

dr hab. inż. Marcin Baszyński, prof. AGH
Akademia Górniczo- Hutnicza w Krakowie
Wydział Elektrotechniki, Automatyki, Informatyki i Inżynierii Biomedycznej
Katedra Energoelektroniki i Automatyki Systemów Przetwarzania Energii
Al. Mickiewicza 30
30-059 Kraków

Kraków 28.08.2022

PRZEWODNICZĄCY RADY DYSCYPLINY
Automatyka, Elektronika i Elektrotechnika

Szeląg
prof. dr hab. inż. Wojciech Szela

Recenzja



Rozprawy doktorskiej mgr. inż. Damiana Burzyńskiego pt.:

„Modeling the degradation process of lithium-ion cells taking into account dynamically variable load”

*„Modelowanie procesu zużycia ogniw litowo-jonowych z uwzględnieniem
dynamicznie zmiennego obciążenia”*

1. Podstawowa formalna opracowania recenzji

Niniejsza recenzja została przygotowana w odpowiedzi na pismo Przewodniczącego Rady Dyscypliny Automatyka, Elektronika i Elektrotechnika Politechniki Poznańskiej prof. dr hab. inż. Wojciecha Szela z dnia 01/07/2022 (DR-012/59/2022) dotyczącego opracowania recenzji rozprawy doktorskiej.

2. Przedmiot recenzji

Przedmiotem recenzji jest rozprawa doktorska mgr. inż. Damiana Burzyńskiego pod tytułem „Modeling the degradation process of lithium-ion cells taking into account dynamically variable load” („Modelowanie procesu zużycia ogniw litowo-jonowych z uwzględnieniem dynamicznie zmiennego obciążenia”).

Praca doktorska została złożona w formie monotematycznego cyklu oryginalnych artykułów naukowych. Na cykl składają się trzy publikacje. Do rozprawy został dołączony obszerny przewodnik zawierający wymienione publikacje oraz ich szczegółowy opis. Ponadto znalazły się tam informacje o zatrudnieniu Autora oraz opis jego działalności naukowo- badawczej.

3. Ocena aktualności tematyki rozprawy

Tematyka rozprawy dotyczy analizy pracy ogniw litowo-jonowych w szczególności wyznaczenia modelu zużycia tego typu ogniw uwzględniającego zmienne obciążenie. Tematyka rozprawy jest uzasadniona ponieważ obecnie większość urządzeń mobilnych wyposażonych jest w baterię litowo- jonową. Dlatego przewidywanie degradacji baterii lub zapewnienie na podstawie modelu optymalnego, czasu pracy baterii jest zagadnieniem ważnym, mającym uzasadnienie naukowe, jak również ekonomiczne. Obecnie ogniwa elektrochemiczne zyskują na znaczeniu w aspekcie magazynowania energii z odnawialnych źródeł energii oraz elektromobilności. W obu przypadkach baterie cechują duże pojemności (kilkadziesiąt, kilkaset kWh). Więc wydłużenie ich czasu pracy dzięki poprawnym modelom ma duże znaczenie gospodarcze.

Na tej podstawie można uznać tematykę rozprawy na aktualną i pożyteczną, a przedstawioną rozprawę zakwalifikować do dyscypliny Elektrotechnika.

4. Ogólna charakterystyka rozprawy

Treść rozprawy wynika z realnej potrzeby optymalnego określania procesu degradacji baterii litowo-jonowych.

W pierwszej z prac wchodzących w skład osiągnięcia (Burzyński D., Pietracho R., Kasprzyk L., Tomczewski A., „Analysis and Modeling of the Wear-Out Process of a Lithium-Nickel-Manganese-Cobalt Cell during Cycling Operation under Constant Load Conditions”, *Energies* 2019, 12(20), 3899 (140 pkt. MNiSW; IF = 2,702)) Autor przedstawił wyniki badań starzeniowych ogniw w zależności od temperatury otoczenia, prądu rozładowania, głębokości rozładowania oraz liczby cykli. Na podstawie uzyskanych wyników zaproponował funkcję Gaussa jako opisującą wpływ temperatury otoczenia na liczbę cykli pracy ogniw. W tej samej pracy Autor zaproponował i zaimplementował nową koncepcję modelowania liczby cykli ogniwa NMC pracującego przy stałej temperaturze i stałym obciążeniu. W autorskim rozwiązaniu wykorzystano system rozmyty typu Mamdaniego, należący do grupy modeli bazujących na danych pomiarowych. Parametrami wejściowymi są: temperatura otoczenia, prąd rozładowania, głębokość rozładowania. Natomiast na wyjściu otrzymuje się liczbę cykli ładowania/rozładowania, jakie ogniwo może wykonać zanim osiągnie SOH = 80%. Wynikowa liczba cykli określana jest na podstawie zdefiniowanej przez Autora bazy 27 reguł lingwistycznych, która zawierają wszystkie możliwe kombinacje parametrów wejściowych modelu.

