

Modelowanie pracy i trwałości akumulatorów litowo-jonowych w pojazdach elektrycznych

Streszczenie. W artykule przedstawiono problematykę modelowania pracy oraz zużycia akumulatorów w pojazdach elektrycznych. Omówiono podstawowe metody modelowania pracy akumulatorów elektrochemicznych oraz szacowania ich zużycia podczas rozładowania zmiennego w czasie. Zaprezentowano symulację, w której analizowano zachowanie się akumulatorów LiFeMnPO₄ podczas obciążenia charakterystycznego dla pojazdów elektrycznych. Przedstawiono uzyskane wyniki i skomentowano.

Abstract. This paper presents issues of modelling of the operation and wear of batteries in electric vehicles. The basic methods of electrochemical batteries operation modelling and estimating of wear during discharge variable in time were discussed. The simulation was carried out to analyse the LiFeMnPO₄ batteries operation during load typical for EV. The obtained results were presented and commented. (**Modelling of lithium-ion batteries operation and life in electric vehicles**).

Słowa kluczowe: akumulatory litowo-jonowe, modelowanie pracy, modelowanie trwałości

Keywords: lithium-ion batteries, performance modelling, aging model

Wstęp

W ostatnich latach zauważyć można dynamiczny wzrost popularności samochodów elektrycznych i hybrydowych. Na świecie pod tym względem szczególnie wyróżniają się takie kraje jak Chiny oraz USA, w których sprzedaje się ponad połowę aktualnie produkowanych pojazdów elektrycznych. Natomiast wśród krajów europejskich liderem jest Norwegia, w której niemal 60% nowo rejestrowanych pojazdów wyposażonych jest w napęd elektrycznych – w pełni elektrycznych (PEV) oraz hybrydowych (HEV), przy czym prawie 30% to pojazdy elektryczne [1-6].

Napędy elektryczne w pojazdach najczęściej zasilane są z akumulatorów elektrochemicznych, w szczególności nikielowo-metalowo-wodorkowych (NiMH) – stosowanych zazwyczaj w pojazdach hybrydowych – oraz z różnego typu ogniw liniowo-jonowych (Li-Ion). Powszechność akumulatorów litowych wynika z ich parametrów, z których do najważniejszych zaliczyć należy dużą gęstość mocy (250-300 W/kg) oraz gęstość energii (do 260 Wh/kg), dużą trwałość (do 7000 cykli), sprawność (do 90%) oraz systematycznie malejącą cenę (nawet poniżej 200 \$/kWh). Co więcej przewiduje się, że ich cena w ciągu kilku najbliższych lat może osiągnąć wartość rzędu 100 \$/kWh [7].

Podobnie jak z wszystkimi urządzeniami elektrycznymi, także w przypadku akumulatorów, w ostatnich latach intensywnie dąży się do ich projektowania w sposób optymalny (dedykowany do konkretnych rozwiązań, ekonomiczny i ekologiczny). W tym celu wykorzystuje się często zaawansowane techniki optymalizacyjne, umożliwiające osiągnięcie możliwie najkorzystniejszego rozwiązania [8-17]. W konsekwencji z roku na rok akumulatorów na rynku pojawia się coraz więcej.

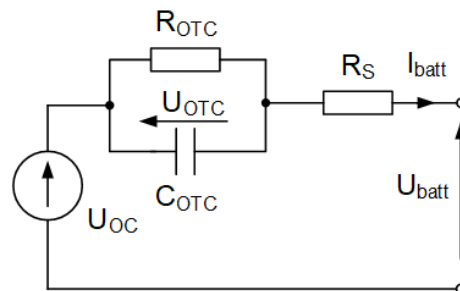
Pojawienie się nowych ogniw elektrochemicznych determinuje konieczność ich analizy zarówno pod kątem oceny prądów i napięć na zaciskach, jak również w aspekcie termicznym oraz trwałościowym. Wszystkie te parametry są od siebie silnie zależne, dlatego takie analizy wymagają zaawansowanych metod modelowania. Jest to szczególnie istotne w przypadku pojazdów elektrycznych, które pobierają energię elektryczną w sposób zbliżony do stochastycznego. Mimo to, producenci pojazdów elektrycznych i hybrydowych zobligowani są przewidzieć ich parametry (takie jak prąd, napięcie czy temperaturę) podczas jazdy oraz oszacować ich żywotność.

