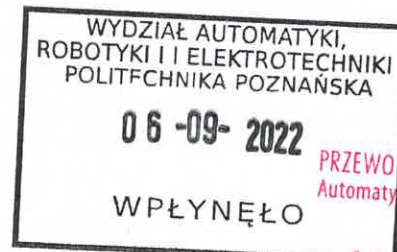


Gliwice, 06 sierpnia 2022r.

dr hab. inż. Tomasz Trawiński, prof. PŚ

Politechnika Śląska  
Wydział Elektryczny  
Katedra Mechatroniki  
ul. Akademicka 10A  
44-100 Gliwice



PRZEWODNICZĄCY RADY DISCYPLINY  
Automatyka, Elektronika i Elektrotechnika  
*Szeląg*  
prof. dr hab. inż. Wojciech Szeląg

Recenzja Rozprawy Doktorskiej  
mgr'a inż.'a Damiana Burzyńskiego  
pt.: **Modeling the degradation process of lithium-ion cells taking into account  
dynamically variable load**

1. Podstawa i przedmiot wykonania recenzji

Recenzję wykonano na podstawie uchwały Rady dyscypliny automatyka, elektronika i elektrotechnika Politechniki Poznańskiej z dnia 29 czerwca 2022r. oraz pisma DR-012/59/2022 przewodniczącego niniejszej Rady prof. dr hab. inż. Wojciecha Szeląga z dn. 01.07.2022r.

Przedmiotem recenzji jest rozprawa doktorska autorstwa mgr'a inż.'a Damiana Burzyńskiego o tematyce poświęconej modelowaniu procesów degradacji ogniw litowo-jonowych w warunkach dynamicznie zmiennego obciążenia. Rozprawa zatytułowana "Modeling the degradation process of lithium-ion cells taking into account dynamically variable load" składa się z monotematycznego cyklu trzech publikacji, opublikowanych w renomowanych czasopismach międzynarodowych. Rozprawa składa się z sześciu rozdziałów, zawiera streszczenie w języku polskim i angielskim, informacje o wykształceniu i przebiegu dotychczasowej kariery zawodowej doktoranta, przedstawia opis dotychczasowej działalności naukowo-badawczej, osiągnięciach dydaktycznych i organizacyjnych, spis literatury i cztery załączniki. W rozdziale trzecim przedstawiono zasadnicze zagadnienia teoretyczne i wyniki prac eksperymentalnych nad procesem degradacji ogniw litowo-jonowych. Praca zawiera również oryginały artykułów stanowiących cykl wydawniczy. Dyscyplina naukowa pracy to: elektrotechnika.

2. Ocena wyboru tematu i celów rozprawy

Zachodzące zmiany klimatu zmuszają współczesne społeczeństwa do zmiany podejścia w zakresie gospodarki energetycznej i transporcie, zmiany w sposobie pozyskiwania energii przy jednoczesnym zmniejszaniu emisji tzw. gazów cieplarnianych, w tym emisji do atmosfery dwutlenku węgla i metanu. Współczesna energetyka światowa oraz transport ciągle są oparte w znacznej mierze na paliwach kopalnych. Według danych przedstawionych w raporcie European Environmental Agency z lutego 2020 roku 32% emisji CO<sub>2</sub> w Unii Europejskiej pochodzi z transportu drogowego, pozostała część emisji pochodzi jak rozumiemy z



