

## Badania elektrochemicznych magazynów energii

**Streszczenie.** W artykule przedstawiono badania stanowiskowe akumulatorów żelowych. Badania przeprowadzono w cyklu statycznym (przy stałym prądzie obciążeniowym) oraz w cyklu dynamicznym (impulsowy prąd rozładowania). W pracy zaprezentowano także towarzyszący pracy baterii wzrost temperatury na jej zaciskach oraz na obudowie. W pracy przedstawiono również wpływ różnych wartości prądu rozładowania na przyrost temperatury oraz zmiany napięcia na zaciskach akumulatora.

**Abstract.** This article presents the test bench research on gel batteries. The tests were carried out in the static cycle (with the constant load current), and in the dynamic cycle (impulse discharge current). This work discusses also the temperature increase on the battery terminals and housing, which accompanies the battery operation. Moreover, the influence of different discharge current values on the temperature increase and voltage changes on the battery terminals have been presented in this work (**Research on electrochemical energy stores**)

**Słowa kluczowe:** Akumulator elektrochemiczny, badania stanowiskowe, akumulator żelowy.

**Keywords:** Electrochemical battery, tests bench research, gel battery.

### Wstęp

W kontekście pakietu klimatycznego 2020 [1] na państwa członkowskie Unii Europejskiej są narzucane określone obowiązki dotyczące m.in. zwiększenia udziału Odnawialnych Źródeł Energii (OZE) na rynku energii do blisko 20% w ogólnym zużyciu energii [1-4] oraz zwiększenia udziału biopaliw w transporcie do 10% (przy czym dla Polski cel obowiązkowy to 15,3%), poprawy efektywności energetycznej (o 20%) [1-6] oraz ograniczenia emisji gazów cieplarnianych (m.in. CO<sub>2</sub>) do atmosfery (przynajmniej o 20% w porównaniu z poziomem z 1990) [1, 7, 8]. Obecnie nakreślone są ramy polityki klimatyczno-energetycznej Unii Europejskiej (UE) w perspektywie 2030 [4, 9] oraz 2050. W perspektywie 2030 [9] określone zostały nowe cele do których zaliczamy m.in.: poprawę efektywności energetycznej do 27%, wzrost udziału OZE do 27% w całkowitej energii zużywanej w UE oraz ograniczenie emisji gazów cieplarnianych do blisko 40%. Wymienione cele będą miały diametralny wpływ na rozwój techniki, w szczególności urządzeń generacji rozproszonej [3, 10-15], które w kontekście Polski wpłyną na konkurencyjność jej gospodarki. Jednym z bardzo istotnych elementów poprawy efektywności energetycznej jest rozwój technik magazynowania energii. W literaturze naukowej oraz przemyśle wyróżniane są różne metody jej magazynowania [4, 16-18] w zależności od postaci energii m.in.: w ogniwach odwracalnych II rodzaju (elektrochemiczna), bezwładnikach (mechaniczna), superkondensatorach (elektryczna), cewkach magnetycznych nadprzewodzących (elektryczna), układach szczytowo-pompowych (mechaniczna) czy też w podziemnych wyrobiskach skalnych (mechaniczna), gdzie wtłoczone sprężone powietrze może być powtórnie wykorzystane do napędu np. maszyn bądź w zasobnikach ciepła (energia cieplna) [16]. Techniki magazynowania energii szczegółowo omówiono w pracach [4,17-18] Równocześnie zmierzając w kierunku liberalizacji rynku energii, wsparcia dla prosumentów [2] w przyszłości obserwowany będzie wzrost zainteresowania pojazdami elektrycznymi [19-28], które stanowią będą integralną część generacji rozproszonej [3, 10]. Obecnie w Polskim prawie nie mówi się o regulacjach normujących masowe wprowadzenie takich pojazdów do użytku. Ograniczenia przy masowym wprowadzeniu stawiają m.in.: cena baterii trakcyjnych oraz ich żywotność, a także zdolności wytwórcze polskiej energetyki zawodowej [28], dla których, jak obrazuje przykład symulacji dla Los Angeles [21], może wystąpić przy niekontrolowanym ich ładowaniu (zwiększenie zużycia energii w szczycie) nawet tzw. *black-*

