

Stabilizacja temperaturowa zestawu akumulatorów Li-Ion. Symulacja i badania eksperymentalne

Streszczenie: Zagadnienia thermal-managementu są istotne, zwłaszcza w urządzeniach charakteryzujących się znaczną gęstością mocy. Dzięki racjonalnej dystrybucji energii cieplnej możliwe jest, przede wszystkim, dotrzymanie odpowiednich warunków, gwarantujących długotrwałą i bezawaryjną pracę elementów elektronicznych. W niniejszej pracy analizie poddano konstrukcję układu termostatowania baterii sześciu ogniw litowo-jonowych, przeznaczoną do eksploatacji w niskich temperaturach otoczenia. Elementy te są wrażliwe na warunki cieplne, determinujące ich trwałość oraz niezawodność. Opracowany model numeryczny został wykorzystany do wyznaczenia rzeczywistych charakterystyk eksploatacyjnych pozwalających na określenie parametrów układu izolacyjnego oraz źródeła ciepła, pozwalających na spełnienie temperaturowych parametrów pracy ogniw. Uzyskane wyniki skonfrontowano z badaniami modelu fizycznego.

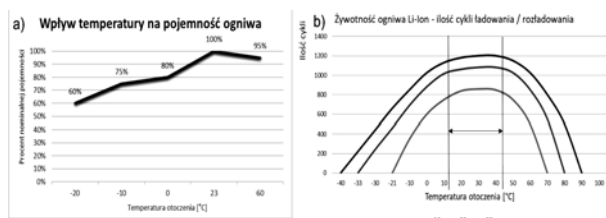
Abstract: Thermal-Management issues seems to be very important, especially in addition to devices characterized by large value of power density. Basing on rational distribution of thermal energy, there is possible, most of all, to develop appropriate conditions that guarantee a long and failure-free utilization of electronic equipment. In the paper the model composed of six lithium-ion batteries intended for exploitation in low temperature regime was analyzed. Such batteries are especially sensitive for temperature that determinates their durability and reliability. So that, device composed of batteries was complemented of thermal insulation and resistance heater. Developed numerical model was used to determine a real exploitation characteristics that enable for determination of thermal insulation and heat source parameters to fulfill thermal requirements of Li-Ion batteries. Obtained results were compared to the results of physical model tests. The physical model was designed especially for the paper requirements. (**Thermal management of Li-Ion battery**)

Słowa kluczowe: Thermal-management, ogniwa litowo-jonowe, rozkład temperatury
Keywords: Thermal-management, Li-Ion battery, temperature distribution

Wstęp

Ogniwa litowo-jonowe są popularnym źródłem energii elektrycznej w urządzeniach przenośnych oraz stacjonarnych bankach energii. Dzięki stosunkowo wysokiej gęstości energii, rozmiary baterii Li-Ion są nieduże co pozwala na wykorzystanie ich jako zasobniki energii w pojazdach elektrycznych. Oczywistym jest fakt, że ogniwa litowo-jonowe posiadają istotną wadę, która uniemożliwia wykorzystanie ich w każdych warunkach. Chodzi tutaj o wpływ temperatury na wydajność a przede wszystkim żywotność ogniw. Zgodnie z tym co obrazuje nota katalogowa popularnej baterii litowo-jonowej typu INR18650-30Q, jej nominalna pojemność (2950 mA/h) znacznie spada w niskich temperaturach (rys. 1a).

Nie mniej poważniejszym problemem jest drastycznie skracająca się żywotność ogniw Li-Ion w niskich jak i podwyższonych temperaturach [2]. Dodatkowo jest ona także silnie uzależniona od prądu ładowania w danej temperaturze, którego wartość nominalna dla testowanej baterii wynosi $1C=1,5A$ (rys. 1b). Ponadto trzeba także zwrócić uwagę na fakt iż w temperaturach poniżej $0^{\circ}C$ istnieje podwyższone ryzyko samozapłonu takiej baterii [3].



