

Wrocław, dnia 14.11.2023 r.

Dr hab. inż. Agnieszka Wylomańska, prof. uczelni

Politechnika Wroclawska

Wydział Matematyki

ul. Hoene-Wrońskiego 13c, 50-376 Wrocław

Dyscypliny naukowe

matematyka

RECENZJA

rozprawy doktorskiej pt.

„Electric car battery leakage detection system”

(Tytuł w j. polskim: „System wykrywania nieszczelności akumulatorów stosowanych w samochodach elektrycznych”)

Autor: mgr inż. Grzegorz Wójcik

Promotor: dr hab. inż. Piotr Przyszałka, prof. Politechniki Śląskiej

Promotor pomocniczy: dr inż. Wojciech Sebzda

Podstawa formalna

Niniejsza recenzja została opracowana na podstawie uchwały Rady Dyscypliny Inżynieria Mechaniczna (Politechnika Śląska) z dnia 27 września 2023 r. i w konsekwencji pisma skierowanego przez Przewodniczącą Rady Dyscypliny prof. dr hab. inż. Ewę Majchrzak, z dnia 28 września 2023 r.

Ocena ogólna rozprawy

Ze względu na szybki wzrost rynku pojazdów elektrycznych i rosnące wymagania dotyczące mocy i gęstości energii źródła zasilania tego rodzaju środków technicznych, zainteresowanie pakietami akumulatorów litowo-jonowych wzrosło. Ponieważ akumulatory te powinny być używane w wąskim przedziale temperaturowym, ma to wiele konsekwencji dla bezpieczeństwa ich eksploatacji. Czynniki środowiskowe, warunki pracy i błędy produkcyjne mogą wpłynąć na działanie wspomnianych akumulatorów. Nowoczesne pakiety akumulatorowe wykorzystują systemy zarządzania baterią (BMS) i systemy zarządzania ciepłem (BTMS). Systemy te zapobiegają uszkodzeniom ogniw akumulatorowych i szybkiemu starzeniu się.

Wykorzystując polimerowy światłowodowy czujnik absorpcji fal zanikających oraz metody detekcji uszkodzeń oparte na sztucznych sieciach neuronowych, w ramach rozprawy opracowano system detekcji nieszczelności dla chłodzonych zanurzeniowo pakietów akumulatorowych stosowanych w samochodach elektrycznych. Metoda ta umożliwia wykorzystanie toru optycznego w miejscach wysokonapięciowych. Niweluje to główne wady

obecnych rozwiązań, takie jak ekspozycja elementów układów BMS/BTMS o niskim napięciu na wyładowania elektrostatyczne oraz zakłócenia elektromagnetyczne.

Badania przemysłowe i rozwojowe na temat pakietów akumulatorowych z chłodzeniem zanurzeniowym wykazały, że nieszczelność układów może wynikać z uszkodzenia obudowy lub wymiennika ciepła, a także wycieku czynnika chłodzącego (np. oleju mineralnego) i wejścia wody do wnętrza systemu. Ponieważ system detekcji rozważanych uszkodzeń został opracowany z myślą o przemyśle motoryzacyjnym, założono, że będzie odporny na warunki środowiskowe, które może spotkać na drodze.

Ponadto przegląd badań dotyczących samochodowych pakietów bateryjnych wykazał wątpliwości zarówno praktyków jak i naukowców co do aktualnego kierunku rozwoju systemów bateryjnych, który koncentruje się na obniżeniu kosztów wytwarzania i zwiększeniu ilości energii pozyskanej z pojedynczego ogniwa akumulatorowego, nie dokładając wystarczającej uwagi na sposób ich właściwej eksploatacji. Zidentyfikowano kilka rodzajów uszkodzeń, które mogą wystąpić w samochodowych systemach bateryjnych, a także przyczyny tych uszkodzeń, co było podstawą dla przeprowadzonych w ramach rozprawy badań. Uszkodzenia akumulatorów, zarówno na poziomie pakietu, modułów, jak i pojedynczych ogniw, stanowią poważne zagrożenie i mogą prowadzić do problemów, takich jak przegrzewanie lub przyspieszona degradacja ogniw. Mogą również spowodować katastrofy, gdy zaczyna się reakcja łańcucha, co prowadzi do utraty stabilności termicznej akumulatora. Nawet niewielkie uszkodzenia, takie jak wtargnięcie wody, mogą prowadzić do rozprzestrzeniania się i uszkodzenia innych części reakcji. Z powodu wydzielania dużych ilości ciepła i łatwopalnych gazów w dużym pakiecie akumulatorowym takie kaskadowe zdarzenia mogą mieć poważne konsekwencje, takie jak gwałtowny wzrost temperatury i ciśnienia. Zwiększa to ryzyko zapłonu i eksplozji. Uszkodzenia powodujące tę reakcję łańcuchową mogą przybierać różne formy, takie jak np. wtargnięcia wody. Woda może gromadzić się w pakiecie akumulatorowym w wyniku uszkodzenia wymiennika ciepła i powodować zwarcia i korozję w obszarach o wysokim napięciu. W rezultacie właściwe projektowanie systemów BMS i BTMS jest niezbędne do zapewnienia bezpieczeństwa i trwałości systemu, zwłaszcza w przypadku pakietów akumulatorowych o wysokich natężeniach prądu ładowania i rozładowania. Obecnie stosowane rozwiązania w celu wykrycia wycieku lub wtargnięcia cieczy wydają się być niewystarczające w produkowanych systemach. Nowe trendy skazują na konieczność stosowania zaawansowanych systemów detekcji nieszczelności.