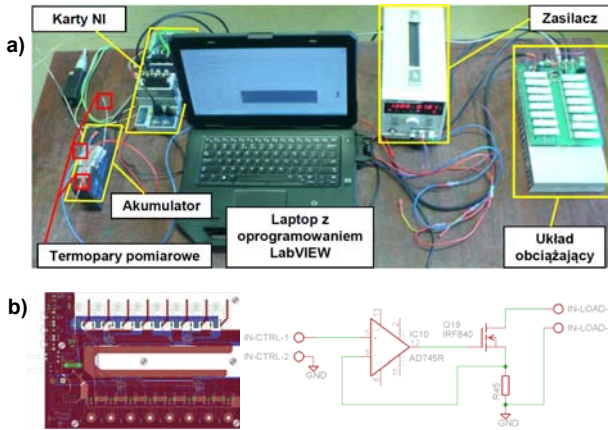
*out*. Z tego względu niezwykle istotne jest kontrolowanie ładowania elektrochemicznych magazynów energii znajdujących się w pojazdach elektrycznych [19, 22, 25], w tym należy podkreślić, że bardzo racjonalne jest ich ładowanie wykorzystując energię ze źródeł odnawialnych oraz układów kogeneracyjnych [12, 26, 29]. Oczywiście prostą odpowiedzią na pytanie dotyczące ceny baterii będzie wzrost popytu na nie - co nastąpić może tylko w sprzyjających warunkach polityczno-ekonomicznych.

Na wiele pytań dotyczących eksploatacji baterii trakcyjnych odpowiadają badania dynamicznej pracy baterii w zadanym cyklu obciążeniowym [30, 31]. Studium wybranych badań baterii trakcyjnych zawarto w niniejszej pracy. Zaprezentowano budowę stanowiska, przebiegi prądowe, napięciowe a także przebiegi przyrostu temperatury uzyskane z badań stanowiskowych.

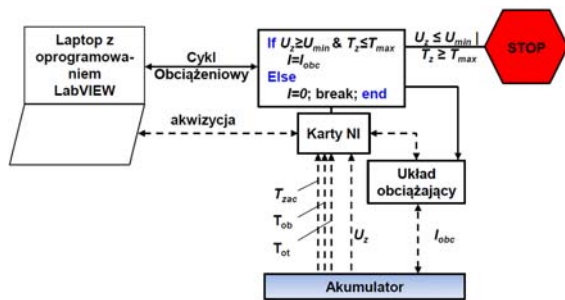
### Budowa stanowiska badawczego

Stanowisko badawcze składało się z układu obciążającego, termopar pomiarowych typu K, szczęk prądowych, kart NI oraz oprogramowania napisanego w programie LabVIEW (rys. 1a). Układ do zadawania obciążeń został zrealizowany w oparciu o programowalne źródła prądowe. Schemat elektryczny urządzenia został pokazany na rysunku 1b. Jest to typowa aplikacja, w której jeden zespół zwielokrotniono 16-krotnie w układzie szeregowo-równoległym w celu powiększenia obciążalności prądowej urządzenia. Tranzystor MOS-FET o dużej obciążalności wykorzystany został do regulacji prądu ze źródła, jakim w tym przypadku był akumulator elektrochemiczny. Taki układ wymaga by znak napięcia na zaciskach był stały, co było zapewnione. Jak się okazało, układ nie miał tendencji do wzbudzenia. Rezystor pomiarowy został dobrany tak, by pojedyncze ogniwo pozwalało zadać maksymalne obciążenie na poziomie 10 A. Łączna maksymalna obciążalność wynosiła 160 A. Maksymalna moc, jaką źródło mogło odebrać nie została określona. Zależnie od warunków chłodzenia z powodzeniem udawało się wytracić na urządzeniu moce na poziomie 500 W. Zaletą urządzenia zrealizowanego w oparciu o źródła prądowe jest automatyczne dostrajanie się do zmiennych warunków pracy źródła obciążanego.