Rys. 1. Względna pojemność [1] (a) oraz cykl życia (b) ogniwa 18650 w funkcji temperatury oraz prądu ładowania [2]

W niniejszym artykule analizie poddano zagadnienia możliwości konstrukcji układu termostatowania sześciu ogniw typu 18650. Układ powinien pozwalać na utrzymywanie odpowiedniej temperatury ogniw, gwarantującej ich długotrwałą bezawaryjną pracę w warunkach chłodni, gdzie temperatura otoczenia wynosi około $-20^{\circ}C$. Omówiono zagadnienia konstrukcyjne, ze szczególną uwagą poświęconą: izolacji cieplnej, konstrukcji

oraz mocy źródeł ciepła, rodzajowi medium wypełniającego przestrzeń między ogniwami, energochłonności poszczególnych rozwiązań.

W pracy wykonano szereg numerycznych analiz procesu generacji i dystrybucji ciepła w analizowanym obszarze. Wyniki prac obliczeniowych zostały skonfrontowane z badaniami modelu fizycznego, opracowanego na potrzeby niniejszego artykułu.

Model

Do analiz wykorzystano numeryczny model akumulatora typu 18650, o zewnętrznych wymiarach 18×65 (średnica \times wysokość). Ogniwo takie składa się z zwiniętych folii (alumiowej i miedzianej) rozdzielonych polimerem oraz umieszczonych w solach litu [4]. Ta niejednorodna struktura wpływa na generację oraz dystrybucję energii cieplnej wewnątrz obudowy ogniwa. Przyjęto, że możliwe jest pominięcie wewnętrznych źródeł ciepła, co pozwala na analizę ogniwa jako elementów biernych w zagadnieniach cieplnych. W celu uproszczenia rozważań, struktura ogniwa została opisana oporami cieplnymi dla warstw cylindrycznych (1). Postępowanie takie pozwoliło na wyznaczenie zastępczej przewodności cieplnej właściwej (2) oraz traktowanie ogniwa jako jednorodnej struktury [5].

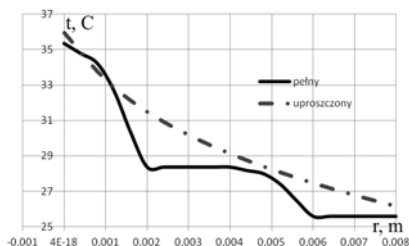
$$(1) \quad W_{ca} = \sum_{i=m}^{i=1} \ln\left(\frac{d_{i+1}}{d_i}\right) + \sum_{i=a}^{i=1} \ln\left(\frac{d_{i+1}}{d_i}\right) + \sum_{i=p}^{i=1} \ln\left(\frac{d_{i+1}}{d_i}\right) + \sum_{i=e}^{i=1} \ln\left(\frac{d_{i+1}}{d_i}\right)$$

$$(2) \quad \lambda_{sr} = \frac{\ln\left(\frac{d_z}{d_w}\right)}{2 \cdot \pi \cdot W_{ca} \cdot h}$$

gdzie: W_{ca} - całkowity opór cieplny ogniwa; d - średnica; λ - przewodność cieplna właściwa; λ_{sr} - średnia przewodność cieplna właściwa; h - wysokość ogniwa, m - liczba warstw miedzi; a - liczba warstw aluminium; p - liczba warstw folii polimerowej; e - liczba warstw elektrolitu, indeksy: m - miedz; a - aluminium; p - polimer; e - elektrolit.

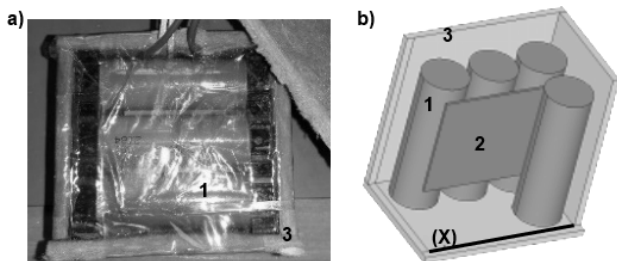
Dokładność przyjętego uproszczenia sprawdzono na podstawie obliczeń cieplnych w stanie stacjonarnym,