Dodatkowo, badania literaturowe w zakresie metod diagnostycznych dla systemów bateryjnych pojazdów elektrycznych wykazały, że obecnie stosuje się przede wszystkim metody bazujące na modelu danego obiektu. Jednakże w tym podejściu bardzo często trudno jest opisać taki model zarówno z punktu widzenia matematycznego jak i technicznego. Stosuje się także metody bezpośrednie, które z kolei wymagają dużych zbiorów danych potrzebnych do estymacji parametrów, na podstawie których podejmowane są decyzje diagnostyczne. Zatem i w tym obszarze konieczne jest zastosowanie nowych podejść, które w wiarygodny sposób mogłyby pomóc w identyfikacji uszkodzeń analizowanych systemów. Naturalnym rozwiązaniem wydają się być tutaj metody inteligentne.

Zaprojektowanie i wykonanie prototypu systemu detekcji wycieku czynnika chłodzącego lub wtargnięcia cieczy wymagało doświadczenia w inżynierii mechanicznej, w tym w budowie i eksploatacji pojazdów elektrycznych. Było to szczególnie ważne w przypadku opracowania autorskich metod detekcji tych uszkodzeń, opartych na modelach sieci neuronowych. Co

więcej, opracowanie dedykowanej warstwy mechanicznej, sprzętowej, programowej oraz czujników światłowodowych wymagało przeprowadzenia szerokiej gamy prac badawczo-rozwojowych. Prace te doprowadziły do powstania czujnika absorpcji fali zanikającej polimerowego światłowodu oraz do opracowania specjalnej platformy mechatronicznej.

Zważywszy na powyższe, z punktu widzenia dyscypliny naukowej Inżynieria Mechaniczna podjęty temat jest niezwykle istotny w celu zapewnienia sprawności chłodzonych zanurzeniowo pakietów akumulatorowych stosowanych w nowoczesnych samochodach elektrycznych, dlatego też uważam podjęcie tego tematu za bardzo zasadne, przede wszystkim z praktycznego punktu widzenia.

Struktura. Analiza zawartości poszczególnych rozdziałów

Przedstawiona do recenzji praca składa się z 7 rozdziałów oraz dodatkowych rozdziałów zawierających odpowiednio spis literatury, listy wykorzystanych symboli oraz 6 dodatków. **Struktura pracy jest poprawna**, treści zostały ułożone w sposób usystematyzowany. Rozprawa zdecydowanie ma charakter interdyscyplinarny, co wymusza od autora przedstawienia jednocześnie wielu aspektów omawianego problemu. Według mojej opinii doktorant w dobrym stopniu poradził sobie z przedstawieniem wielu wątków zagadnienia. W części merytorycznej rozprawy autor skupił się najpierw na koncepcji pakietów akumulatorowych w kontekście pojazdów elektrycznych oraz na opisie podstawowych zasad technik pomiarowych wykorzystywanych przez polimerowe czujniki światłowodowe. Kolejne rozdziały poświęcone są koncepcji optycznego systemu wykrywania cieczy w kontekście pakietów akumulatorowych samochodów elektrycznych oraz nowym metodom opracowanym w celu detekcji uszkodzeń. Kolejna część poświęcona jest badaniom przeprowadzonym w celu weryfikacji opracowanego prototypu systemu. Rozdział ostatni zawiera podsumowanie pracy oraz kierunki dalszych badań.

Taki układ pracy stopniowo wprowadza czytelnika w temat, co znacznie ułatwia lekturę rozprawy.