Na rysunku 2 zaprezentowano schemat stanowiska badawczego. Podczas badań mierzone były następujące parametry:  $U_z$  - napięcie na zaciskach akumulatora,  $I_{obc}$  - prąd ładowania/rozładowania (w niniejszej pracy prąd obciążający i prąd rozładowania są tożsame), temperatury:  $T_{ot}$  - otoczenia,  $T_{ob}$  - temperatura obudowy,  $T_{zac}$  - temperatura na zaciskach akumulatora.



Rys.1. a) Zdjęcie stanowiska badawczego, b) schemat układu do zadawania obciążenia



Rys.2. Schemat stanowiska badawczego

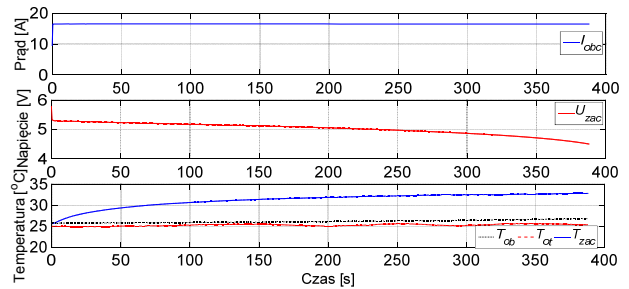
Na rysunku 3 zaprezentowano pulpit programu opracowanego w LabVIEW, który służył do zadawania wybranych parametrów cyklu obciążeniowego. Program umożliwiał zadawanie zarówno stałego (statyczne obciążenie), jak również zmiennego w czasie obciążenia prądowego (dynamiczne obciążenie). Program zabezpieczał przed zniszczeniem akumulatora. Powyżej zadanej wartości granicznej obciążenia, któremu towarzyszył gwałtowny przyrost temperatury na zaciskach ogniwa, rejestracja była przerywana. Dodatkowo z interfejsu użytkownika zadawano takie parametry jak: minimalne napięcie na zaciskach ogniwa, pojemność nominalna oraz rodzaj badanego akumulatora. O uniwersalności napisanego programu świadczy fakt, że przewiduje on możliwość badania innych rodzajów akumulatorów m.in: niklowo-kadmowych, litowo-jonowych, litowo-polimerowych, litowo-jonowo-nanofosfatowych ( $\text{LiFePO}_4$ ) oraz niklowo-wodorkowych.



Rys.3. Widok aplikacji stworzonej w LabVIEW do rejestracji wybranych parametrów

### Wyniki badań stanowiskowych

Na rysunku 4 zaprezentowano zmianę napięcia na zaciskach ogniwa dla statycznego obciążenia. Prąd ma wartość stałą w czasie. Po 388 s przy prądzie 16.6 A następuje całkowite wyładowanie ogniwa do stanu o napięciu 4.5 V. Pojemność nominalna ogniwa wyniosła 7.2 Ah.

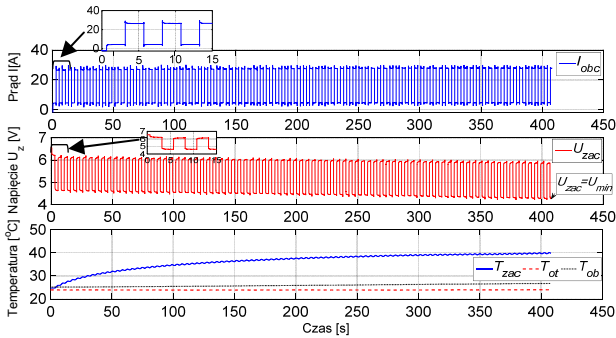


Rys.4. Przebiegi prądu obciążenia ( $I_{obc}$ ), napięcia na zaciskach ( $U_{zac}$ ) oraz temperatur na obudowie ( $T_{ob}$ ), zaciskach ( $T_{zac}$ ) oraz temperatur otoczenia ( $T_{ot}$ ) - cykl statyczny