Istnieje wiele metod modelowania zachowania się ogniw elektrochemicznych, które najogólniej podzielić można na metody opisujące procesy fizyczne i chemiczne zachodzące w ogniwach (wykorzystywane najczęściej podczas szczegółowych analiz procesów zachodzących wewnątrz akumulatora) oraz modele obwodowe [18-23]. Znacznie bardziej złożonym zagadnieniem jest ocena trwałości akumulatorów [24-25].

Modele obwodowe

W modelach obwodowych, za pomocą których odzwierciedla się procesy zachodzące w ogniwie, wykorzystuje się schematy zastępcze składające się z różnych topologii połączeń elementów RLC. Postać takiego modelu jest dobierana ze względu na obszar zastosowań akumulatora oraz żądaną dokładność. W praktyce najpowszechniej stosowane są modele obwodowe Thevenina.

Model Thevenina z jedną gałęzią RC (tzw. pierwszego rzędu) składa się z rzeczywistego źródła napięcia, rezystora (tzw. rezystancja szeregową) oraz równolegle połączonego rezystora i kondensatora. Nierzadko również z dodatkowej rezystancji/impedancji połączonej równolegle do całego obwodu, w celu odzwierciedlenia samorozładowania. Połączenie równoległe elementów RC służy do symulowania odpowiedzi akumulatora na zmianę stanu obciążenia, tak zwanej odpowiedzi dynamicznej. Natomiast rezystor szeregowy reprezentuje rezystancję elektrod, elektrolitu oraz separatora [26]. Schemat zastępczy modelu ogniwa pierwszego rzędu przedstawiono na rys. 1.



Rys. 1. Schemat zastępczy ogniwa w modelu z jedną gałęzią RC [23]

Odpowiedź modelu Thevenina można opisać równaniami obwodowymi (1) oraz (2):

$$(1) \quad \frac{du_{OTC}}{dt} = \frac{-1}{R_{OTC} \cdot C_{OTC}} u_{OTC} + \frac{1}{C_{OTC}} i_{batt}$$

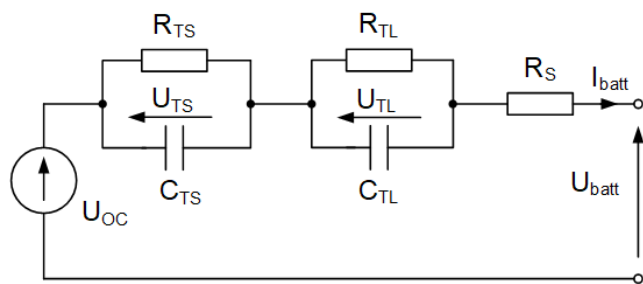
$$(2) \quad u_{batt} = u_{OC} - u_{OTC} - R_S i_{batt}$$

gdzie: u_{OTC} – napięcie gałęzi RC, R_{OTC} – rezystancja w gałęzi RC, C_{OTC} – pojemność w gałęzi RC, R_S – rezystancja szeregową, t – czas, i_{batt} – prąd płynący przez ogniwo, u_{batt} – napięcie na zaciskach ogniwa, u_{OC} – napięcie obwodu otwartego, które zazwyczaj zależy od stanu naładowania akumulatora, obliczanego z zależności [26]:

$$(3) \quad SOC = 1 - \frac{\int_0^t i_m(t) dt}{C(0, T)}$$

gdzie: $C(0, T)$ – pojemność nieobciążonego akumulatora przy temperaturze T , τ – łączny czas analizy.

W celu dokładniejszego odwzorowania pracy akumulatorów litowo-jonowych zazwyczaj wykorzystuje się modele zawierające więcej niż jedną gałąź RC (o różnych stałych czasowych). Model z dwiema gałęziami RC, przedstawiony na rys. 2, stosowany jest szczególnie w przypadkach, gdy obciążenie układu zmienia się dynamicznie.



