

## Wybrane zagadnienia modelowania trwałości akumulatorów litowo-jonowych w pojazdach elektrycznych

**Streszczenie.** W artykule przedstawiono problematykę analizy trwałości akumulatorów litowo-jonowych na przykładzie ogniw typu NMC w aspekcie zastosowania w pojazdach elektrycznych. Omówiono wybrane metody modelowania stanu zużycia akumulatorów elektrochemicznych, wymieniono ich zalety i wady oraz przedstawiono koncepcję wyznaczania stanu degradacji akumulatorów pracujących w dynamicznie zmiennych warunkach obciążenia. Zaprezentowano zależności umożliwiające obliczanie liczby cykli pracy ogniw NMC oraz dokonano identyfikacji parametrów modelu z wykorzystaniem algorytmu genetycznego. Uzyskane wyniki skomentowano we wnioskach.

**Abstract.** The article presents the problems of durability analysis of lithium-ion cells on the example of NMC type batteries in the aspect of use in electric vehicles. Selected methods of modelling the ageing processes of electrochemical batteries were discussed, their advantages and disadvantages were presented and the concept of determining the degradation process of batteries working in dynamically changing load conditions was presented. The dependencies to calculate the number of NMC cell cycles were presented and model parameters were identified using the genetic algorithm. (Selected issues of modelling degradation of the lithium-ion batteries in electric vehicles).

**Słowa kluczowe:** akumulatory litowo-jonowe, NMC, modelowanie stanu zużycia

**Keywords:** lithium-ion batteries, NMC, degradation model

### Wprowadzenie

Chociaż od zbudowania przez Roberta Andersona (w 1832 roku) pierwszego pojazdu elektrycznego minęło już prawie 190 lat, a od pierwszego spalinowo-elektrycznego pojazdu hybrydowego (zaprojektowanego przez firmę Lohner-Porsche w 1900 roku) prawie 120, to o realnym rozwoju tego typu pojazdów można mówić dopiero w XXI wieku. Przyczyną dominacji pojazdów spalinowych w ubiegłym stuleciu był zarówno niski koszt paliw kopalnych (w stosunku do cen aktualnych), jak również brak mobilnych magazynów energii elektrycznej o wystarczającej zasobności.

Rozwój magazynów energii elektrycznej, a w szczególności pojawienie się litowych ogniw elektrochemicznych, zdolnych gromadzić energię rzędu 100 – 200 Wh/kg, jak również istotny wzrost cen ropy na świecie oraz względy ekologiczne i powiązana z nimi powszechność odnawialnych źródeł energii przyczyniły się do widocznej popularności pojazdów elektrycznych i hybrydowych. Według [1] w roku 2017 w krajach EU28 sprzedano:

- 2,7% pojazdów hybrydowych HV (bez hybryd plug-in),
- 0,8% pojazdów hybrydowych typu plug-in PHV (z możliwością zewnętrznego ładowania akumulatora),
- 0,6% pojazdów elektrycznych EV (pojazdów elektrycznych zasilanych z akumulatorów BEV oraz ogniw paliwowych FCEV).

Bez wątpienia rozwój pojazdów elektrycznych i hybrydowych przyczynił się do wzrostu popytu na akumulatory, spośród których w rozwiązaniach mobilnych najczęściej stosuje się ogniwa LFP (LiFePO<sub>4</sub>, czyli litowo-żelazowo-fosforanowe) oraz NMC (LiNiMnCoO<sub>2</sub>, czyli litowo-niklowo-manganowo-kobaltowe). Ogniwa typu LFP charakteryzują się następującymi parametrami [2]:

- napięcie znamionowe: 3,2 – 3,3 V,
  - zakres napięcia pracy: 2,50 – 3,65 V,
  - gęstość energii: 90 – 120 Wh/kg,
  - standardowy prąd ładowania: 1C (do napięcia 3,65 V, potem przy stałym napięciu),
  - standardowy prąd rozładowania: 1C (w niektórych rozwiązaniach nawet do 25C),
  - trwałość: 1000 – 2000 cykli,
  - koszt rzędu: 2000 zł/kWh,
- natomiast parametry ogniw typu NMC są następujące [2]:
- napięcie znamionowe: 3,6 – 3,7 V,

- zakres napięcia pracy: 3,0 – 4,2 V,
- gęstość energii: 150 – 220 Wh/kg,
- standardowy prąd ładowania: 0,7 – 1,0C (do napięcia 4,2 V, potem przy stałym napięciu),
- standardowy prąd rozładowania: 1,0 – 2,0C (do napięcia 2,5 V),
- trwałość: 1000 – 2000 cykli,
- koszt rzędu: 1500 zł/kWh.

Ze względu na duży koszt tego typu ogniw oraz ryzyko przegrzania – co w przypadku niektórych typów ogniw litowych może prowadzić do niebezpiecznego pożaru – coraz bardziej istotna staje się problematyka modelowania ich pracy oraz stanu zużycia w dynamicznie zmieniających się warunkach pracy, tak jak w pojazdach elektrycznych. Dlatego w niniejszej pracy zajęto się tematyką trwałości jednego z wymienionych typów ogniw – NMC o pojemności 2600 mAh firmy Samsung typu ICR18650-26H (napięcie znamionowe: 3,63 V, zakres napięcia pracy: 2,75 – 4,20 V). Wszelkie badania przedstawione w pracy wykonano z wykorzystaniem zestawu mierników iCharger 4010 DUO, Pulsar 3+ oraz Kikusui PLZ 205W. Podczas pomiarów badane ogniwa umieszczone były w komorze temperaturowej Panasonic MIR 154.

### Modelowanie procesu starzenia się ogniw elektrochemicznych

Wyznaczanie stanu zużycia SOH (ang. State of Health) akumulatorów elektrochemicznych jest zagadnieniem bardzo złożonym, po pierwsze ze względu na ilość czynników mających na nie wpływ, a po drugie – ze względu na czas, po którym możliwe jest określenie stanu degradacji.

Stan zużycia wyraża się w liczbie cykli pracy, po których ogniwo traci 20% swojej pojemności początkowej (wg. zależności 1) lub w latach (zazwyczaj w kontekście przechowywania w beczynności):

$$(1) \quad SOH = 1 - \frac{C(I_n, T_n)}{C_{BOL}(I_n, T_n)}$$

gdzie:  $T_n$  – temperatura znamionowa,  $I_n$  – prąd znamionowy akumulatora,  $C(I_n, T_n)$  – pojemność akumulatora przy prądzie znamionowym oraz w temperaturze znamionowej,  $C_{BOL}(I_n, T_n)$  – pojemność początkowa akumulatora przy prądzie znamionowym oraz w temperaturze znamionowej.

Skrót BOL (ang. Begin of Life) oznacza nowy akumulator, podczas gdy zużyty oznacza się jako EOL (ang. End of Life) – uznawany w momencie, gdy pojemność akumulatora w warunkach znamionowych obniży się o 20% (tzn. gdy wartość  $SOH=80\%$ , zgodnie z ISO 12405-2).

Utrata pojemności ogniwo elektrochemicznych nie jest jedynym parametrem, na który należy zwrócić uwagę analizując proces degradacji. Wraz z ubytkiem zdolności do gromadzenia energii zauważalny jest również wzrost rezystancji wewnętrznej ogniwa. Przyjmuje się, że obie te wielkości zmieniają się proporcjonalnie do stanu zużycia [3] zgodnie z zależnościami:

$$(2) \quad C(I_n, T_n) = C_{EOL}(I_n, T_n) + \left( \frac{SOH - 0,8}{0,2} \right) (C_{BOL}(I_n, T_n) - C_{EOL}(I_n, T_n))$$

$$(3) \quad R(I_n, T_n) = R_{EOL}(I_n, T_n) + \left( \frac{SOH - 0,8}{0,2} \right) (R_{BOL}(I_n, T_n) - R_{EOL}(I_n, T_n))$$

gdzie:  $C_{EOL}(I_n, T_n)$  – końcowa pojemność wewnętrzna ogniwa w warunkach znamionowych,  $R_{BOL}$  – początkowa rezystancja wewnętrzna ogniwa,  $R_{EOL}$  – końcowa rezystancja wewnętrzna ogniwa.