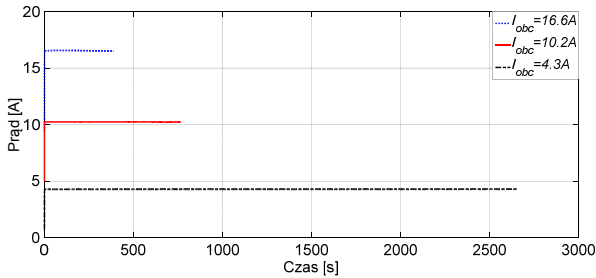
Z analizy wyników badań przedstawionych na rysunku 4 wynika, że występuje duży spadek napięcia na zaciskach ogniwa (wysoki wzrost prądu do wartości 16.6 A). Ten spadek napięcia spowodowany jest ograniczona szybkością dyfuzji reagentów, które nie nadążają z dotarciem bądź odejściem od powierzchni elektrody w celu wymiany elektronów. Można stwierdzić, że szybkość dyfuzji reagentów jest ograniczona a im wyższe wartości prądu tym większy jest spadek napięcia na elektrodach akumulatora skutkiem czego jest obniżenie napięcia całego ogniwa (polaryzacja stężeniowa na elektrodach). Wraz ze wzrostem wartości prądu ładowania/rozładowania (Rys. 4) wzrasta również temperatura na zaciskach akumulatora ( $T_{zac}$ ) oraz na jego obudowie ( $T_{ob}$ ). Wynika to z faktu wydzielania się ciepła podczas pracy ogniwa odwracalnego II rodzaju. Ciepło wydzielane podczas pracy ogniwa zgodnie z założeniami zaprezentowanymi w pracach [32-36] wymaga połączenia domeny elektrochemicznej z domeną termodynamiczną [32] i jest sumą ciepła wydzielanego podczas polaryzacji aktywacyjnej, ciepła wydzielanego podczas spadku napięcia na oporze wewnętrznym oraz ciepła wydzielanego podczas polaryzacji stężeniowej. Z analizy przeprowadzonej w [32] wynika, że strumień ciepła wydzielanego jest bezpośrednio związany ze zmianą entropii i jest wprost proporcjonalny do tej zmiany.

Na rysunku 5 zaprezentowano przebieg prądu obciążeniowego, zmianę napięcia na zaciskach akumulatora oraz zmiany temperatury odpowiednio na: zaciskach, obudowie akumulatora oraz towarzyszący przebieg temperatury otoczenia. Impulsowemu charakterowi zmian prądu rozładowania towarzyszą „schodkowe” przyrosty temperatury na zaciskach akumulatora. Takiemu procesowi towarzyszy także dynamiczna zmiana napięcia na zaciskach akumulatora. Warto zwrócić uwagę na przebieg napięcia na zaciskach akumulatora, który w przeciwieństwie do przebiegu prądu ma łagodny charakter (rys. 5 w powiększeniu). Za łagodne przejścia odpowiada dynamika pracy akumulatora, a w szczególności polaryzacja aktywacyjna oraz polaryzacja stężeniowa. Dynamicznej zmianie prądu obciążeniowego towarzyszy dynamiczna zmiana stężeń reagentów przy elektrodach, które nie nadążają z dotarciem bądź odejściem od powierzchni elektrody czego efektem jest wymiana elektronów [37]. Jak już wcześniej wspomniano, jest to następstwem ograniczonej szybkości dyfuzji reagentów. Takie zjawisko jest szczególnie zauważalne w cyklu dynamicznej pracy akumulatora.