Rys. 2. Schemat zastępczy ogniwa w modelu z dwiema gałęziami RC [23]

Wartości chwilowe sygnałów elektrycznych w obwodzie przedstawionym na rys. 2 opisuje się równaniami analogicznymi do tych przedstawionych w układzie pierwszego rzędu:

$$(4) \quad \frac{du_{TS}}{dt} = \frac{-1}{R_{TS} \cdot C_{TS}} u_{TS} + \frac{1}{C_{TS}} i_{batt}$$

$$(5) \quad \frac{du_{TL}}{dt} = \frac{-1}{R_{TL} \cdot C_{TL}} u_{TL} + \frac{1}{C_{TL}} i_{batt}$$

$$(6) \quad u_{batt} = u_{OC} - u_{TS} - u_{TL} - R_S i_{batt}$$

gdzie: u_{OC} – napięcie obwodu otwartego, R_{TS} – rezystancja opisująca odpowiedź o charakterze krótkotrwałym, C_{TS} – pojemność opisująca odpowiedź o charakterze krótkotrwałym, R_{TL} – rezystancja opisująca odpowiedź o charakterze długotrwałym, C_{TL} – pojemność opisująca odpowiedź o charakterze długotrwałym, R_S – rezystancja szeregową.

Efekt starzenia się akumulatora

Modelując parametry akumulatora litowo-jonowego należy wziąć pod uwagę wpływ starzenia się akumulatora na jego parametry elektryczne, a w szczególności

pojemność, którą traci wraz ze wzrostem liczby wykonanych cykli pracy. Zakłada się, że akumulator może być używany aż do osiągnięcia 80% pojemności znamionowej – stan ten oznaczany jest jako SOH (z ang. state of health). Etap, w którym następuje utrata 20% pojemności początkowej, nazywany jest potocznie końcem życia akumulatora i oznaczany jest jako EOL (z ang. end of life), w przeciwieństwie do stanu początkowego – BOL (z ang. begin of life). Zmiany pojemności rezystancji akumulatora przedstawia równanie [24]:

$$(7) \quad C(n) = C_{BOL} - \varepsilon(n)(C_{BOL} - C_{EOL})$$

gdzie: C_{BOL} – początkowa pojemność akumulatora, C_{EOL} – końcowa pojemność akumulatora (pod koniec życia), n – numer cyklu, ε – współczynnik starzenia się akumulatora, który przyjmuje się, że jest równy zero na początku życia baterii, a na końcu jest równy jedności. Współczynnik ten określa się na podstawie równania [24]:

$$(8) \quad \varepsilon(n) = \varepsilon(n-1) + \frac{1}{N(n-1)} \left(1 - \frac{DOD(n-2) + DOD(n)}{DOD(n-1)} \right)$$

gdzie: DOD – głębokość rozładowania, N – maksymalna liczba cykli pracy akumulatora, która określana jest wzorem [24]:

$$(9) \quad N(n) = H \left(\frac{DOD(n)}{100} \right)^{-\xi} \exp \left(-\psi \left(\frac{1}{T_{na}} - \frac{1}{T_a(n)} \right) \right) (I_D(n))^{-\gamma_1} (I_{CH}(n))^{-\gamma_2}$$

gdzie: H – stała zależna od liczby cykli, ξ – współczynnik charakterystyczny dla danego akumulatora, ψ – stała Arrheniusa, T_a – temperatura otoczenia, T_{na} – nominalna/referencyjna temperatura otoczenia, I_{CH} – średnia wartość prądu ładowania, I_D – średnia wartość prądu rozładowania, γ_1 – współczynnik dla danego prądu rozładowania, γ_2 – współczynnik dla danego prądu ładowania.