Przyczyn ubytku pojemności jest wiele (elektrycznych, mechanicznych i termicznych), lecz z punktu widzenia eksploatacyjnego do najistotniejszych zalicza się natężenie przepływającego prądu (zarówno podczas ładowania, jak i rozładowania), temperaturę oraz poziom napięcia pracy – związany z stanem naładowania SOC (ang. State of Charge) lub głębokością rozładowania DOD (ang. Depth of Discharge), które wyznaczyć można z zależności [4,5]:

$$(4) \quad SOC = 1 - \frac{\int_0^{t_R} i(t) dt}{C(0, T)}$$

$$(5) \quad DOD = \frac{\int_0^{t_R} i(t) dt}{C(I_{avg}, T)}$$

gdzie:  $T$  – temperatura elektrolitu,  $i(t)$  – prąd przepływający przez ogniwo,  $I_{avg}$  – średnia wartość prądu przepływającego przez ogniwo,  $C(I_{avg}, T)$  – pojemność akumulatora w temperaturze  $T$  i przy prądzie rozładowania  $I_{avg}$ ,  $C(0, T)$  – pojemność akumulatora w temperaturze  $T$  przy znikomym prądzie rozładowania,  $t_R$  – czas pobierania ładunku, licząc od stanu pełnego naładowania.

Ze względu na to, że w ogniwach litowo-jonowych pojemność nie zależy znacząco od pobieranego prądu (ogniwa charakteryzują się niskim współczynnikiem Peukerta [3]), niekiedy przyjmuje się w uproszczeniu, że  $SOC = 1 - DOD$ .

Spotkane w literaturze [3,6-8] modele starzeniowe mają charakter multiplikatywny (degradacyjny skutek poszczególnych czynników jest wymnażany). Na przykład wpływ przepływających przez ogniwo prądów na postęp procesu degradacji najczęściej modelowany jest za pomocą funkcji wykładniczych lub eksponentialnych, dlatego zależności na liczbę cykli  $N$ , jaką wytrzyma akumulator, opisuje się wzorami (6) lub (7).

$$(6) \quad N(I_{CH}, I_D) = a_{CH} \frac{b_{CH} \cdot I_{CH}}{C_n} \cdot a_D \frac{b_D \cdot I_D}{C_n}$$

$$(7) \quad N(I_{CH}, I_D) = a_{CH} \cdot \exp\left(\frac{-b_{CH} \cdot I_{CH}}{C_n}\right) \cdot a_D \cdot \exp\left(\frac{-b_D \cdot I_D}{C_n}\right)$$

gdzie:  $I_{CH}$  – prąd ładowania,  $I_D$  – prąd rozładowania,  $a, b$  – stałe wyznaczone empirycznie (charakterystyczne dla konkretnego akumulatora),  $C_n$  – pojemność znamionowa ogniwa.

Także wpływ głębokości rozładowania na trwałość ogniwo często wyraża się przy użyciu funkcji eksponentialnych [5], np. w postaci:

$$(8) \quad N(DOD) = a_{DOD} \exp(-b_{DOD} \cdot DOD)$$

Efekt oddziaływania temperatury ogniwa uwzględnia się natomiast z wykorzystaniem prawa Arrheniusa [6-8], które opisuje intensywność procesu degradacji elementów ogniwa, spowodowanego podwyższoną temperaturą:

$$(9) \quad v_r = v_0 \exp\left(-\frac{A_a}{kT}\right)$$

gdzie:  $v_r$  – szybkość reakcji,  $v_0$  – częstość drgań cieplnych,  $A_a$  – energia aktywacji procesu relaksacyjnego,  $k$  – stała Boltzmanna.

