpowiedniej struktury wejściowej wymaganej przez sieć CNN.

Trzeci etap badań obejmował weryfikację eksperymentalną proponowanych struktur neuronowych podczas pracy ciągłej badanego silnika elektrycznego prądu przemiennego. Podczas testów badano wpływ warunków pracy maszyny takich jak moment obciążenia, częstotliwości napięcia zasilania na dokładność oceny przez opracowany przez Doktoranta system diagnostyczny.

Po analizie całości rozprawy mogę stwierdzić, że jej realizacja przebiegała w kilku istotnych etapach wzajemnie z sobą powiązanych. Rzetelna realizacja wszystkich tych etapów przez Doktoranta pozwoliła na osiągnięcie bardzo dobrego efektu końcowego.

W ostatnim rozdziale 9 Doktorant podsumował rezultaty swoich badań i sformułował wnioski końcowe. Wskazał działania, które doprowadziły do udowodnienia tezy pracy. Na szczególne uznanie i ich wyróżnienie według mnie zasługują:

- Przeanalizowanie i dobór sygnałów diagnostycznych oraz analitycznych metod ich przetwarzania pod kątem opracowania wektorów wejściowych klasycznych struktur neuronowych,
- Przeanalizowanie możliwość zastosowania hybrydowych struktur neuronowych wykorzystujących w swojej strukturze klasyczne sieci neuronowe: perceptron wielowarstwowy, rekurencyjną sieć Hopfielda, samoorganizującą sieć Kohonena. Przeprowadzono weryfikację eksperymentalną systemów diagnostycznych wykorzystujących struktury hybrydowe,
- Opracowanie oraz zweryfikowanie eksperymentalne systemów detekcji uszkodzeń obwodów elektrycznych stojana oraz wirnika SI wykorzystującego bezpośrednio przetwarzanie sygnałów diagnostycznych przez konwolucyjną sieć neuronową;
- Zbadanie wpływ rodzaju sygnału diagnostycznego na precyzję systemu detekcji uszkodzeń SI opartego na konwolucyjnej sieci neuronowej,
- Opracowanie i zweryfikowanie eksperymentalne systemu diagnostycznego do wykrywania uszkodzeń uzwojeń stojana oraz magnesów trwałych wirnika PMSM wykorzystującego bezpośrednią analizę sygnałów diagnostycznych za pośrednictwem konwolucyjnej sieci neuronowej.

### 3. Uwagi krytyczne

#### 3.1. Uwagi ogólne

Układ i formalna strona pracy nie budzą zarzutu. Jej treść jest prezentowana systematycznie a kolejność omawianych problemów właściwa i logicznie uzasadniona. Rozdziały są z sobą spójnie powiązane każdy następny rozdział jest wynikiem poprzedniego. Przedstawione przez Doktoranta szczególnie w rozdziale 4 wzory, są podane bez szczegółowych wyprowadzeń i dokładniejszych uzasadnień. Nie traktuję tego jednak jako wady, gdyż praca jest bardzo obszerna a jej objętość to 169 stron.

Autor wykazuje się bardzo dobrą wiedzą teoretyczną, w szczególności w zakresie klasycznych sieci neuronowych, sieci neuronowych z uczeniem głębokim, analizą sygnałów

w dziedzinie częstotliwościowej oraz w dziedzinie czasowo-częstotliwościowej, modelowania uszkodzeń maszyn elektrycznych, akwizycji sygnałów, układach przekształtnikowych.

Na wyróżnienie zasługuje klarowny język, w którym praca jest napisana oraz umiejętność zwięzłego zapisu przedstawianych treści. Jak wcześniej wspomniałem pracę czyta się dobrze. Przy czytaniu pracy odnoszę jednak wrażenie, że brak podrozdziału z przeglądem zawartości rozprawy. Dobrym miejscem na jego umieszczenie byłby nowy podrozdział 1.3. zatytułowany przegląd zawartości pracy. Myślę, że pracę wtedy znacznie lepiej by się jeszcze czytało. Jednak brak tego podrozdziału w żaden sposób nie umniejsza wysokiej jakości pracy. To niedociągnięcie rekompensuje krótki przegląd i wprowadzenie zamieszczone na początku większości rozdziałów rozprawy.

Wszystkie badania i analizy prezentowane w rozprawie poparto syntetycznymi zestawieniami uzyskanych wyników. W pracy zawarto dużą ilość ilustracji graficznych i tabelarycznych. Są one dobrze przedstawione, czytelne, estetyczne i dobrze ilustrują omawiane zagadnienia.

Pomimo, że praca dotyczy konkretnych problemów związanych z neuronowymi detektorami uszkodzeń silników elektrycznych, to opracowanie skutecznej w ocenie uszkodzeń sieci neuronowej wymagało od Doktoranta również bardzo dobrego przyswojenia zagadnień związanych z modelowaniem maszyn elektrycznych, teorią cyfrowego przetwarzania sygnałów i ich analizą, systemami akwizycji sygnałów, układami przekształtnikowymi i metodami sterowania badanymi silnikami, programowaniem w środowisku LabVIEW i MATLAB. Wkład pracy Pana Macieja Skowrona w przygotowanie tej rozprawy jest zatem naprawdę bardzo duży.