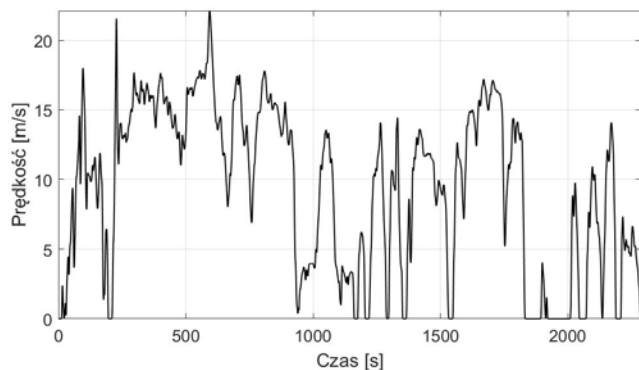
Przykład analizy pracy akumulatora

W celu symulacji pracy akumulatora litowo-jonowego podczas jazdy samochodu elektrycznego oraz określenia wpływu obciążenia ogniwa na jego trwałość, zaimplementowano model akumulatora LiFeMgPO₄. Na podstawie pomiarów oraz zależności opisanych w pracy [2] przeprowadzono analizę energochłonności pojazdu poruszającego się w ruchu miejskim na odcinku 21 km. Założono, że pojazd pokonuje w tych samych warunkach daną trasę 8-krotnie, a następnie akumulator jest ładowany mocą 3,6 kW. Takie cykle powtarzano aż do osiągnięcia przez badane ogniwo pojemności równej 80% pojemności znamionowej (czyli do osiągnięcia SOH=80%).

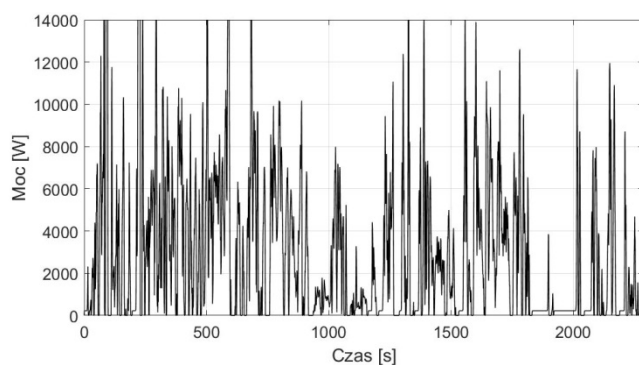
Zakładając, że wszystkie ogniwa są identyczne, symulację przeprowadzono analizując jedno ogniwo, dla którego przyjęto następujące parametry: temperatura otoczenia $T_a=35^\circ\text{C}$, początkowa temperatura celi $T_{begin}=35^\circ\text{C}$, początkowy stan naładowania, $SOC_{begin}=100\%$, pojemność początkowa w warunkach znamionowych ogniwa $C_{BOL}=40$ Ah, napięcie w pełni naładowanego ogniwa $U_{full}=3,45$ V.

Przeprowadzona symulacja składała się z dwóch części: analizy zachowania się akumulatora podczas pokonywania założonej trasy o długości 168 km (8-krotnie trasa 21 km) w ruchu miejskim oraz analizy trwałości w celu określenia wpływu mocy obciążenia na starzenie się akumulatora (na spadek pojemności) dla akumulatorów o różnych pojemnościach znamionowych: 49 kWh, 43 kWh, 36 kWh, 30 kWh oraz 24 kWh, podczas jednakowego ich obciążenia (charakterystycznego dla zadanego ruchu pojazdu) [2].

Na rysunku 3 przedstawiona została zarejestrowana prędkość samochodu w czasie, a na rysunku 4 obliczone na podstawie pracy [2] zapotrzebowanie na moc elektryczną niezbędną do pokonywania trasy przez pojazd zadaną prędkością.



Rys. 3. Zarejestrowana prędkość pojazdu w funkcji czasu



Rys. 4. Wyznaczona moc elektryczna pojazdu w funkcji czasu

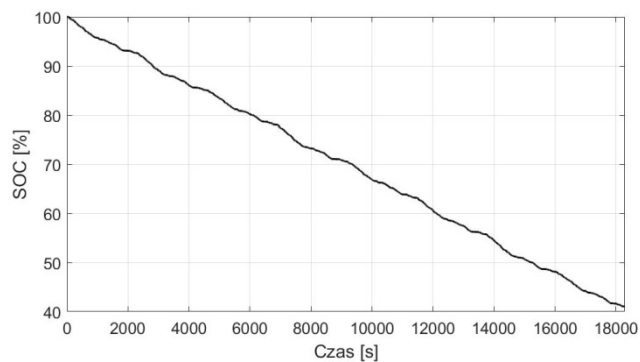
Pierwsza część badań dotyczyła analizy zachowania się akumulatora o pojemności 24 kWh podczas pokonywania trasy o długości 168 km. Podczas tej symulacji wyznaczono podstawowe parametry pracy akumulatora. Na rysunku 5 przedstawiono stan naładowania akumulatora w trakcie pokonywania zakładanej trasy, a na rysunku 6 napięcie na badanym ogniwie.