wykonanych przy analogicznych warunkach brzegowych, zarówno dla modelu pełnego jak i uproszczonego. Na wewnętrznej powierzchni zastosowano wymuszenie w postaci jednorodnego rozkładu mocy cieplnej o wartości 5 MW/m^3 . Na zewnętrznej powierzchni modeli (o tych samych wymiarach) przyjęto warunek brzegowy trzeciego rodzaju ($\alpha = 15 \text{ W/(m}^2\text{K)}$, $t_0=20^\circ\text{C}$). Promieniowe rozkłady temperatury pokazano na rysunku 2. Pomimo lokalnych różnic uzyskanych pól temperatury wynikających z niejednorodności parametrów materiałowych modelu pełnego, średnie wartości mocy cieplnych i temperatur są zbliżone. Z uwagi na charakter niniejszej pracy ukierunkowanej na analizę cieplną zagadnień zewnętrznych (poza wewnętrznymi warstwami ogniw), uproszczony model uznano za wystarczająco dokładny.



Rys. 2. Promieniowe rozkłady temperatury dla pełnego i uproszczonego modelu ogniw

Pełny model obliczeniowy wykonany został analogicznie do modelu fizycznego (rys. 3a) i składał się z ogniw, elementu grzejnego oraz izolacji cieplnej (rys. 3b). Materiałem znajdującym się w przestrzeni pomiędzy ogniwami było powietrze lub zalewa termoprzewodząca typu GF-400 [6]. Obszar z ogniwami został odizolowany od otoczenia przy wykorzystaniu 5 mm warstwy izolacji cieplnej o przewodności cieplnej właściwej wynoszącej $0,2 \text{ W/(mK)}$. Na rysunku 3b zaznaczono dodatkowo wewnętrzną krawędź izolacji cieplnej (poz. X na rys 3b), na której prezentowano rozkłady temperatury prezentowane w dalszej części pracy.



Rys. 3. Model fizyczny (a) oraz numeryczny (b) zestawu baterii Li-Ion. 1 – ogniwa, 2 – element grzejny, 3 – izolacja cieplna

Obliczenia wykonywano przy wykorzystaniu równania Fouriera – Kirchhoffa (3) w obszarach będących ciałami stałymi. W obszarze elementu grzejnego stosowano wymuszenie temperaturowe bądź gęstością mocy (q_V), w zależności od celu prowadzonych analiz. Na zewnętrznych powierzchniach izolacji cieplnej zastosowano warunek brzegowy trzeciego rodzaju w postaci stałego współczynnika przejmowania ciepła oraz temperatury otoczenia o wartości 253 K .

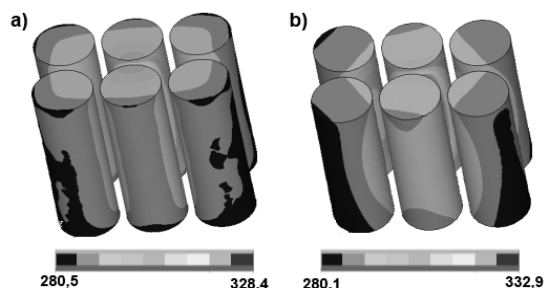
$$(3) \frac{\partial t}{\partial \tau} = a \nabla^2 t + \frac{1}{\rho c_p} \frac{\partial \lambda}{\partial t} \left[\left(\frac{\partial t}{\partial x} \right)^2 + \left(\frac{\partial t}{\partial y} \right)^2 + \left(\frac{\partial t}{\partial z} \right)^2 \right] + q_V / (\rho c_p)$$

W obszarze powietrza zastosowano obliczenia przepływowe przy wykorzystaniu modułu FLOTTRAN pakietu Ansys [7]. Wykorzystano warunki charakterystyczne dla konwekcji swobodnej oraz przepływ turbulentny opisywany klasycznym modelem k-ε [8].

Analizy w stanie stacjonarym

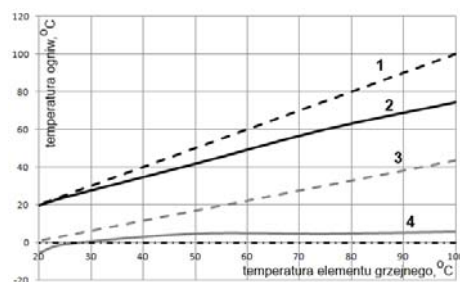
Wykorzystując scharakteryzowany w poprzednim rozdziale model dokonano wielowariantowych analiz mających na celu wykazanie zasadności stosowania zalewy termoprzewodzącej. Wykonano obliczenia dla dwóch wariantów: z uwzględnieniem zalewy w postaci ciała stałego o przewodności cieplnej właściwej wynoszącej 4 W/(mK) [4] oraz z wykorzystaniem analiz CFD dla modelu powietrza [7]. W pierwszej fazie wykonano obliczenia statyczne, stosując wymuszenie w postaci stałej temperatury elementu grzejnego. Rozkłady temperatury na powierzchni zewnętrznej ogniw (obszar najbardziej znaczący, z punktu widzenia bezpieczeństwa eksploatacji tych elementów), uzyskane przy temperaturze elementu grzejnego 60°C , pokazano na rysunku 4.