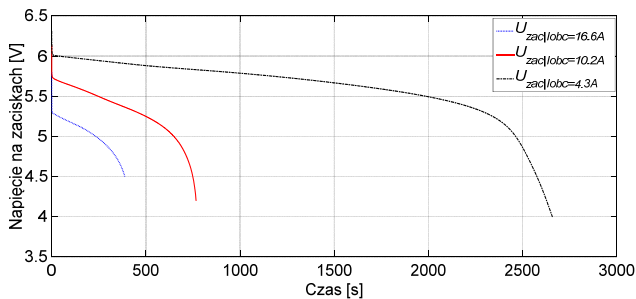
Na rysunku 6 zaprezentowano różne przebiegi prądów rozładowania, które wpływają na przyrost temperatury na zaciskach akumulatora (rys. 8) oraz zmniejszenie napięcia na zaciskach akumulatora (rys. 7).



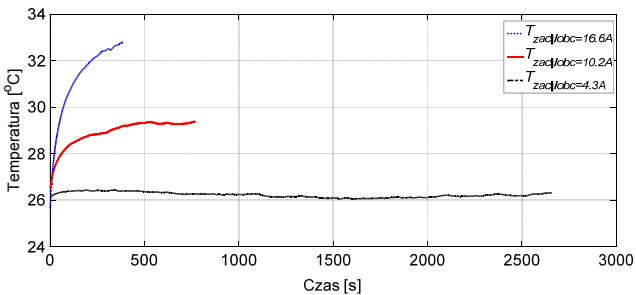
Rys.5. Przebiegi prądu obciążenia ( $I_{obc}$ ), napięcia na zaciskach ( $U_{zac}$ ) (oraz temperatur na obudowie ( $T_{ob}$ ), zaciskach ( $T_{zac}$ ) oraz temperatury otoczenia ( $T_{ot}$ ) - cykl dynamiczny



Rys.6. Przebiegi prądu obciążenia (cykl statyczny)



Rys.7. Przebiegi napięcia na zaciskach akumulatora (cykl statyczny) dla różnych wartości prądów rozładowania



Rys.8. Przebiegi zmian temperatur na zaciskach akumulatora (cykl statyczny) dla różnych wartości prądów rozładowania

Na rysunku 7 zaprezentowano przebiegi napięcia na zaciskach akumulatora dla różnych wartości prądu rozładowania. Na podstawie analizy rysunku 7 można stwierdzić, że wraz ze wzrostem prądu rozładowania wzrasta zarówno szybkość spadku napięcia na zaciskach akumulatora w początkowej fazie rozładowania oraz czas rozładowania akumulatora. Dodatkowo można zaobserwować na przebiegach trzy przedziały pracy akumulatora:

1. Nieliniowy obszar (pierwszy) występujący na skutek spadku napięcia (ograniczona szybkość zachodzących reakcji chemicznych na elektrodach) - tutaj duży wpływ odgrywa polaryzacja aktywacji oraz polaryzacja stężeniowa [32-37],

2. Obszar pracy liniowej (drugi) (zawiera się zwykle w przedziale od 20% do 90% stopnia naładowania akumulatora [22, 37]) - następuje liniowa zmiana stężenia reagentów. Jest to obszar praktycznej pracy akumulatora, zwykle w tych przedziałach działają systemy BMS (ang. *Battery Management System*) zarządzające energią dostarczaną i odbieraną w czasie z akumulatora.

3. Obszar pracy nieliniowej (trzeci) - następuje gwałtowna zmiana polaryzacji stężeniowej. Akumulatory pracujące w takich stanach zwykle mają niższą żywotność, ponieważ szybciej wyeksploatowuje się materiał czynny pokrywający cele akumulatorów [37].

Na rysunku 8 zaprezentowano wpływ wartości prądu rozładowania na przyrost temperatury akumulatora. Wraz ze wzrostem prądu rozładowania wzrasta przyrost temperatury akumulatora, wynika to z wydzielania się ciepła. Jak już uprzednio wspomniano wydzielone ciepło jest sumą ciepła wydzielanego podczas polaryzacji aktywacyjnej, ciepła wydzielanego podczas spadku napięcia na oporze wewnętrznym oraz ciepła wydzielanego podczas polaryzacji stężeniowej [32-36].