W niektórych źródłach [8] prawo to przekształcone jest do postaci bezpośrednio uwzględniającej temperaturę otoczenia  $T_o$ :

$$(10) \quad N(T_a) = \exp\left(-\psi \left(\frac{1}{T_{on}} - \frac{1}{T_o}\right)\right)$$

gdzie:  $\psi$  – stała Arrheniusa,  $T_{on}$  – referencyjna temperatura otoczenia.

Ten sposób wyznaczania wpływu temperatury na trwałość ogniwo jest jednak słuszny wyłącznie podczas pracy w podwyższonej temperaturze, ponieważ nie uwzględnia on zmniejszenia liczby cykli pracy w obniżonej temperaturze. Z tego względu w pracy [3,9] zaproponowano zastosowanie do tego celu funkcji wielomianowej:

$$(11) \quad N(T) = a_{T3} T^3 + a_{T2} T^2 + a_{T1} T + a_{T0}$$

gdzie:  $a_{T1}, a_{T2}, a_{T3}, a_{T4}$  – stałe dobierane empirycznie.

Łącząc efekt działania poszczególnych czynników dla tak opisanego modelu otrzymuje się ostateczny przykładowy wzór na liczbę cykli pracy ogniwa:

$$(12) \quad N(I_{CH}, I_D, DOD, T) = N_0 \cdot a_{CH,D} \exp\left(\frac{-b_{CH} \cdot I_{CH}}{C_n}\right) \cdot \exp\left(\frac{-b_D \cdot I_D}{C_n}\right) \cdot a_{DOD} \exp(-b_{DOD} \cdot DOD) \cdot (a_T T^3 + b_T T^2 + c_T T + d_T)$$

Opisana zależność z pozoru uwzględnia stan naładowania ogniwa (poprzez czynnik  $DOD$ ), jednak tylko przy założeniu, że ogniwo rozładowywane jest od stanu pełnego naładowania. Jak zauważono w pracy [10], wpływ na trwałość ma nie tylko ilość pobranego ładunku ( $\Delta DOD$ ), lecz również średni stan naładowania podczas pracy ogniwa ( $SOC_{avg}$  lub jako  $DOD_{avg}$ ). Wiele badań dotyczących pracy cyklicznej pomija ten drugi czynnik, przyjmując że  $DOD = \Delta DOD$ .

Zazwyczaj nie jest to błędem, np. w przypadku rozważań dotyczących systemów zasilania gwarantowanego, które często oddają energię o stałej mocy, a po oddaniu energii powracają do stanu pełnego naładowania, ładowane w warunkach zalecanych przez producenta akumulatorów. Wówczas zależność (8) daje zadawalające wyniki. Lecz w przypadku analizy trwałości w pojazdach elektrycznych obliczenia nie powinny być

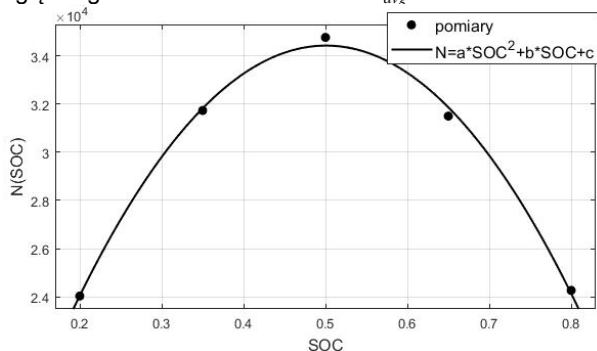
wykonywane raz na pełen cykl pracy (od i do stanu pełnego naładowania), ponieważ uśrednienie prądu rozładowania skutkować może przekłamaniami w uzyskanych wynikach – duże prądy wynikające z krótkotrwałego gwałtownego przyspieszania pojazdu zostałyby pominięte, podczas gdy to właśnie one spowodowałyby najistotniejsze ubytki trwałości.