W obu rozpatrywanych przypadkach pola temperatury są zbliżone, zarówno pod względem ilościowym, jak i jakościowym. Nieco wyższe różnice pomiędzy temperaturą maksymalną i minimalną w modelu uwzględniającym zalewę GF-400 mogą świadczyć o jej potencjalnie gorszych parametrach (zastępczej przewodności cieplnej właściwej) w stosunku do powietrza w warunkach konwekcji naturalnej. Tym niemniej, wniosek ten nie jest uniwersalny i wymaga dalszych analiz.



Rys. 4. Pole temperatury na ogniwach w stanie ustalonym przy stałej temp. elementu grzejnego dla powietrza (a) oraz zalewy termoprzewodzącej (b)

Bardziej ogólna analiza obu modeli wykonana została przy zmiennej temperaturze elementu grzejnego. Na rysunku 5 zaprezentowano charakterystyki maksymalnej oraz minimalnej temperatury zestawu ogniw (wg rys. 3) w funkcji temperatury elementu grzejnego w stanie ustalonym.



Rys. 5. Charakterystyki maks. (1, 2) i min. (3, 4) wartości temp. powierzchni ogniw Li-Ion w funkcji temp. elementu grzejnego. 1, 3 - dla zalewy termoprzewodzącej, 2, 4 - dla powietrza

Analiza zaprezentowanych wyników pozwala na sformułowanie następujących wniosków:

- charakterystyczne wartości temperatury powierzchni ogniw są we wszystkich przypadkach wyższe dla modelu zalewy termoprzewodzącej;
- wyniki dla modelu zalewy są liniową funkcją temperatury elementu grzejnego, ze względu na przyjęte uśrednione parametry fizyczne;
- minimalna temperatura ogniw Li-Ion jest niemal stała w szerokim zakresie temperatur elementu grzejnego dla

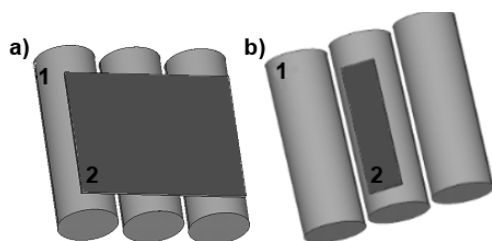
modelu uwzględniającego przepływ powietrza w warunkach konwekcji naturalnej.

Ostatni z wymienionych wniosków wynika bezpośrednio z intensywnego wpływu temperatury elementu grzejnego na charakter oraz prędkość przepływu powietrza w analizowanym obszarze. Przy niskich temperaturach występuje przepływ laminarny. W tych warunkach znaczna lepkość płynu utrudnia bezpośredni przepływ ciepła w okolice zewnętrznych obszarów pomiędzy ogniwami a izolacją cieplną, z uwagi na wąskie szczeliny o wymiarach mniejszych od warstw przyściennych występujących w okolicy powierzchni ciał stałych (4) [6].

$$(4) \quad \delta = 4,23 \left(\frac{\mu \lambda x}{c_p g \rho_\infty^2 \beta t_s} \right)^{0,25}$$

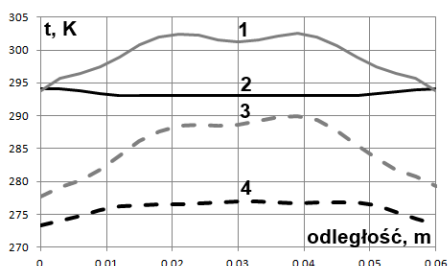
gdzie: μ - lepkość kinematyczna, c_p - ciepło właściwe, g - stała grawitacyjna, ρ - gęstość, β - współczynnik rozszerzalności objętościowej, t_s - temperatura powierzchni ciała stałego