### Podsumowanie i wnioski

W pracy zaprezentowano badania stanowiskowe elektrochemicznego magazynu energii. Prezentowane badania przeprowadzono w cyklu statycznym (przy stałym prądzie obciążeniowym) oraz w cyklu dynamicznym (przy impulsowym prądzie obciążeniowym). W niniejszej pracy zaprezentowano także towarzyszący pracy baterii wzrost temperatury na jej zaciskach oraz na obudowie wynikający z wydzielania się ciepła. Całkowite ciepło wydzielone jest sumą ciepła wydzielanego podczas polaryzacji aktywacyjnej, ciepła wydzielanego podczas spadku napięcia na oporze wewnętrznym oraz ciepła wydzielanego podczas polaryzacji stężeniowej.

Niezwykle istotne poznawczo było przedstawienie wpływu prądu rozładowania akumulatora na zmianę napięcia na zaciskach ogniwa. Jak zaprezentowano w niniejszej pracy wraz ze wzrostem prądu rozładowania wzrasta szybkość spadku napięcia ogniwa w początkowym obszarze jego pracy. Wynika to z ograniczonej szybkości zachodzących reakcji chemicznych, których ograniczona szybkość jest dobrze widoczna przy dynamicznym obciążeniu akumulatora (dynamicznej zmianie prądu obciążeniowego towarzyszy dynamiczna zmiana stężeń reagentów przy elektrodach, które nie nadążają z dotarciem bądź odejściem od powierzchni elektrody czego efektem jest wymiana elektronów).

Autorzy pracy będą kontynuować badania na innych typach akumulatorów m.in. litowo-jonowych oraz litowo polimerowych. Dalsze prace badawcze będą się również koncentrowały na budowie zaawansowanego modelu symulacyjnego, który łączy domenę elektrochemiczną z domeną termodynamiczną, co szczegółowo opisano w [32-36].

**Autorzy:** dr hab. inż. Jędrzej Mączak, Politechnika Warszawska, Wydział Samochodów i Maszyn Roboczych, Instytut Pojazdów, ul. Narbutta 84, 02-524 Warszawa, E-mail: [jma@mechatronika.net.pl](mailto:jma@mechatronika.net.pl), dr inż. Szymon Gontarz, Politechnika Warszawska, Wydział Samochodów i Maszyn Roboczych, Instytut Pojazdów, ul. Narbutta 84, 02-524 Warszawa, E-mail: [Szymon.Gontarz@simr.pw.edu.pl](mailto:Szymon.Gontarz@simr.pw.edu.pl), dr inż. Robert Gumiński, Politechnika Warszawska, Wydział Samochodów i Maszyn Roboczych, Instytut Pojazdów, ul. Narbutta 84, 02-524 Warszawa, E-mail: [rgumin@simr.pw.edu.pl](mailto:rgumin@simr.pw.edu.pl), mgr inż. Adrian Chmielewski, Politechnika Warszawska, Wydział Samochodów i Maszyn Roboczych, Instytut Pojazdów, ul. Narbutta 84, 02-524 Warszawa, E-mail: [a.chmielewski@mechatronika.net.pl](mailto:a.chmielewski@mechatronika.net.pl), mgr inż. Przemysław Szulim, Politechnika Warszawska, Wydział Samochodów i Maszyn Roboczych, Instytut Pojazdów, ul. Narbutta 84, 02-524 Warszawa, E-mail: [p.szulim@mechatronika.net.pl](mailto:p.szulim@mechatronika.net.pl)