W **rozdziale 1** doktorant przedstawia podstawy teoretyczne dla przeprowadzonych badań, podkreślając wzrost globalnego rynku elektromobilności w ciągu ostatnich lat. Rozdział omawia przyczyny badania i znaczenie poruszonych problemów, takich jak uszkodzenia pakietów akumulatorowych w pojazdach elektrycznych. Ponadto rozdział przedstawia problemy badawcze, które zostały sformułowane, dając kontekst i kierunek dla następnych rozdziałów.

Rozdział 2 poświęcony jest koncepcji pakietów akumulatorowych dla pojazdów elektrycznych. Początkowo doktorant omawia korzyści i wady różnych chemikaliów i kształtów ogniw dla przemysłu samochodowego. Czytelnik następnie otrzymuje wgląd w różne systemy zarządzania ciepłem baterii, które są ważne dla rozprawy. W rozdziale tym podane są także ograniczenia ogniw litowo-jonowych, które są obecnie najpopularniejszym wyborem producentów samochodów. Na tej podstawie przedstawiono wyniki badań nad uszkodzeniami pakietów akumulatorowych, zwłaszcza uszkodzeniami spowodowanymi wyciekiem i wtargnięciem cieczy. Ponadto przedstawiono wyniki przeglądu algorytmów diagnostycznych stosowanych w systemach bateryjnych, zwłaszcza tych wykorzystujących sztuczną inteligencję i uczenie maszynowe. Rozdział kończy się przeglądem baz patentowych dotyczących rozwiązań służących do wykrywania wycieków i wtargnięcia cieczy w pakiety akumulatorowe.

W **rozdziale 3** doktorant opisuje podstawowe zasady metod pomiarowych wykorzystywanych przez polimerowe czujniki światłowodowe, koncentrując się na metodach opartych na intensywności i długości fali, które mogą być odpowiednie dla przemysłu motoryzacyjnego. Badania koncentrują się na czujnikach współczynnika refrakcji i metodach ich produkcji w celu rozróżnienia typu płynu. Ponadto, w rozdziale przedstawiono wyniki przeglądu wykorzystania polimerowych czujników światłowodowych w przemyśle motoryzacyjnym. Omówiono rozwiązania, takie jak systemy ochrony pieszych i systemy detekcji przeszkód szyb elektrycznych. Ze względu na ograniczoną liczbę zastosowań znalezionych w branży motoryzacyjnej, badania zostały przeniesione na bardziej specyficzne potrzeby przemysłu lotniczego.

W **rozdziale 4** doktorant wprowadza koncepcję optycznego systemu wykrywania cieczy do pakietów akumulatorowych silników elektrycznych. Dostarcza nie tylko teoretycznych podstaw w zakresie wymagań i architektury (funkcjonalnych i niefunkcjonalnych), ale również opisuje sposób implementacji systemu i przeprowadza badania eksperymentalne dotyczące wykonanych czujników współczynnika refrakcji. Opisany proces implementacji obejmuje również projekt i wykonanie protokołu komunikacji, elektronicznej jednostki sterującej i skończonego systemu. Badania eksperymentalne dotyczące czujników światłowodowych pokazują, jak różne czynniki, takie jak metoda wytwarzania, powierzchnia cięcia światłowodu, intensywność światła i temperatura, wpływają na charakterystykę i uzyskaną czułość.

W **rozdziale 5** doktorant przedstawia teoretyczne podstawy autorskich koncepcji detekcji uszkodzeń dla optycznego systemu wykrywania cieczy. W tym rozdziale omówiono rekurencyjne sieci neuronowe, ze szczególnym uwzględnieniem sieci typu Long Short-Term Memory, Gated Recurrent Units i Recurrent Autoencoders. Autor opisuje zaproponowane metody detekcji oparte o sieci LSTM oraz RAE GRU, a także wymienia wiele wskaźników wydajności modelu, które zostały wykorzystane do oceny skuteczności modelu. Ponadto w rozdziale przedstawiono wskaźniki skuteczności metod detekcji, a także wskaźniki jakości i złożoności modelu obiektu.