Kolejnym czynnikiem istotnie determinującym rozkład temperatury w analizowanym obiekcie jest geometria i wielkość źródeł ciepła. Z uwagi na możliwość opracowania modelu fizycznego oraz weryfikacji doświadczalnej wykonywanych obliczeń, analizie poddano modele wykorzystujące płaskie izolowane elementy grzejne o zróżnicowanych szerokościach odpowiadających 16,6% do 100% szerokości zestawu ogniw Li-Ion (rys. 6).



Rys. 6. Widok elementów grzejnych (2) na tle ogniw (1)

Analizowano pole temperatury uzyskane przy zastosowaniu wymuszenia temperaturowego elementów grzejnych ($t_{eg}=60^\circ\text{C}$) o zróżnicowanych wymiarach. Rozkłady temperatury na powierzchni wewnętrznej izolacji cieplnej (poz. X) na rys. 3b) pokazano na rysunku 7.



Rys. 7. Rozkład temp. na wewnętrznej powierzchni izolacji cieplnej (w okolicy ogniw) przy elemencie grzejnym o szerokości 60 mm (100 % szerokości ogniw) (1, 2) oraz 10 mm (16,6 % szerokości pakietu ogniw) (3, 4) przy stosowaniu zalewy termoprzewodzącej (1, 3) oraz powietrza (2, 4) jako medium między ogniwami

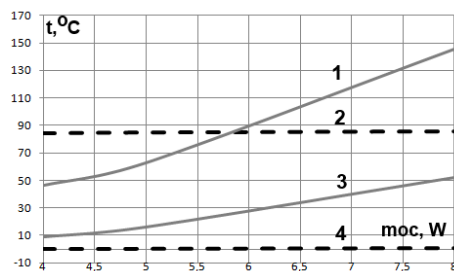
W przypadku stosowania zalewy termoprzewodzącej, uzyskano bardziej niejednorodne i wyższe wartości temperatury na powierzchni izolacji cieplnej w stosunku do powietrza. Tym niemniej, temperatury na powierzchni ogniw pozostawały zbliżone w obu modelach (podobnie, jak dla przypadku pokazanego na rys. 4, co potwierdzono badaniami modelu fizycznego), a efekt intensywniejszego

nagrzewania izolacji wynika z braku warstwy przyściennej występującej przy przepływie płynów. Nie jest to jednak zjawisko pożądane. Wyższe wartości temperatury izolacji generują zwiększone straty ciepłne, co pokazano na rysunku 8.



Rys. 8. Moc strat ciepłych w funkcji wymiarów elementu grzejnego dla modelu wykorzystującego zalewę termoprzewodzącą (1) oraz powietrze (2) jako medium między ogniwami

Straty ciepłne oraz akumulacyjność determinują znamionowe moce elementów grzejnych, gwarantujące utrzymywanie wymaganych warunków temperaturowych ogniw. Na rysunku 9 zaprezentowane zostały charakterystyki minimalnych i maksymalnych temperatur osiągniętych przez ogniwa Li-Ion przy stosowaniu elementów o zróżnicowanych wartościach mocy.

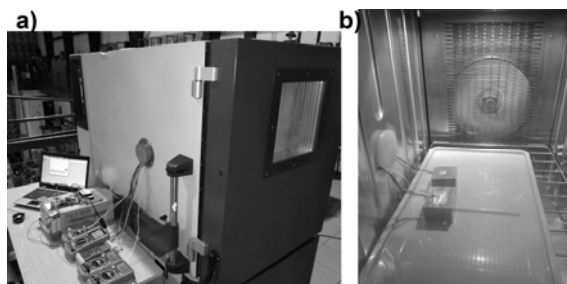


Rys. 9. Maksymalne (1, 2) oraz minimalne (3, 4) wartości temperatury na powierzchni ogniw w stanie ustalonym dla modelu wykorzystującego zalewę termoprzewodzącą (1, 3) oraz powietrze (2, 4) jako medium wypełniające przestrzeń między ogniwami

Wykonane obliczenia pozwoliły na stwierdzenie potencjalnie niższych energochłonności dla układu wykorzystującego powietrze. Niższe wartości temperatury, zarówno na powierzchni izolacji cieplnej, jak i ogniwa (mieszczące się w reżimie eksploatacji ogniw Li-Ion) powodują zmniejszone straty ciepłne, co potwierdzono, zarówno analizą przy wymuszeniu temperaturowym, jak i wartością mocy grzejnej.