Wnioski końcowe wypływające z przeprowadzonych badań i analiz są sformułowane poprawnie i w całej rozciągłości potwierdzają i dowodzą postawioną przez Doktoranta tezę. Wykaz literatury zawierający 255 pozycji i częste odwołania do poszczególnych pozycji w tekście rozprawy wskazują na dobre rozeznanie Doktoranta w obszarze zastosowania metod sztucznej inteligencji w diagnostyce maszyn prądu przemiennego, którego dotyczy recenzowana rozprawa.

### **3.2. Uwagi szczególne związane z edycją pracy**

Pragnę zaznaczyć, że poniższe uwagi redakcyjne nie mają istotnego wpływu na ocenę merytoryczną pracy i nie utrudniają jej czytania.

1. Praca napisana jest bardzo poprawnym językiem polskim, tylko w niektórych miejscach

- pojawiają się najwyżej pojedyncze literówki lub drobne przejęzyczenia.
2. Zauważyłem pojedyncze błędy stylistyczne lub literówki na stronach: 17, 18, 24, 29, 33, 39, 46, 52, 53, 54, 56, 62, 75, 76, 83, 94, 120, 136.
  3. Z racji, że podano końcowe wzory na poszukiwanie charakterystycznych cech w widmach sygnałów diagnostycznych to uważam, że nie podano odwołań do pozycji literatury przy wzorach 4.1, 4.2 i 4.4.
  4. Według mnie powinno używać się określenia uczenie sieci neuronowych zamiast trening sieci neuronowych.
  5. Autor używa określenia płytkie sieci neuronowe. Zgodzę się z tym określeniem, ale powinno ona zostać jasno sformalizowane na początku rozprawy.
  6. Zbyt częste używanie słowa ukazuje. Np. zdanie: Schemat ideowy zastosowanej metody konwersji sygnałów diagnostycznych ukazuje rysunek 7.24.

### **3.3. Uwagi dyskusyjne dotyczące merytorycznej strony pracy**

Uwagi o charakterze ogólnym, które są zarówno pytaniami do Doktoranta, komentarzami jak również uwagami, które powinny być wyjaśnione.

1. Dla klasycznych sieci neuronowych brak jest w rozprawie jakiegoś rozkładu cech, które potwierdzałyby słuszność wyboru danych wejściowych do sieci neuronowej.
2. W rozprawie brakuje informacji jak dane uzyskane z poszczególnych modeli prezentowanych w rozdziale 3 zostały wykorzystane do opracowania detektorów neuronowych.
3. Proszę porównać czas zadziałania opracowanego systemu diagnostycznego do wykrywania zwarć zwojowych do czasu zadziałania typowych zabezpieczeń silnikowych chroniących silnik przed skutkami zwarć zwojowych.
4. W jaki sposób ewentualnie jeszcze można skrócić czas zadziałania systemu diagnostycznego wykorzystującego konwolucyjne sieci neuronowe.
5. Czy opracowane detektory uszkodzeń wykorzystujące sieci neuronowe były testowane na innych silnikach niż te, dla których przedstawiono wynik badań w rozprawie.
6. Cewka do pomiaru strumienia ma trochę specyficzną budowę. Czym był podyktowany wybór takiego kształtu i rozmiaru cewki.



#### 4. Wniosek końcowy

Zamieszczone uwagi w niniejszej recenzji nie mają żadnego wpływu na moją ostateczną pozytywną ocenę. Zatem stwierdzam, że rozprawa doktorska Pana **mgr. inż. Macieja Skowrona** pt. *„Diagnostyka uszkodzeń silników indukcyjnych i synchronicznych z magnesami trwałymi przy wykorzystaniu sieci neuronowych z głębokim uczeniem”*, stanowi oryginalne rozwiązanie zagadnienia naukowego, a spójnie i kompleksowo przedstawiony sposób rozwiązania problemów dowodzi umiejętności prowadzenia prac naukowych.

Stwierdzam, że rozprawa spełnia wszystkie wymagania stawiane pracom doktorskim przez ustawę o tytule naukowym i stopniach naukowych oraz o stopniach i tytule w zakresie sztuki z dnia 14 marca 2003 r. (Dz. U. Nr. 65, poz. 595), Rozporządzenia Ministra Edukacji Narodowej i Sportu z dnia 15 stycznia 2004 roku, Rozporządzenia Ministra Nauki i Szkolnictwa Wyższego z dnia 3 października 2014 roku oraz Rozporządzenie Ministra Nauki i Szkolnictwa Wyższego z dnia 19 stycznia 2018 r. w sprawie szczegółowego trybu i warunków przeprowadzania czynności w przewodzie doktorskim, w postępowaniu habilitacyjnym oraz w postępowaniu o nadanie tytułu profesora (Dz. U. z 2018 r., poz. 261).