Badania weryfikacyjne, które zostały przeprowadzone na nowo opracowanym systemie detekcji nieszczelności, zostały przedstawione w **rozdziale 6**. Badania te zostały podzielone zgodnie z zaproponowanym planem na badania w warunkach laboratoryjnych oraz badania w warunkach drogowych. Pierwsza część badań weryfikacyjnych koncentruje się na ocenie skuteczności systemu i zaproponowanej metody detekcji uszkodzeń bazującej na sieciach neuronowych LSTM w warunkach laboratoryjnych. Platforma mechatroniczna oraz metoda detekcji uszkodzeń wykorzystująca sieć typu autoenkoder są wykorzystywane w drugiej części badań. Szczegółowo omówiono poszczególne etapy badań weryfikacyjnych, w tym przygotowanie stanowiska badawczego, proces pozyskiwania danych, wdrożenie wybranych technik i ocenę ich działania. Przetestowano zaproponowane techniki w trybie offline przy użyciu wcześniej zarejestrowanych zestawów danych w odpowiednich warunkach środowiskowych.

W **rozdziale 7** pracy omówiono i podsumowano wyniki i wnioski z przeprowadzonych badań. Ponadto, zwracając uwagę na interdyscyplinarność tematyki przedstawiono pomysły na przyszłe prace. Dodatkowo, doktorant podsumował osiągnięte kamienie milowe oraz omówił wybrane etapy wdrożenia do przemysłu.

Ocena realizacji celu naukowego

Celem przygotowanej rozprawy było opracowanie systemu detekcji nieszczelności dla chłodzonych zanurzeniowo pakietów akumulatorowych stosowanych w samochodach elektrycznych, wykorzystując polimerowy światłowodowy czujnik absorpcji fal zanikających oraz metody detekcji uszkodzeń bazujące na sztucznych sieciach neuronowych. Cel naukowy pracy został osiągnięty poprzez:

- Zdiagnozowanie możliwych uszkodzeń akumulatorów litowo-jonowych, w szczególności związanych z wnikaniem i wyciekiem cieczy.
- Przeprowadzenie przeglądu literatury na temat polimerowych czujników światłowodowych, ich technik wykrywania i technologii produkcji, a także podejść do wykrywania uszkodzeń w takich systemach.
- Opracowanie prototypu systemu wykrywania uszkodzeń dla chłodzonych zanurzeniowo pakietów akumulatorowych opartego na zaproponowanym i wykonanym polimerowym czujniku światłowodowym zdolnym do monitorowania nieszczelności (wnikanie i wyciek cieczy).
- Opracowanie nowych metod opartych na technikach sztucznej inteligencji (płytkie i głębokie sieci neuronowe) do detekcji uszkodzeń związanych z nieszczelnością diagnozowanych pakietów akumulatorowych.
- Opracowanie komponentów oraz dedykowanych stanowisk testowych odpowiednich dla badań umożliwiających weryfikację opracowanych algorytmów.
- Opracowanie planu badań diagnostycznych i przeprowadzenie kompleksowych eksperymentów w celu zebrania danych niezbędnych do weryfikacji i walidacji systemu w warunkach laboratoryjnych i rzeczywistych.
- Przeprowadzenie badań eksperymentalnych nad głębokimi modelami neuronowymi obejmujących poszukiwanie optymalnych hiperparametrów.
- Opracowanie wniosków i zadań, które można wykorzystać do podniesienia poziomu gotowości technologicznej systemu (wdrożenie).

Warto jeszcze raz podkreślić, iż praca ma charakter interdyscyplinarny. Doktorant wykazał się doświadczeniem w opracowywaniu metodyki pomiarów, metodologii do wykrywania uszkodzeń związanych z nieszczelnością, przygotowania prototypu systemu od strony mechanicznej, a także przygotowania eksperymentów do weryfikacji systemu zarówno w warunkach laboratoryjnych jak i rzeczywistych. Z mojej perspektywy ważne jest to, że doktorant wykazał się także umiejętnością łączenia różnych metod analizy danych w celu zaproponowania automatycznych algorytmów. Ważnym aspektem prowadzonych badań jest także etap ich sprawdzenia (walidacji opracowanych metod) zarówno w warunkach rzeczywistych jak i w laboratorium, gdzie pewne parametry mogą być kontrolowane. Wyniki analizy danych (na etapie walidacji i opracowania metod) wskazują na fakt, iż doktorant nabył umiejętności związane z przetwarzaniem danych, a poznane i opracowane metody potrafił wykorzystać w praktyce. Przedstawiona interpretacja wyników także na to wskazuje. Doświadczenie doktoranta w pracy zawodowej jest wyraźnym atutem przedstawionych badań.

Doktorant w dobrym stopniu nakreślił obszar badawczy i niniejsza rozprawa potwierdza jego znajomość tematu. Według mojej opinii zaproponował właściwe metody, wykazał się także dobrą znajomością tematyki. Doktorant wykazał się samodzielnością we wszystkich aspektach działalności naukowej niezbędnej do prowadzenia prac badawczych.