przemysłu, rolnictwa, gospodarstw domowych i energetyki. Postępujący rozwój energetyki odnawialnej napotyka wiele ograniczeń, w tym jednym z nich jest niestabilna produkcja energii uzależniona od zmiennych czynników pogodowych. Jednym ze sposobów ograniczenia tej uciążliwości jest budowa i integrowanie magazynów energii ze źródłami zielonej energii. Przykładowo w Polsce w maju 2022 roku całkowita moc elektryczna zainstalowana wynosiła 57,8 GW z czego moc elektryczna pochodząca z odnawialnych źródeł energii stanowiła 19,7 GW. Moc zainstalowanych instalacji fotowoltaicznych w Polsce wynosi obecnie 10,2 GW (średnia wielkość prosumenckich instalacji fotowoltaicznych kształtuje się na poziomie 10,5 kW). Zaistniała niedawno w Polsce zmiana systemu rozliczania prosumentów z systemu „net metering’u” na system „net billing’u” powoduje wzrost zainteresowania problematyką zarządzania energią i zwiększeniem bieżącej autokonsumpcji energii z instalacji fotowoltaicznych, np. poprzez instalację magazynów energii. Oczywistym staje się fakt, że znaczna część dostępnych rozwiązań magazynów energii bazuje na akumulatorach chemicznych, między innymi wykorzystujących ogniwa litowo-jonowe. Na intensywność rozwoju rynku magazynów energii również będzie miała wpływ ich trwałość i efektywność działania.

Doktorant w swojej rozprawie wyznacza sobie cel opracowania nowych, efektywnych metod wyznaczania parametrów wykorzystywanych do określenia zużycia ogniw litowo-jonowych w warunkach dynamicznie zmieniającego się obciążenia. Uważam, że cel stawiany w rozprawie jest bardzo aktualny i niezmiernie istotny ze względu na rozwijający się rynek magazynów energii oraz w związku z budującym się i stale rosnącym w Polsce rynkiem samochodów z napędem elektrycznym. Omawiana problematyka badań, modelowania ogniw litowo-jonowych cieszy się bardzo dużym zainteresowaniem badaczy na całym świecie, już tylko wpisanie frazy „Cell Battery Modeling” w bazie Elsevier daje ponad 160 tysięcy odpowiedzi, zaś fraza „NMC cell” daje blisko 7,5 tysiąca odpowiedzi (620 artykułów w 2022r., 690 artykułów w 2021r., 470 artykułów 2020r.). Tematyka jest nowoczesna, aktualna i ma ogromny potencjał na przyszłość.

### 3. Ocena merytoryczna rozprawy – zastosowane metody i uzyskane wyniki

Recenzowana rozprawa doktorska stanowi cykl trzech artykułów opublikowanych w czasopiśmie: *Energies* (2019), *Knowledge-based Systems* (2021), *Eksploracja i Niezawodność – Maintenance and Reliability* (2022). Dwa pierwsze ww. artykuły są współautorskie, ale o dominującej roli doktoranta określanej odpowiednio 64 i 90 procentowym udziałem, a ostatni z artykułów jest wyłącznie autorstwem doktoranta.

Część badawcza rozprawy została zawarta w rozdziale 3.4 zatytułowanym jako: Omówienie problemu naukowego oraz opis publikacji wchodzących w skład rozprawy doktorskiej. W początkowej części tego rozdziału doktorant naświetla zasadność podjęcia tematyki odwołując się do ogólnej polityki Unii Europejskiej w zakresie ograniczenia emisji dwutlenku węgla do 2030 roku, a skupionej na ograniczeniu emisyjności transportu samochodowego oraz energetyki. Rozwój transportu na bazie napędu elektrycznego zwiększa popyt na akumulatory elektrochemiczne. Doktorant wskazuje również, że baterie litowo-jonowe stosowane są bardzo szeroko w zasilaniu urządzeń mobilnych. Doktorant zwraca uwagę na różnorodność obecnych na rynku baterii cechujących się różnymi gęstościami energii, gęstości mocy, trwałością itp., oraz podkreśla aspekty bezpieczeństwa ich eksploatacji. Doktorant problematyką w obszarze modelowania ogniw elektrochemicznych zajmuje się od 2015 roku, a do chwili obecnej opublikował łącznie 18 artykułów oraz 2 artykuły o innej tematyce, swoje osiągnięcia publikacyjne doktorant, w syntetyczny sposób przedstawił w rozdziale 4.2. Doktorant