W drugiej publikacji stanowiącej element osiągnięcia (Burzyński D., Kasprzyk L., „A novel method for the modeling of the state of health of lithium-ion cells using machine learning for practical applications”, *Knowledge-Based Systems* 219, 11 May 2021, 106900. (200 pkt. MEiN; IF= 8,038)) Autor przedstawił metodę pozwalającą na wyznaczenie zużycia ogniw litowo-jonowych przy pracy z losowo zmiennym obciążeniem. W tej metodzie Autor zaproponował własny współczynnik pozwalający na ocenę szybkości zużycia ogniw elektrochemicznych. Współczynnik był wyznaczany na podstawie zaproponowanej procedury kontrolnej. Do wyznaczenia modelu posłużono się eksperymentem na 28 ogniwach pracujących cyklicznie w stałych warunkach. Przy opracowaniu tej procedury postawiono hipotezę, iż „*parametry pracy cyklicznej mają wpływ na zużycie ogniwa*”. Hipoteza ta została udowodniona. Ponadto w tej pracy Autor analizował szybkość zużycia ogniw na przestrzeni okresu eksploatacji. Wykazał, że przy określonych kombinacjach wartości parametrów pracy cyklicznej występują trzy wzorce szybkości degradacji. Dwa z nich charakteryzują się dynamiką zmian szybkości zużycia ogniwa, po których następuje faza przyspieszonego lub spowolnionego zużycia. W trzecim wzorcu szybkości zużycia jest w przybliżeniu stała. Autorowi nie udało się wyznaczyć matematycznych zależności określających moment zmiany szybkości degradacji ogniwa ze względu na dużą liczbę parametrów, które wpływają na degradację oraz ich selektywny wpływ na ten proces.

W pracy ostatniej pracy (Burzyński D., „Useful energy prediction model of a Lithium-ion cell operating at various duty cycles”, *Eksploracja i Niezawodność – Maintenance and Reliability* 2022, 24 (2): 317-328 (140 pkt. MEiN; IF = 2,176)) Autor opisał problem predykcji użytecznej energii ogniwa. Badania nad tym zagadnieniem bazują na eksperymentach na 29 ogniwach pracujących cyklicznie w różnych warunkach temperaturowych i zmiennym obciążeniu. Autor badał ich zdolność do gromadzenia energii na przestrzeni całego okresu eksploatacji. Autor wykazał, że najwyższa utrata zdolności do wymiany energii wiąże się z obciążaniem ogniw prądem o wartości 7,8 A (największa wartości prądu w eksperymentach to 10,5 A, a najmniejsza to 2,6 A). Zdolność do wymiany energii była niezależna od temperatury ogniwa. Ponadto Autor wykazał, że dla ogniw rozładowywanych powyżej 70% głębokości rozładowania, zdolność do magazynowania charakteryzuje się różną dynamiką zmian w trakcie rozpatrywanego okresu eksploatacji. W zależności od kombinacji wartości parametrów pracy cyklicznej rozpoznano trzy wzorce:

- 1) o charakterystyce w przybliżeniu liniowej,

B

- 2) wolny spadek w pierwszym etapie eksploatacji, po którym następowała faza przyspieszonej utraty zdolności do wymiany energii,
- 3) po fazie oddawania założonego ładunku następowała faza przyspieszonej utraty zdolności do wymiany energii.

Autor w tej pracy stwierdza, że pomimo wykonania takiej samej liczby ekwiwalentnych cykli pracy wyniki cechują się dużą rozbieżnością i nie ma możliwości użycia standardowych metod modelowania, dlatego przeprowadził porównanie różnych metod uczenia maszynowego do odwzorowania zdolności ogniwa do wymiany energii.

Autor porównał wyniki swoich badań (zaproponowane modele) z modelami, które można znaleźć w literaturze światowej. Na podstawie przedstawionego porównania można stwierdzić, iż opracowane przez Autora wieloparametryczne modele umożliwiają predykcję procesu zużycia dla szerokiego zakresu zmienności parametrów wejściowych, dzięki temu w całym okresie eksploatacji ogniw uzyskano wyższą dokładność niż w obecnie stosowanych metodach.