Uwagi szczegółowe do pracy

Pomimo, iż ogólna ocena rozprawy jest pozytywna i bez wątpienia zaproponowane metody są nowatorskie, mam także kilka uwag krytycznych, w szczególności dotyczących opracowanych metod diagnostycznych:

- W części poświęconej opracowanym nowym metodom i ich walidacji brakuje porównania z istniejącymi technikami, które wspomniane są we wcześniejszych częściach pracy. Warto byłoby tutaj pokazać chociaż częściowe porównania i na tej podstawie przedyskutować wyższość nowych technik nad tymi znanymi z literatury. Ten aspekt byłby dodatkowym atutem pracy.
- W przeglądzie literaturowym doktorant pisze o metodach bazujących na modelach obiektów. O jakich modelach tutaj mówimy? W analizie stochastycznej, która często wykorzystywana jest także w diagnostyce często poprzez model rozumiany model teoretyczny uwzględniający pewne własności matematyczne danych/systemu. Na tej podstawie bada się odchylenia od przyjętego modelu, co jest podstawą do zaproponowania procedur diagnostycznych. Czy w omawianym zagadnieniu także mówimy o modelu w tym ujęciu? Ta kwestia powinna być szerzej opisana w rozprawie.
- Brak dyskusji na temat możliwości wykorzystania opracowanych algorytmów do wykrywania innych typów uszkodzeń, o których czytamy w rozdziale 2. Czy w innych typach uszkodzeń najlepszym rozwiązaniem są także metody oparte o sieci neuronowe?
- W pracy do oceny działania modeli sieci neuronowych wykorzystano miary ex post takie jak średni bezwzględny błąd (MAE), średni bezwzględny błąd procentowy (MAPE), błąd średniokwadratowy (MSE), pierwiastek z błędu średniokwadratowego (RMSE) oraz znormalizowany błąd RMSE (nRMSE). Jeśli dane wykazują charakterystyki niegaussowskie (duże obserwacje), wówczas te miary nie są najlepszym wyborem (są bardzo wrażliwe na duże obserwacje). Czy w analizowanych obiektach możemy mieć do czynienia z danymi niegaussowskimi? Jakie wówczas miary można by użyć do oceny opracowanych technik?
- W pracy wykorzystano także kryteria informacyjne AIC, BIC oraz PHI. Podobnie jak w miarach oceny modeli, kryteria te stosowane są przy założeniu gaussowskiego charakteru danych. Odpowiednia dyskusja byłaby dodatkowym atutem w pracy.

Inne uwagi szczegółowe

Praca została przygotowana w języku angielskim. Użyty język jest poprawny, praca przygotowana jest starannie. Drobne usterki, które w naturalny sposób mogą pojawić się w tak obszernej pracy nie obniżają pozytywnej oceny recenzowanej rozprawy.

Wniosek końcowy

Recenzowana rozprawa zawiera nowe i bez wątpienia wartościowe wyniki badań. Należy podkreślić interdyscyplinarny charakter pracy oraz wielowątkowość omawianego zagadnienia. Rozprawa stanowi oryginalne zrealizowanie celu badawczego postawionego przez doktoranta. Ma ona przede wszystkim duże znaczenie aplikacyjne, co jest zgodne z założeniem programu „Doktorat wdrożeniowy”. Opracowany w ramach rozprawy system

oraz algorytmy diagnostyczne mają szansę być wykorzystane w praktyce. Warto także podkreślić naukowy charakter pracy poprzez zaproponowanie nowego podejścia do analizy danych na potrzeby wykrywania nieszczelności dla samochodowych pakietów akumulatorowych z chłodzeniem zanurzeniowym. Analiza danych i walidacja opracowanych metod pokazuje, iż doktorant w dobrym stopniu opanował techniki analizy danych oraz potrafi na podstawie uzyskanych wyników wyciągnąć wnioski.

Autor wykazał się dobrym zrozumieniem problematyki oraz znajomością literatury naukowej i technicznej dotyczącej przedmiotu badań. Podsumowując, stwierdzam, że przedłożona mi do recenzji rozprawa doktorska mgr inż. Grzegorza Wójcika pt. „Electric car battery leakage detection system” stanowi oryginalną interdyscyplinarną pracę mieszczącą się w dyscyplinie *Inżynieria Mechaniczna* i odpowiada warunkom określonym w Ustawie. Wnioskuje zatem o jej przyjęcie i dopuszczenie do publicznej obrony.

Agnieszka Wylomańska