podkreśla, że jak dotąd nie opracowano wystarczająco dokładnych modeli umożliwiających przewidywanie procesu zużycia ogniw w całym okresie eksploatacji. Ponadto doktorant podkreśla w rozdziale złożoności zagadnienia modelowania procesu degradacji ogniw, wynikającego z procesów starzeniowych w obszarach katody, anody w obszarze styku elektrod z elektrolitem, separatora oraz w elektrolicie. Doktorant uważa, że dominujące znaczenie w procesach starzeniowych mają zjawiska zachodzące w obszarach elektrod i obszarze styku z elektrolitem, popierając tą tezę powołaniami literaturowymi. Procesy starzeniowe można modelować stosując dwa podejścia: fizykochemiczne oraz empiryczne. Modelowanie fizykochemiczne zdaniem doktoranta jest dokładne, ale złożone, wymagające bardzo dużych zasobów obliczeniowych, czasochłonne i w efekcie rzadko stosowane. Natomiast zaletą metod empirycznych jest korzystanie z danych uzyskanych z eksperymentów, bez konieczności dokładnych i głębokich analiz procesów elektrochemicznych, chętnie są zatem stosowane w rozwiązaniach inżynierskich. Wymienione zostały metody eksperymentalne w postaci metod: multiplikatywnych, uogólniających wiedzę (sieci neuronowe, systemy rozmyte, systemy szare, sieci bayesowskie, metody uczenia maszynowego etc). Procesy starzeniowe przebiegają zwykle powoli i trwają kilka lat. Doktorant w związku z tym zaplanował długoletni proces badań, w którym badano wpływ różnych parametrów na własności ogniw w całym okresie eksploatacji (od współczynnika zużycia SOH=100% do SOH=80%). Przedmiotem tych długotrwałych badań było ogniwo NMC Samsung ICR 18650-26H. Przygotowany algorytm badań składał się z kilku etapów: startu z wyznaczeniem pojemności, pracy cyklicznej ładowania i rozładowania (według odpowiednich procedur), sprawdzenia współczynnika zużycia co 48 godzin. Do przeprowadzenia badań skonstruowano stanowisko badawcze w skład którego wchodziły komora klimatyczna, profesjonalne urządzenia do ładowania i rozładowania akumulatorów, wielokanałowy rejestrator sygnałów. Badania trwały 5 lat, w trakcie przebadano łącznie 104 ogniwa typu NMC. Przygotowano procedurę sprawdzania aktualnej wartości pojemności akumulatorów.

Zdaniem autora w wielu proponowanych modelach pomijane są niektóre parametry pracy cyklicznej, niektóre uśredniane, dlatego zdecydował się na analizę wybranych parametrów pracy cyklicznej. Po analizie wyników zaproponował, aby wpływ temperatury otoczenia na liczbę cykli ogniwa aproksymować krzywą Gaussa, wpływ prądu rozładowania na trwałość (wyrażoną liczbą cykli, przy stałej temperaturze i stałej głębokości rozładowania) aproksymować funkcją potęgową. Funkcję potęgową przyjęto również jako aproksymację zależności wpływu głębokości rozładowania na liczbę cykli. Współczynniki tych funkcji oraz krzywej Gaussa wyznaczono metodą najmniejszych kwadratów. Zaproponowane i zastosowane podejście doktoranta uważam za prawidłowe. Na uwagę zwraca jednak fakt, że wykonane pomiary wpływu prądu rozładowania oraz głębokości rozładowania na liczbę cykli mieszczą się w zakresie niewielkich zmienności funkcji aproksymujących – przedstawionych na rysunkach 5 i 6. Zastanawiające jest czy ww. pomiary wykonane dla mniejszych wartości prądu rozładowania znalazły by się w pobliżu krzywej aproksymującej gdzie jej zmienność jest bardzo duża.