Rozwiązaniem problemu nadmiernego uśredniania parametrów pracy jest wyznaczenie stanu zużycia w krótkich okresach, zwanych mikrocyklami. Najczęściej za mikrocykl uznawany jest okres od kolejnych ekstremów funkcji przedstawiającej stan naładowania w czasie. Konsekwencją tego jest konieczność uwzględnienia w zależności (8) średniego stanu naładowania  $SOC_{avg}$  niezależnie od ilości pobranego ładunku (np. wyrażonego przez  $\Delta DOD$ ).

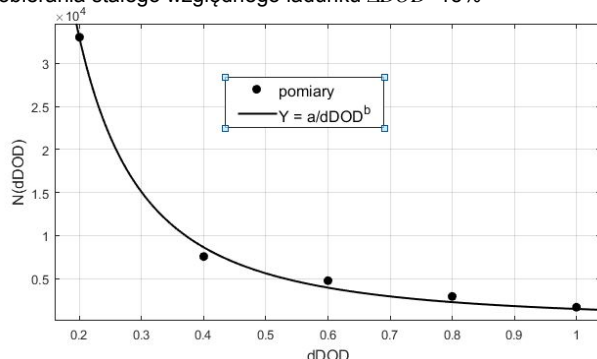
W tym celu wykonano serię pomiarów z wykorzystaniem ogniw typu NMC o pojemności 2600 mAh firmy Samsung typu ICR18650-26H, podczas których cyklicznie rozładowywano i ponownie ładowano akumulator prądem 1C w temperaturze około 28°C w dwóch wariantach:

- pobierając względny ładunek równy około 20%, 40%, 60%, 80% i 100% pojemności ogniwa, przy średnim stanie naładowania 55%,
- pobierając względny ładunek około 15%, przy średnim stanie naładowania równym 20%, 35%, 50%, 65% oraz 80%.

Pomiary powtarzano aż do osiągnięcia 80% pojemności początkowej. Badania miały na celu wykazanie wpływu tych parametrów na liczbę cykli i zaproponowanie funkcji, za pomocą której możliwe byłoby ich uwzględnienie. Uzyskane wyniki pomiarów zaprezentowano na rysunkach 1 i 2 w postaci zależności liczby cykli  $N$  w funkcji pobranego względnego ładunku  $\Delta DOD$  oraz  $SOC_{avg}$ .



Rys. 1. Liczba cykli w funkcji średniego stanu naładowania podczas pobierania stałego względnego ładunku  $\Delta DOD=15\%$



Rys. 2. Liczba cykli w funkcji ilości pobranego względnego ładunku przy stałym średnim stanie naładowania równym  $SOC_{avg}=55\%$

Z wykonanych pomiarów wynika, że ogniwo wykazuje najmniejsze zużycie gdy użytkowane jest w stanie naładowania 50-55% (gdy napięcie ogniwa wynosi około 3,65 V), a dla pozostałych wartości degradacja jest większa – liczba cykli maleje zgodnie z charakterystyką

przypominającą parabolę. Natomiast wykres przedstawiający wpływ ilości pobranego ładunku jest zbliżony do funkcji wykładniczej. Wybrane funkcje przedstawiono na rysunkach 1 i 2 w postaci linii ciągłych.