5. Ocena osiągnięć naukowych Autora rozprawy

Autor wykazał, że nie opracowano dotychczas wystarczająco dokładnych modeli pozwalających na przewidywanie procesu zużycia ogniw szczególnie przy dynamicznie zmiennych obciążeniach. Dotychczas używana jest uproszczona metoda nie uwzględniająca pracy cyklicznej lub w niektórych proponowanych metodach analizy przyjmuje się zmienność jedynie w wąskim zakresie.

Na podkreślenia nakładu pracy autora należy zaznaczyć, że prace pomiarowe na podstawie, których wyznaczano parametry ogniw trwały nieprzerwanie przez okres 5 lat, natomiast przygotowanie do eksperymentu to 1 rok.

Autor zaproponował odejście od klasycznych metod modelowania na rzecz technik wywodzących się z dziedziny uczenia maszynowego i zaproponował oryginalny wieloparametryczny model predykcji zużycia ogniw litowo-jonowych. Zmiennymi wejściowymi modelu były parametry: temperatura otoczenia, prąd rozładowania, głębokość rozładowania, średni prąd ładowania oraz dotychczasowy stan zużycia ogniwa.

6. Uwagi ogólne i szczegółowe

Po zapoznaniu się z treścią rozprawy sformułowałem kilka uwag i kwestii dyskusyjnych:

1. Strona 13, „W bardziej zaawansowanych uwzględnia się większość parametrów, ale często pomija się ich zmienność (uśrednia) lub uwzględnia w niewielkim zakresie, co sprawia, że użyteczność tych modeli jest ograniczona.”. Co autor miał na myśli pisząc „większość parametrów”,
2. Badania były przeprowadzone dla ogniw Samsung ICR 18650-26H, czy na podstawie badań dla tego modelu wyniki można rozszerzyć na inne ogniwa?,
3. Strona 4, rys. 4 estymacja krzywą Gaussa, czy na podstawie 4 punktów można wykonać aproksymację?,
4. Dlaczego przy pomiarach starzeniowych dla prądu obciążenie 10,5A wykonano tylko jedną serię przy temperaturze 25°C?,
5. Strona 14, rys. 5 dlaczego przyjęto, że najmniejszy prąd rozładowania to 2,6A?

7. Ocena redakcji rozprawy

Rozprawa przygotowana starannie, jednak zawiera niewielką liczbę błędów edycyjnych np. brak akapitów np. str. 11, 14, 15 itp. Pojawiają się także błędy stylistyczne np. str. 8 „Pierwszym wtórnym ogniwem elektrochemicznym **był** akumulator kwasowo-ołowiowy (wynaleziony już ponad 150 lat temu), jednak na przestrzeni ostatnich lat zauważyć można stopniowe **ich** wypieranie przez

ogniwa litowo-jonowe, które cechują się lepszymi parametrami użytkowymi.” Niezgodność liczby pojedynczej na początku zdania i mnogiej w dalszej części wypowiedzi.

Błędy edycyjne są mało istotne i nie wpływają na przekaz pracy i jej pozytywną ocenę.

8. Podsumowanie i wniosek końcowy

1. Oceniając zawartość przedstawionej rozprawy doktorskiej stwierdzam, że Doktorant w sposób jednoznaczny sformułował oryginalny problem naukowy, który następnie rozwiązał przy użyciu metod naukowych,
2. Postawione cele rozprawy były konsekwentnie realizowane i zostały osiągnięte oczekiwane wyniki,
3. Doktorant wykazał się odpowiednim opanowaniem wiedzy teoretycznej i umiejętnościami prowadzenia badań naukowych w dyscyplinie Elektrotechnika,
4. Stwierdzam na podstawie analizy przedłożonej rozprawy, że spełnia ona warunki stawiane rozprawom doktorskim zawarte w art. 13 ustęp 1 Ustawy o stopniach naukowych i tytule naukowym oraz o stopniach i tytule w zakresie sztuki z dnia 14 marca 2003 (Dz. U. Nr 65, poz. 595 z późniejszymi zmianami uwzględnianymi w tekście ogłoszonym w Dziennikach Ustaw: z 2016r. poz. 882 oraz z 2016r. poz. 1586),
5. **Wnioskuje o dopuszczenie mgr. inż. Damiana Burzyńskiego do publicznej obrony recenzowanej rozprawy doktorskiej.**