W drugiej części pracy analizowano akumulator o pojemności 24 kWh, dokonując cyklicznego ładowania i rozładowania w identyczny sposób jak w części pierwszej, aż do osiągnięcia przez akumulator pojemności równej 80% pojemności początkowej.

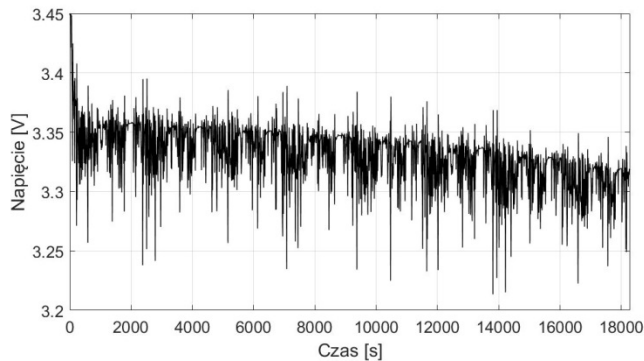
Obliczenia zostały przeprowadzone dla następujących parametrów:

- temperatura otoczenia $T_a=35^{\circ}\text{C}$,
- stała związana z liczbą cykli pracy $H = 5036$,
- współczynnik wykładnika potęgi dla DOD (zależny od DOD) $\xi= 1,4$,
- stała Arrheniusa $\psi = 1814$,
- współczynnik dla prądu rozładowania $\gamma_1=0,3$,
- współczynnik dla prądu ładowania $\gamma_2=0,1$,
- referencyjna temperatura otoczenia ogniwa $T_{nd}=20^{\circ}\text{C}$.

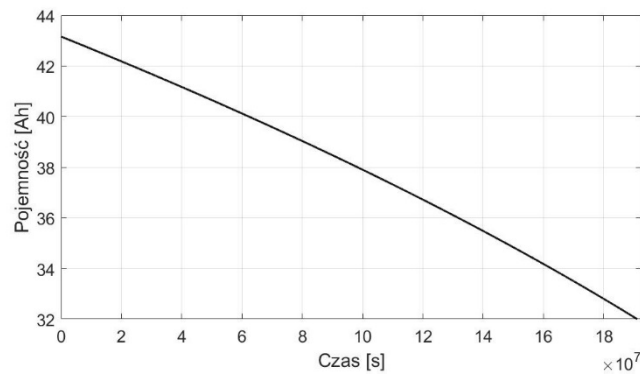
Uzyskane wyniki przedstawiono na rysunkach 7, 8 i 9, na których zaprezentowano odpowiednio: spadek pojemności, stan naładowania akumulatora oraz napięcie na ogniwie w funkcji czasu pracy.



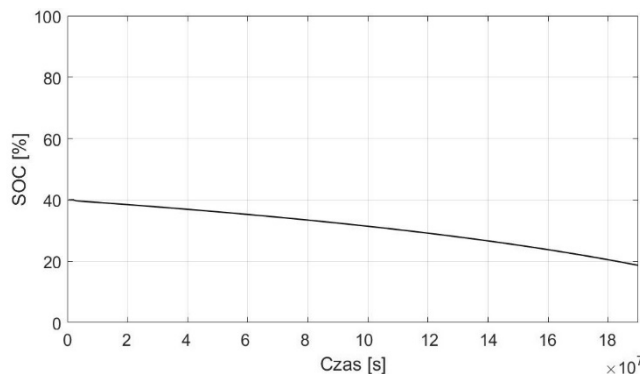
Rys. 5. Stan naładowania akumulatora podczas pokonywania przez samochód zadanej trasy