Na tej podstawie w niniejszej pracy zaproponowano modyfikację wzoru na trwałość ogniw typu NMC, przekształcając zależność (12) do postaci (13). We wzorze tym uwzględniono, że podczas mikrocyklu ładunek oddany  $\Delta DOD_D$  może się różnić od ładunku pobranego  $\Delta DOD_{CH}$ .

$$N(I_{CH}, I_D, \Delta DOD, SOC_{AVG}, T) = N_0 \cdot \left[ a_{CH} \exp\left(\frac{-b_{CH} \cdot I_{CH}}{C_n}\right) \right] \cdot \left[ a_D \exp\left(\frac{-b_D \cdot I_D}{C_n}\right) \right] \cdot \frac{2 \cdot a_{\Delta DOD}}{\Delta DOD_D^{b_{\Delta DOD}} + \Delta DOD_{CH}^{b_{\Delta DOD}}} \cdot (a_{SOC} SOC_{AVG}^2 + b_{SOC} SOC_{AVG} + c_{SOC}) \cdot (a_T T^3 + b_T T^2 + c_T T + d_T) \quad (13)$$

W celu identyfikacji parametrów modelu starzeniowego wykonano serię badań, polegających na cyklicznym ładowaniu i rozładowywaniu ogniwa prądami o różnej wartości i w różnej temperaturze, aż do osiągnięcia 80% pojemności początkowej. Wartości opisujące warunki rozładowania oraz uzyskaną liczbę cykli  $N$  przedstawiono w tabeli 1.

Tabela 1. Trwałość ogniwa w różnych warunkach pracy

LP	$I_{CH}/C_n$ [1/h]	$I_D/C_n$ [1/h]	T [°C]	N [-]
1	0,5	0,5	25	2936
2	0,5	1,0	25	2350
3	1,0	0,5	25	1921
4	1,0	1,0	25	1744
5	1,0	1,0	25	1654
6	0,5	2,0	25	1614
7	0,5	2,0	25	1504
8	1,0	2,0	26	1082
9	1,0	2,0	26	1127
10	2,0	1,0	25	972
11	2,0	1,0	25	907
12	2,0	0,5	25	991
13	2,0	2,0	27	754
14	3,0	3,0	29	357
15	1,0	1,0	0	205
16	1,0	1,0	10	870
17	1,0	1,0	40	1323
18	1,0	1,0	50	901

W celu wyznaczenia parametrów modelu opisanego wzorem (13) – w taki sposób aby możliwie jak najlepiej odzwierciedlić uzyskane wyniki pomiarów przedstawionych na rysunkach 1 i 2 oraz w tabeli 1 – dokonano optymalizacji, której celem była minimalizacja współczynnika zbieżności modelu określonego zależnością:

$$F = 1 - \frac{\sum_{i=1}^n (N_{obl}(I_{CHi}, I_{Di}, \Delta DOD_i, SOC_{avg i}, T_i) - N_{pom avg})^2}{\sum_{i=1}^n (N_{pom}(I_{CHi}, I_{Di}, \Delta DOD_i, SOC_{avg i}, T_i) - N_{pom avg})^2} \quad (14)$$

gdzie:  $N_{obl}(I_{CHi}, I_{Di}, \Delta DOD_i, SOC_{avg i}, T_i)$  – wartość obliczona na podstawie modelu dla parametrów zgodnych z  $i$ -tym punktem pomiarowym,  $N_{pom}(I_{CHi}, I_{Di}, \Delta DOD_i, SOC_{avg i}, T_i)$  – wartość uzyskana na podstawie pomiarów dla parametrów zgodnych z  $i$ -tym punktem pomiarowym,  $N_{pom avg}$  – średnia liczba cykli uzyskana na podstawie pomiarów,  $n$  – liczba pomiarów.