W związku z tym, przedkładam Radzie Naukowej dyscypliny Automatyka, Elektronika i Elektrotechnika Politechniki Wrocławskiej wniosek o przyjęcie i dopuszczenie recenzowanej pracy do publicznej obrony.

Jednocześnie chciałbym nadmienić, że do recenzji załączam wniosek o wyróżnienie recenzowanej przeze mnie rozprawy.



**dr hab. inż. Maciej Sułowicz prof. PK**  
Katedra Inżynierii Elektrycznej  
Wydział Inżynierii Elektrycznej i Komputerowej  
Politechnika Krakowska im. Tadeusza Kościuszki  
ul. Warszawska 24, 31-155 Kraków  
Tel. 12 628 26 58, e-mail: [maciej.sulowicz@pk.edu.pl](mailto:maciej.sulowicz@pk.edu.pl)

Kraków, 30.08.2021 r.

**Wniosek**  
do **Rady Naukowej** Dyscypliny  
Automatyka, Elektronika i Elektrotechnika Politechniki Wrocławskiej

Biorąc pod uwagę znaczący wkład i włożony duży wysiłek Pana mgr. inż. Macieja Skowrona w realizację tematu i przygotowanie rozprawy pt.:

**„Diagnostyka uszkodzeń silników indukcyjnych i synchronicznych z magnesami trwałymi przy wykorzystaniu sieci neuronowych z głębokim uczeniem”**

wniosuję jako recenzent do Rady Naukowej Dyscypliny Automatyka, Elektronika i Elektrotechnika Politechniki Wrocławskiej o wyróżnienie niniejszej rozprawy.

Uzasadnienie

W mojej ocenie na szczególne uznanie w recenzowanej rozprawie zasługują:

- Dokonanie obszernego przeglądu literatury w zakresie wykrywania uszkodzeń silników prądu przemiennego wykorzystujących metody sztucznej inteligencji i sformułowanie wniosków ze wskazaniem obszarów zastosowania sieci neuronowych w diagnostyce uszkodzeń maszyn elektrycznych, gdzie istnieje duży potencjał do rozwoju metod diagnostycznych,
- Opracowanie sposobu modelowania uszkodzeń i modeli matematycznych silników indukcyjnych oraz silników synchronicznych z magnesami trwałymi pozwalających uzyskać sygnały diagnostyczne do rozpoznania i śledzenia zmian wybranych symptomów diagnostycznych, które są istotne przy opracowaniu algorytmów diagnostycznych wykorzystujących metody sztucznej inteligencji,
- Uruchomienie uniwersalnego stanowiska do badań diagnostycznych silników indukcyjnych oraz synchronicznych z magnesami trwałymi i przeprowadzenie badań eksperymentalnych, które dostarczyły rzetelnych danych z różnie uszkodzonych maszyn do uczenia, testowania i walidacji sieci neuronowych,

ai

- Opracowanie oprogramowania do zbierania danych, ich analizy i przetwarzania na potrzebę ekstrakcji istotnych cech do opracowania wektorów wejściowych do klasycznych i głębokich sieci neuronowych,
- Opracowanie i praktyczne zweryfikowanie skuteczności działania detektorów neuronowych do wykrywania uszkodzeń stojana i wirnika dla silnika indukcyjnego oraz PMSM wykorzystujących klasyczne struktury sieci neuronowych typu perceptronu wielowarstwowego oraz samoorganizującej sieci typu Kohonena, zaproponowanie do diagnostyki neuronowych struktur hybrydowych łączących perceptron wielowarstwowy, rekurencyjną sieć Hopfielda, samoorganizującą sieć Kohonena,
- Opracowanie skutecznych algorytmów diagnostycznych z sieciami neuronowymi z głębokim uczeniem do wykrywania w początkowych stadium uszkodzeń silników indukcyjnych klatkowych oraz synchronicznych z magnesami trwałymi oraz porównania ich skuteczności z klasycznymi sieciami neuronowymi,
- Dokonanie oceny wpływu sygnałów diagnostycznych na precyzję systemów wykorzystujących konwolucyjną sieć neuronową oraz klasyczne sieci neuronowe oraz pokazanie możliwości skutecznej oceny przez sieci neuronowe w stanie ustalonym jak również w stanach dynamicznych,
- Dokonanie wielokryterialnej analizy wpływu parametrów struktury oraz procesu uczenia na precyzję oceny przez neuronowe detektory uszkodzeń dla silników indukcyjnych oraz PMSM oparte na konwolucyjnych sieciach neuronowych, dla których aktualnie jest brak formalnych zasad doboru tych parametrów,
- Opracowanie systemów diagnostycznych do diagnostyki silników indukcyjnych i silników synchronicznych z magnesami trwałymi mogących działać on-line, w których zastosowano sieci neuronowe klasyczne oraz szczególnie sieci neuronowe z uczeniem głębokim, gdzie zastosowano bezpośrednie przetwarzanie sygnałów diagnostycznych przez te sieci.

Suton A.