Rys. 6. Napięcie na ogniwie podczas pokonywania przez samochód zadanej trasy

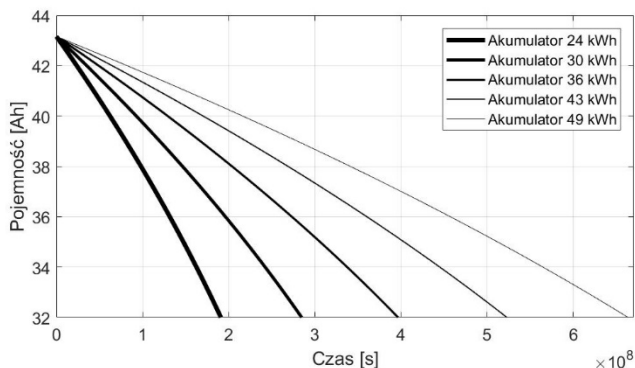


Rys. 7. Pojemność badanego ogniwa podczas pracy cyklicznej



Rys. 8. Minimalny stan naładowania akumulatora podczas pracy cyklicznej

Analizę wpływu obciążenia na trwałość akumulatora przeprowadzono także dla 5 akumulatorów o pojemnościach 49 kWh, 43 kWh, 36 kWh, 30 kWh oraz 24 kWh. Na wykresie 9 przedstawiono spadek pojemności akumulatora w funkcji cyklu ładowania i rozładowania.



Rys. 9. Porównanie spadku pojemności dla różnych akumulatorów obciążonych jednakową mocą.

Podsumowanie

W pracy zajęto się problematyką analizy zachowania się akumulatorów oraz szacowania ich zużycia podczas jazdy samochodem elektrycznym. Zagadnienia takie są ważne i aktualne, ponieważ dotyczą intensywnie rozwijającej się gałęzi magazynowania energii. Ze względu na złożoność problemu, poprawne przeprowadzenie takich analiz wymaga zastosowania zaawansowanych technik obliczeniowych.

W niniejszej pracy zbadano zachowanie się ogniwa typu LiFeMnPO₄ analizując takie parametry jak moc, napięcie, temperaturę, stan naładowania oraz ubytek pojemności ogniwa. Zbadano wpływ pojemności zastosowanych ogniw na trwałość magazynu energii. Wykonane symulacje wykazały, iż w dwukrotne zwiększenie pojemności pakietu akumulatorów może wydłużyć jego żywotność nawet trzykrotnie.

Należy jednak mieć na uwadze to, że zagadnienie szacowania trwałości jest wciąż na etapie intensywnego rozwoju i chociaż przedstawione modele zostały zweryfikowane [13], to ich dokładność w szczególnych przypadkach może być obciążona nieakceptowalnym błędem. Zdaniem autorów problem niedokładności wyników będzie się intensyfikował podczas analizy prac ogniw w warunkach odbiegających od znamionowych.

Autorzy: dr inż. Leszek Kasprzyk, Politechnika Poznańska, Instytut Elektrotechniki i Elektroniki Przemysłowej, ul. Piotrowo 3A, 60-965 Poznań, E-mail: leszek.kasprzyk@put.poznan.pl, inż. Agnieszka Domeracka, Politechnika Poznańska, Wydział Elektryczny, ul. Piotrowo 3A, 60-965 Poznań, E-mail: agnieszka.domeracka@student.put.poznan.pl, mgr inż. Damian Burzyński, Politechnika Poznańska, Instytut Elektrotechniki i Elektroniki Przemysłowej, ul. Piotrowo 3A, 60-965 Poznań, E-mail: damian.burzynski@put.poznan.pl.

LITERATURA

[1] <http://www.ofvas.no> (20.04.2018)
 [2] Kasprzyk L., Pojazdy elektryczne a problematyka doboru magazynu energii elektrycznej w aspekcie ochrony środowiska, *Europejski Wymiar Bezpieczeństwa Energetycznego a Ochrona Środowiska*, Tom I, 2015, pp. 691-708
 [3] Kasprzyk L., Bednarek K., Dobór hybrydowego zasobnika energii do pojazdu elektrycznego, *Przegląd Elektrotechniczny*, 91 2015, nr 12, 129-132
 [4] Bednarek K., Kasprzyk L., Symulacja pracy akumulatorów kwasowo-olowiowych, *Przegląd Elektrotechniczny*, 92 2016, nr 12, 61-64