W dalszej części pracy doktorant formułuje model liczby cykli, jakie wykonać może ogniwo NMC, pracujące w stałych warunkach obciążeniowych i stałej temperaturze, z wykorzystaniem rozmytego systemu Mamdaniego. Zaproponowany model jest oryginalnym osiągnięciem doktoranta. Sformułowanych zostało 27 reguł lingwistycznych. Brakuje jednak komentarza autora dlaczego przyjęto symetryczne kształty funkcji przynależności dla parametrów wejściowych (dla temperatury – rys.7c jest nieco odkształcona centralna funkcja przynależności) oraz skąd wynika silne zagęszczenie i kształt funkcji przynależności dla liczby



cykli. Chciałbym postawić tutaj pytanie: Czy dobór funkcji przynależności był przypadkowy, czy też ulegał modyfikacjom podczas procesu badań? Czy zagęszczenie funkcji przynależności może zwiększyć dokładność modelu?

Zaproponowany model z zastosowaniem logiki rozmytej bazującej na systemach Mamdaniego cechuje się dużą dokładnością.

W kolejnym etapie badań doktorant skupił się na uwzględnieniu zmiennego obciążenia i opracowaniu metody wyznaczenia stanu zużycia ogniwa. Wyniki jego prac zostały zaprezentowane w artykule pt.: A novel method for the modeling of the state of health of lithium-ion cells using machine learning for practical applications. Zdefiniowano wskaźnik do oceny szybkości zużycia ogniw elektrochemicznych. Doktorant opisuje proces analizy statystycznej danych eksperymentalnych dla 28 ogniw pracujących w cyklicznie stałych warunkach. Wynika z tych analiz, że aktualny stan zużycia charakteryzuje się umiarkowanie wysokim wpływem na szybkość zużycia ogniw, temperatura otoczenia ma wpływ umiarkowany na szybkość zużycia ogniw, a najniższe wpływy mają średni prąd ładowania, prąd rozładowania oraz głębokość rozładowania. Doktorant przedstawił trzy wzorce dynamiki szybkości zużycia badanych ogniw: zużycie liniowe, spowolnione i przyspieszone (rysunek 10, str. 20). Podnosi argument, że identyfikacja przyczyn oraz przewidywanie punktów przecięcia na wzorcach dynamiki szybkości zużycia, podczas pracy ogniwa jest złożona, należy zastosować podejście uczenia maszynowego z nadzorem – regresji opartej na procesach Gaussowskich (GPR). Opisuje proces powstawania modelu, proces generacji danych wejściowych do modelu, przedstawia wyniki analizy porównawczej pięciu wariantów modeli uczenia maszynowego z nadzorem (tabela 5, str.21). Doktorant konkluduje, że najlepszą dokładność uzyskano dla modelu dla liniowych funkcji bazowych oraz funkcji jądrowej Matern 3/2 – błąd nie przekracza wartości 5% w ocenie stanu zużycia ogniwa. Przedstawiono wyniki weryfikacji tego modelu dla dwóch testów przeprowadzonych dla dwóch różnych temperatur i poziomach rozładowania, które prezentuje rysunek 12. Na rysunku tym zwraca uwagę silny wzrost błędu dla dużych liczb cykli. Prosiłbym o komentarz doktoranta z czego może wynikać wzrost błędu w tym zakresie.

Doktorant również, zajmował się zagadnieniem predykcji dostępnej energii użytecznej ogniwa z uwzględnieniem dotychczasowego stanu zużycia. Przeprowadził badania na grupie 29 ogniw. Zidentyfikował trzy znacznie różniące się od siebie wzorce dynamiki zmiany dostępnej energii użytecznej – prezentowane na rysunku 13. Przeprowadził dogłębne badania i weryfikację opracowanego modelu na 4 ogniwach obciążanych profilami nie wykorzystanymi w procesie uczenia.