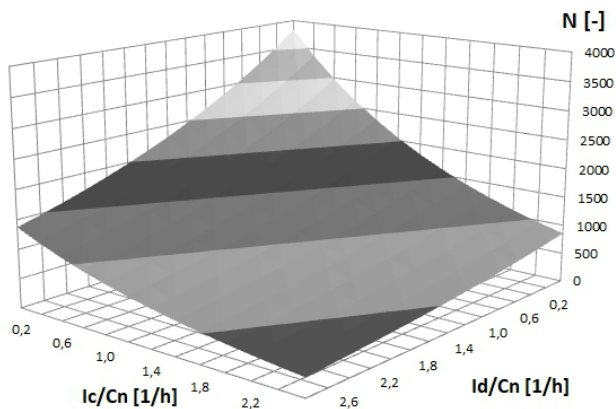
Ze względu na dużą liczbę zmiennych decyzyjnych (14 parametrów) oraz wielomodalny charakter funkcji celu, optymalizację przeprowadzono z wykorzystaniem algorytmu genetycznego, który zaimplementowano w środowisku MatLab 2014a. W algorytmie przyjęto stałą liczbę osobników w pokoleniu równą 100, a liczbę pokoleń równą 1400. W wyniku przeprowadzonej optymalizacji uzyskano następujące parametry modelu (tabela 2).

Tabela 2. Parametry modelu uzyskane w wyniku optymalizacji

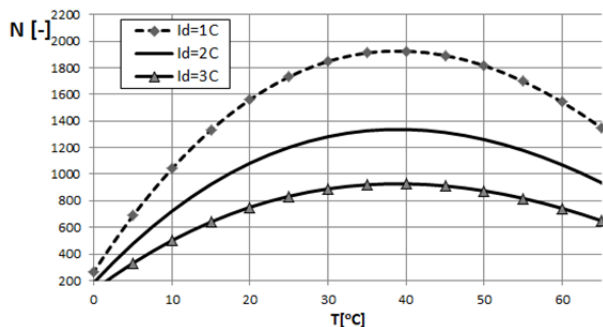
Parametr	Wartość	Parametr	Wartość
$N_0$	7,5 E-14	$a_{SOC}$	-5467
$a_{CH}$	3201	$b_{SOC}$	5475
$b_{CH}$	0,6228	$c_{SOC}$	268,8
$a_D$	2482	$a_T$	263,2
$b_D$	0,3653	$b_T$	89,49
$a_{ADOD}$	2723	$c_T$	-1,364
$b_{ADOD}$	1,481	$d_T$	-3,685 E-3

Dla tych parametrów wartość współczynnika zbieżności wyniosła około 17% (co odpowiada współczynnikowi korelacji 83%), dlatego można uznać, że zaproponowany model poprawnie odzwierciedla rzeczywiste zachowania się ogniw typu NMC i może być efektywną metodą szacowania stanu zużycia akumulatorów elektrochemicznych w pojazdach elektrycznych i innych układach charakteryzujących się dużą dynamiką zmian obciążenia.

Dzięki opracowanemu modelowi możliwe jest również wykreślenie charakterystyk pracy badanych ogniw dla różnych warunków pracy. Dla przykładu na rysunku 3 zaprezentowano płaszczyznę odzwierciedlającą szacowaną trwałość ogniw w funkcji prądu ładowania  $I_d$  oraz rozładowania  $I_{CH}$  pracujących w temperaturze 25°C.



Rys. 3. Zależność liczby cykli w funkcji prądu ładowania i rozładowania, w temperaturze znamionowej



Rys. 4. Zależność liczby cykli w funkcji temperatury przy różnych prądach rozładowania ogniwa

Analogicznie na rysunku 4 przedstawiono serię charakterystyk liczby cykli obliczonych na podstawie opracowanego modelu w funkcji temperatury, dla kilku wybranych prądów rozładowywania.

## Podsumowanie i wnioski

Omówiona w niniejszej pracy problematyka dotycząca trwałości akumulatorów litowo-niklowo-manganowo-kobaltowych (NMC) jest zagadnieniem bardzo złożonym (na wyniki ma wpływ wiele czynników o charakterze silnie nieliniowym), ale ważnym i aktualnym, ponieważ dotyczy przewidywania czasu funkcjonowania ogniw zasilających wiele urządzeń mobilnych pobierających energię w sposób stabilny oraz układy, w których pobór mocy jest dynamicznie zmienny, takie jak pojazdy elektryczne.