[5] Burzyński D., Kasprzyk L., Modelling and simulation of lead-acid battery pack powering electric vehicle, *E3S Web of Conferences*, 01041 (2017), nr 14
 [6] Jaroszyński L., Akumulatory litowe w pojazdach elektrycznych, *Przegląd Elektrotechniczny*, 87 (2011), nr 8, 280-284
 [7] Berckmans G., Messagie M., Smekens J., Omar N., Vanhaverbeke L., Van Mierlo J., Cost Projection of State of the Art Lithium-Ion Batteries for Electric Vehicles Up to 2030, *Energies* 2017, n.10, 1314
 [8] Alemany J., Fernando M., Diego M., Benders decomposition applied to security constrained unit commitment, *IEEE Latin America Transactions*, 11.1 (2013), 421-425
 [9] Kasprzyk L., Optimization of Lighting Systems with the use of the Parallelized Genetic Algorithm on Multi-Core Processors using the .NET Technology, *Przegląd Elektrotechniczny*, 88 (2012), nr 7b, 131-133
 [10] Bugała A., Bednarek K., Kasprzyk L., Tomczewski A., Statistical analysis of the electric energy production from photovoltaic conversion using mobile and fixed constructions, *EEMS 2017, E3S Web of Conferences* 19, 01002 (2017), 1-6
 [11] Alemany, J., Komarnicki, P., Lin, J., Magnago, F., Exploiting symmetry in unit commitment solutions for a large-scale electricity market, *Electric Power Systems Research*, 140 (2016), 363-377
 [12] Bednarek K., Kasprzyk L., Suppression of higher harmonic components introduction to the networks and improvement of the conditions of electric supply of electrical equipment, *Przegląd Elektrotechniczny*, 88 (2012), nr 12b, 236-239
 [13] Kasprzyk L., Tomczewski A., Bednarek K., Rozproszenie obliczeń elektromagnetycznych i optymalizacyjnych układów elektrycznych z zastosowaniem procesorów wielordzeniowych, *Przegląd Elektrotechniczny*, 87 (2011), nr 12b, 82-85
 [14] Drożdż, T., Kuciński, S. Metoda szacowania niepewności pomiarów wykonywanych przy weryfikacji symulatorów wyładowań elektrostatycznych, *Przegląd Elektrotechniczny*, 83 (2007), nr 9, 39-42
 [15] Duraj, A., Korzeniewska, E., Krawczyk, A., Classification algorithms to identify changes in resistance, *Przegląd Elektrotechniczny*, 1 (2015), nr 12, 80-82
 [16] Burzyński D., Głuchy D., Godek M., Analysis of the impact of quick charge technology on the charging process parameters of the lithium-ion storage at various temperatures, *ITM Web of Conferences* 19, nr 01035 (2018)
 [17] Alemany J., Magnago F., Lombardi P., Arendarski B., Komarnicki, P., Multiobjective Optimization Model for Wind Power Allocation, *Mathematical Problems in Engineering*, 2017
 [18] Burzyński, D., Kasprzyk, L., Wybrane metody modelowania pracy ogniw elektrochemicznych, *Przegląd Elektrotechniczny*, 93 (2017), nr 12, 75-78
 [19] Rahmouh A., Biechl H., Modeling of Li-ion batteries using equivalent circuit diagrams, *Przegląd Elektrotechniczny*, 88 (2012), nr 7b, 152-156,
 [20] Tremblay O., Dessint L., Experimental Validation of a Battery Dynamic Model for EV Applications, *World Electric Vehicle Journal*, 3 (2009), 289-298
 [21] Ramadesigan V., Northrop P. W. C. De S., Santhanagopalan, S., Braatz R. D., Subramanian V. R., Modeling and Simulation of Lithium-Ion Batteries from a Systems Engineering Perspective, *Journal of The Electrochemical Society*, (2012), nr 159, 31-43
 [22] Chen M., Rincón-Mora G.A., An Accurate Electrical Battery Model Capable of Predicting Runtime and I-V Performance, *IEEE Transactions On Energy Conversion*, 21 (2002), 504-511
 [23] Stefano Barsali, Massimo Ceraolo, Dynamical of Lead-Acid Batteries: Implementation Issues, *IEEE Transactions on Energy Conversion*, 17 (2002), 16-23
 [24] <https://www.mathworks.com/help/physmod/sps/powersys/ref/battery.html> (23.06.2018)
 [25] Erdinc O., Vural B., Uzunoglu M., A dynamic lithium-ion battery model considering effect of temperature and capacity fading, *Clean Electrical Power*, 2009 International Conference on, (2009), 383-386
 [26] Kasprzyk L. Modelling and analysis of dynamic states of the lead-acid batteries in electric vehicles. *Eksploatacja i Niezawodność – Maintenance and Reliability*; 19(2017), 229-236