## LITERATURA

- [1] Directive 2009/28/EC of the council of 23 april 2009, on the promotion of the use of energy from renewable sources and amending and subsequently repealing Directives 2001/77/EC and 2003/30/EC
- [2] Chmielewski A., Radkowski S., Prosumer on the energy market: case study, *Zeszyty Naukowe Instytutu Pojazdów - Proceedings of the Institute of Vehicles*, 102 (2015), nr.2, 23-29
- [3] Chmielewski A., Gumiński R., Radkowski S., Szulim P., Aspekty wsparcia i rozwoju mikrokogeneracji rozproszonej na terenie Polski, *Rynek Energii*, 114 (2014), nr.5, 94–101 [In Polish]
- [4] Chmielewski A., Radkowski S., Rozwój odnawialnych źródeł energii na terenie Polski – wyzwania i problemy (The development of renewable energy sources in Poland—challenges and problems). *Zeszyty Naukowe Instytutu Pojazdów*, 99 (2014), nr.3, 25–34 [In Polish]
- [5] Directive 2012/27/EU of the European Parliament and of the Council of 25 October 2012 on energy efficiency, amending Directives 2009/125/EC and 2010/30/EU and repealing Directives 2004/8/EC and 2006/32/EC
- [6] Tycho A.B. Smit, Hu J., Harmsen R., Unravelling projected energy savings in 2020 of EU Member States using decomposition analyses, *Energy Policy*, 74 (2014), 271–285
- [7] Lasocki J., Kołodziejczyk K., Matuszewska A., Laboratory-Scale Investigation of Biogas Treatment by Removal of Hydrogen Sulfide and Carbon Dioxide, *Polish Journal of Environmental Studies*, 24 (2015) n.3, 1427-1434
- [8] Bolük G., Mert M., Fossil & renewable energy consumption, GHGs (greenhouse gases) and economic growth: Evidence from a panel of EU (European Union) countries, *Energy* 74(2014), 439–446
- [9] CO EUR 13 CONCL 5 (Ramy polityki klimatyczno-energetycznej do roku 2030), Bruksela 24 października 2014
- [10] Szablowski Ł., Milewski J., Badyda K., Cooperation of energy sources in distributed generation, *Rynek Energii* 115 (2014),n.6, 120-131
- [11] Chmielewski A., Gumiński R., Radkowski S., Szulim P., Experimental research and application possibilities of microcogeneration system with Stirling engine, *Journal of Power Technologies*, 95 (Polish Energy Mix) (2015), 14–22
- [12] Chmielewski A., Lubikowski K., Radkowski S., Simulation of energy storage work and analysis of cooperation between micro combined heat and power (mCHP) systems and energy storage, *Rynek Energii*, 117 (2015), n.2, 126–133
- [13] Milewski J., Wołowicz M., Bernat R., Szablowski Ł., Lewandowski J., Variant analysis of the structure and parameters of SOFC hybrid systems, *Applied Mechanics and Materials*, 437 (2013), 306-312
- [14] Chmielewski A., Gontarz S., Gumiński R., Mączak J., Szulim P., Research on a micro cogeneration system with an automatic load-applying entity, *Challenges in Automation, Robotics and Measurement Techniques, Advances in Intelligent Systems and Computing*, DOI 10.1007/978-3-319-29357-8\_35, (2016) [In Print]
- [15] Chmielewski A., Gontarz S., Gumiński R., Mączak J., Szulim P., Research study of the micro cogeneration system with automatic loading unit, *Challenges in Automation, Robotics and Measurement Techniques, Advances in Intelligent Systems and Computing*, (2016) [In Print]
- [16] Milewski J., Szablowski Ł., Bujalski W., Identification of the objective function for optimization of a seasonal thermal energy storage system, *Archives of Thermodynamic*, 35 (2014), n.4, 69-81
- [17] Chen H., Cong N., Yang W., Tan C., Li Y., Ding Y., Progress in electrical energy storage system: A critical review, *Progress in Natural Science*, 19 (2009), 291- 312