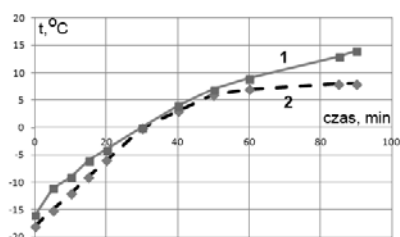
Badania modelu fizycznego

Dla potrzeb niniejszej pracy wykonano prototyp magazynu energii opartego o 6 ogniw INR18650-30Q [1] z systemem dogrzewania oraz izolacją cieplną. Widok modelu pokazano na rysunku 3a. System dogrzewający akumulatory Li-Ion oparto o płaszczyznowy rezystor grzejny wykonany w technologii grubowarstwowej na podłożach z ceramiki alundowej ($R = 73,65 \Omega$, $U_{max} = 76,6 \text{ V}$, $P_{max} = 80\text{W}$). Model eksperymentalny został dodatkowo wyposażony w 2 czujniki temperatury w postaci termopar, umieszczonych bezpośrednio na elemencie grzewczym oraz na zewnętrznej krawędzi ogniwa Li-Ion. Stanowisko badawcze do prób układu stabilizacji termicznej (rys. 10) składało komory klimatycznej firmy Weiss model SB22 300/80 w której umieszczono oba modele wraz z czujnikami temperatury



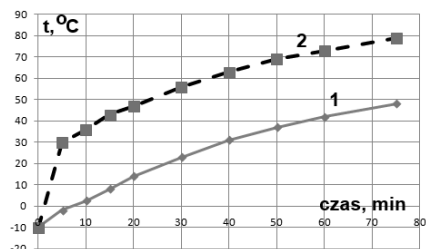
Rys. 10. Stanowisko badawcze. a - widok aparatury pomiarowej; b - wnętrze komory z widocznymi modelami magazynu energii

Wyniki pomiarów w temperaturze otoczenia wynoszącej -20°C i mocy wydzielanej w elemencie grzejnym 4W pokazane zostały na rysunku 11 w postaci charakterystyk zmian temperatury na powierzchni ogniwa Li-Ion.



Rys. 11. Temperatura na ogniwie Li-Ion przy mocy grzałki 4W. 1 - model z zalewą termoprzewodzącą; 2 - model z powietrzem

Przedstawione wyniki odniesiono do wartości pokazanych na rysunku 9, uzyskanych na drodze modelowania. Z uwagi na umieszczenie, podczas badań, czujnika temperatury od strony izolacji cieplnej, wyniki pomiarów są zbieżne z minimalnymi wartościami temperatury uzyskanymi na podstawie analiz numerycznych (por. poz. 3 i 4 na rys. 9). Dodatkowo wykonano pomiary zmian temperatury elementu grzejnego w tych samych warunkach otoczenia oraz przy analogicznej (4 W) mocy. Uzyskane wartości pokazano na rysunku 12.



Rys. 12. Temperatura na grzałce przy mocy grzałki 4W. 1 - model z zalewą termoprzewodzącą; 2 - model z powietrzem

Zaprezentowane na rysunku 12 wyniki są zbieżne z wynikami symulacji pokazanymi na rysunku 9 (por. 1 i 2 na rys. 9) dla maksymalnych temperatur na powierzchni ogniwa. Wartości te są zbieżne do temperatury elementu grzejnego, z uwagi na małą odległość tych obiektów (por. rys. 3). Tym samym potwierdzono dokładność wykorzystanych modeli numerycznych oraz wyników analiz. Zarówno pod względem jakościowym, jak i ilościowym, wyniki były zbieżne. Niewielkie różnice wynikają, między innymi z faktu nie uzyskania stanu ustalonego podczas badań modeli fizycznych.