Ostatnim etapem pracy było porównanie efektywności opracowanych metod z rozwiązaniami opisanymi w czasopismach naukowych. Porównanie to przedstawiono w tabeli 9, gdzie podano: typ modelu, parametry wejściowe, zakres zmienności parametrów wejściowych, parametr wyjściowy, zakres zmienności parametru wyjściowego, błąd modelu oraz uwagi dodatkowe. Opracowane przez doktoranta wieloparametryczne modele cechują się bardzo dużą dokładnością, umożliwiającą predykcję procesu zużycia dla szerokiego zakresu zmienności parametrów wejściowych, w całym okresie eksploatacji ogniw. Powyższe stanowi znaczące osiągnięcie doktoranta.

#### 4. Podsumowanie i konkluzja

Przedstawiony w ocenianej rozprawie materiał badawczy pochodzi z bardzo obszernych i długotrwałych – wieloletnich badań laboratoryjnych oraz analiz komputerowych. Badania

przeprowadzono z użyciem nowoczesnej aparatury, w powtarzalnych warunkach. Jakość pozyskanych danych nie budzi żadnych wątpliwości. Autor w pracy posługiwał się umiejętnie aparatem matematycznym z zakresu statystyki, logiki rozmytej i zaawansowanej teorii uczenia maszynowego. Doktorant często odnosił się do stanu obecnej wiedzy, w prawidłowy sposób dobierając materiał publikacyjny, wartościowy w obszarze tematyki rozprawy.

Do szczególnych, najważniejszych osiągnięć doktoranta zaliczam:

- 1) organizację i prowadzenie złożonych i długotrwałych badań laboratoryjnych,
- 2) organizację serii badań, z zachowaniem tych samych warunków przeprowadzania eksperymentu dzięki zastosowaniu algorytmów i procedur postępowania oraz wyciągania wniosków,
- 3) skuteczną implementację teorii logiki rozmytej w formułowaniu modelu procesu starzenia się ogniw elektrochemicznych,
- 4) sformułowane, uogólniające wiedzę z wykorzystaniem uczenia maszynowego, modele wieloparametryczne stanu zużycia ogniw,
- 5) opracowanie modeli do predykcji relatywnej energii użytecznej, wymienianej przez ogniwo w cyklu pracy,
- 6) zastosowanie aproksymacji w postaci funkcji Gaussa do modelowania wpływu temperatury na pracę ogniwa. Przyczyniło się to poprawy dokładności przyjętego modelu,
- 7) zidentyfikowanie trzech różnych wzorców sposobu szybkości zużycia badanych ogniw.

Mając na uwadze powyższe osiągnięcia, stwierdzam, że cele stawiane w rozprawie doktorskiej zostały osiągnięte. Stwierdzam, że spełnione zostały warunki określone w art.13, ust.1 ustawy z dnia 14 marca 2003 r. o stopniach naukowych i tytule naukowym oraz o stopniach i tytule w zakresie sztuki (Dz.U. 2003 Nr 65 poz. 595 z póź. zm.):

*Rozprawa doktorska, przygotowywana pod opieką promotora albo pod opieką promotora i promotora pomocniczego, powinna stanowić oryginalne rozwiązanie problemu naukowego lub oryginalne rozwiązanie problemu w oparciu o opracowanie projektowe, konstrukcyjne, technologiczne, lub oryginalne dokonanie artystyczne, oraz wykazywać ogólną wiedzę teoretyczną kandydata w danej dyscyplinie naukowej lub artystycznej oraz umiejętność samodzielnego prowadzenia pracy naukowej lub artystycznej.*

Niniejszym stwierdzam, że przedstawiona do recenzji praca doktorska spełnia wszystkie wymogi formalne i w mojej ocenie pan mgr inż. Damian Burzyński może być dopuszczony do publicznej obrony pracy.



dr hab. inż. Tomasz Trawiński, prof. PŚ