- [18] Luo X., Wang J., Dooner M., Clarke J., Overview of current development in electrical energy storage technologies and the application potential in power system operation, *Applied Energy*, 137 (2015), 511-536
- [19] PISOITA G., Electric and Hybrid Vehicle, Elsevier, Oxford 2010.
- [20] García-Villalobos J., Zamora I., SanMartín J.I., Asensio F.J., Aperribay V., Plug-in electric vehicles in electric distribution networks: A review of smart charging approaches, *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 38(2014), 717-731
- [21] Kim J. D., Rahimi M., Future energy loads for a large-scale adoption of electric vehicles in the city of Los Angeles: Impacts on greenhouse gas (GHG) emissions, *Energy Policy*, 73 (2014), 620-630
- [22] Szumanowski A., Design of Planetary Plug-in Hybrid Powertrain and Its Control Strategy, Shenzhen, China, 2010
- [23] Tesla motors website {<http://www.teslamotors.com/incentives/UK>} accessed 12th of October 2015
- [24] Zhang L., Jabbari F., Brown T., Samuelson S., Coordinating plug-in electric vehicle charging with electric grid: Valley filling and target load following, *Journal of Power Sources*, 267 (2014), 584-597
- [25] Chmielewski A., Lubikowski K., Gumiński R., Radkowski S., Szulim P., Modeling of the properties of automotive batteries of an electrical vehicle operating in NEDC cycle, *Zeszyty Naukowe Instytutu Pojazdów - Proceedings of the Institute of Vehicles*, 95 (2013), nr.4, 21-30
- [26] Chłopek Z., Lasocki J., Badania zużycia energii przez samochód elektryczny w warunkach ruchu w mieście, *Zeszyty Naukowe Instytutu Pojazdów - Proceedings of the Institute of Vehicles*, 97 (2014), nr.1, 33-39
- [27] Chłopek Z., Lasocki J. Comparison of the environmental impact of an electric car and a car with an internal combustion engine in Polish conditions using life cycle assessment method, *Combustion Engines*, 154 (2013), n.3, 192-201
- [28] Polskie Sieci Elektroenergetyczne {<http://www.pse.pl/>} - dostęp 20.01.2016.
- [29] Chmielewski A., Radkowski S., Modelowanie procesu ładowania akumulatora elektrochemicznego pracującego w układzie kogeneracyjnym, *Zeszyty Naukowe Instytutu Pojazdów - Proceedings of the Institute of Vehicles*, 98 (2014) nr.2, 83-89 [In Polish]
- [30] Sekrecki M., Krawczyk P., Kopczyński A., Nieliniowy model symulacyjny akumulatora Li-jon do obliczeń napędów pojazdów elektrycznych, *Logistyka*, (2014), nr.6, 9425-9332
- [31] Chmielewski A., Szurgott P., Modelling and simulation of repeated charging/discharging cycles for selected Nickel-Cadmium batteries, *Journal of Kones*, 22 (2015) nr.1, 55-62
- [32] Lai Y., Du S., Ai L., Ai L., Cheng Y., Tang Y., Jia M., Insight into heat generation of lithium ion batteries based on the electrochemical-thermal model at high discharge rates, *International Journal of Hydrogen Energy*, 40 (2015), 13039-13049
- [33] Li J., Cheng Y., Jia M., Tang Y., Lin Y., Zhian Z., Y. Liu., An electrochemical-thermal model based on dynamic responses for lithium iron phosphate battery, *Journal of Power Sources*, 255 (2014), 130-143
- [34] Saito Y., Shikano M., Kobayashi H., Heat generation behavior during charging and discharging of lithium-ion batteries after long-time storage, *Journal of Power Sources*, 244 (2013), 294-299
- [35] Wang Q., Sun Q., Ping P., Zhao X., Sun J., Lin Z., Heat transfer in the dynamic cycling of lithium–titanate batteries *International Journal of Heat and Mass Transfer* 93 (2016), 896–905
- [36] Saw L.H., Ye Y., Tay A.A.O., Electro-thermal characterization of Lithium Iron Phosphate cell with equivalent circuit modeling, *Energy Conversion and Management*, 87 (2014), 367–377
- [37] Czewiński A. Akumulatory, baterie, ogniwa. Wydawnictwo WKŁ, 2012 [In Polish]