Zaproponowane w artykule wzory będące modyfikacją znanych z literatury algorytmów szacowania trwałości są uniwersalne dla szerokiej gamy ogniw typu NMC, lecz wymagają indywidualnej estymacji (identyfikacji parametrów modelu) w zależności od konkretnego rodzaju ogniwa, co wynika z różnej budowy i proporcji związków chemicznych wykorzystanych w ogniwie. Nie bez znaczenia jest fakt, że w tego rodzaju obliczeniach konieczna jest również analiza zachowania się akumulatorów w aspekcie elektrycznym i termicznym, analogicznie do badań przedstawionych w pracach [5,11,12]. Z tego powodu dalsze prace autora dotyczące badania magazynów elektrochemicznych w pojazdach elektrycznych nakierowane będą na podejście holistyczne do problemu modelowania, podczas których przeprowadzane będą analizy modeli trwałości oraz wielkości elektrycznych i termicznych ogniw.

**Autor:** dr inż. Leszek Kasprzyk, Politechnika Poznańska, Instytut Elektrotechniki i Elektroniki Przemysłowej, ul. Piotrowo 3A, 60-965 Poznań, E-mail: [leszek.kasprzyk@put.poznan.pl](mailto:leszek.kasprzyk@put.poznan.pl).

## LITERATURA

- [1] <http://eupocketbook.theicct.org> (05.12.2018)
- [2] [https://batteryuniversity.com/learn/article/types\\_of\\_lithium\\_ion](https://batteryuniversity.com/learn/article/types_of_lithium_ion) (05.12.2018)
- [3] Omar N., Monem M. A., Firouz Y., Salminen J., Smekens J., Hegazy O., Van Mierlo J., Lithium iron phosphate based battery—assessment of the aging parameters and development of cycle life model. *Applied Energy*, n. 113 (2014), 1575-1585
- [4] Kasprzyk L., Modelling and analysis of dynamic states of the lead-acid batteries in electric vehicles. *Eksplotacja i Niezawodność – Maintenance and Reliability*, n.19(2017), 229-236
- [5] Ceraolo M., New dynamical models of lead-acid batteries, *IEEE Transactions On Power Systems*, n. 15 (2000), 1184-1190
- [6] Wang J., Liua P., Hicks-Garnera J., Shermana E., Soukiaziana S., Verbrugge M., Tatariab H., Musserc J., Finamorec P., Cycle-life model for graphite-LiFePO4 cells, *Journal of Power Sources*, n. 196 (2011), 3942-3948
- [7] Zou, Y., Hu, X., Ma, H., & Li, S. E., Combined state of charge and state of health estimation over lithium-ion battery cell cycle lifespan for electric vehicles. *Journal of Power Sources*, n. 273 (2015), 793-803
- [8] [mathworks.com/help/physmod/sps/powersys/ref/battery.html](http://mathworks.com/help/physmod/sps/powersys/ref/battery.html) (05.12.2018)
- [9] Petzl M., Kasper M., Danzer M. A., Lithium plating in a commercial lithium-ion battery – A low-temperature aging study, *Journal of Power Sources*, n. 275, (2015), 799-807
- [10] Magnor D., Gerschler J. B., Ecker M., Merk P., Sauer D. U., Concept of a battery aging model for lithium-ion batteries considering the lifetime dependency on the operation strategy. *In Proceedings of the European Photovoltaic Solar Energy Conference*, Hamburg, Germany, 2009, 21-25
- [11] Burzyński, D., Kasprzyk, L., Wybrane metody modelowania pracy ogniw elektrochemicznych, *Przegląd Elektrotechniczny*, 93 (2017), nr 12, 75-78
- [12] Kasprzyk L., Bednarek K., Dobór hybrydowego zasobnika energii do pojazdu elektrycznego, *Przegląd Elektrotechniczny*, 91 (2015), nr 12, 129-132