Podsumowanie

Zagadnienia utrzymywania racjonalnych temperatur baterii Litowo - jonowych są niezwykle istotne i wpływają na ich trwałość oraz parametry eksploatacyjne. W pracy dokonano obliczeniowej analizy pola temperatury baterii

sześciu popularnych ogniw typu 18650 przeznaczonych do eksploatacji w temperaturze 253 K. Zaprezentowano konstrukcję banku energii, łącznie z elementem grzejnym oraz izolacją cieplną. W szczególności dokonano porównania efektywności stosowania powietrza oraz zalewy termoprzewodzącej jako medium wypełniającego przestrzeń między ogniwami. Na podstawie obliczeń sformułowano następujące wnioski:

- w analogicznych pod względem geometrii układach, stosowanie kosztownej zalewy termoprzewodzącej nie przynosi pożądanych rezultatów. Wartości temperatury ogniw są zbieżne w szerokim zakresie temperatur roboczych;

- stosowanie zalewy powoduje występowanie zwiększonych wartości temperatury w okolicy izolacji cieplnych oraz zwiększonych strat cieplnych;

- w przypadku stosowania powietrza jako medium wypełniającego powoduje szybki wzrost temperatury elementu grzejnego, co z kolei intensyfikuje zjawisko konwekcji powodując ujednorodnianie pola temperatury w obszarze ogniwa;

- stosowanie powietrza prowadzi do redukcji stałych czasowych nagrzewania (zmniejszenie pojemności cieplnej w stosunku do zalewy termoprzewodzącej), co jest pozytywnym czynnikiem wpływającym na dynamikę działania układu regulacji temperatury;

- rozmiar i geometria elementu grzejnego ma istotne znaczenie w układach omawianej klasy, co powinno być brane pod uwagę podczas projektowania.

Uzyskane wyniki zostały potwierdzone badaniami modelu fizycznego. Zaprezentowane rezultaty nie wyczerpują znacznej liczby czynników wpływających na konstrukcję i eksploatację urządzeń przeznaczonych do utrzymywania pożądanych parametrów cieplnych baterii Li-Ion i są tematem aktualnych badań prowadzonych przez Autora.

Autorzy: dr hab. inż. Marcin Wesolowski, Politechnika Warszawska Instytut Elektroenergetyki, ul Koszykowa 75, 00-662 Warszawa, E-mail: marcin.wesolowski@ien.pw.edu.pl; mgr inż. Adam Czaplicki, Politechnika Warszawska Instytut Elektroenergetyki, ul Koszykowa 75, 00-662 Warszawa, E-mail: adam.czaplicki@ien.pw.edu.pl;

LITERATURA

- [1] SAMSUNG SDI Confidential Proprietary –SPECIFICATION OF PRODUCT Lithium-ion rechargeable cell for power tools Model name : INR18650-30Q
- [2] Arun Mambazhasseri Divakaran , Dean Hamilton , Krishna Nama Manjunatha and Manickam Minakshi , "Design, Development and Thermal Analysis of Reusable Li-Ion Battery Module for Future Mobile and Stationary Applications" - Energies
- [3] Seyed Mohammad Rezvanianiani*, Zongchang Liu, Yan Chen, Jay Lee, "Review and recent advances in battery health monitoring and prognostics technologies for electric vehicle (EV) safety and mobility" - Journal of Power Sources 256 (2014) 110e124
- [4] Backer J. et al: Design of a Safe and Reliable Li-ion Battery System for Applications in Airborne System, Conference: 52nd AIAA Aerospace Sciences Meeting - AIAA Science and Technology Forum and Exposition, SciTech 2014
- [5] Wiśniewski S.: Wymiana Ciepła, PWN, Warszawa, 1979
- [6] GF-400 Gap Filler datasheet: <https://electrolube.com/wp-content/uploads/2019/10/GF400-2.pdf>
- [7] Arthur, M.; Asiedu, N.Y.; Bentum, E.; Abunde, F. Transient Modeling and Simulations with Ansys Flotran of Natural Gas in Pipelines. Preprints 2018, 2018070150 (doi: 10.20944/preprints201807.0150.v1).
- [8] Rahman M. M. et al, Evaluatingk—with One—Equation Turbulence Model, Proceedings of the5thBSME International Conference on Thermal Engineering21-23 December, 2012, Dhaka, Bangladesh