

Magazynowanie energii w magazynach elektrochemicznych w oparciu o akumulatory LiFePO₄ i LTO

Streszczenie. Porównano magazyny energii w oparciu o dotychczasowe rodzaje akumulatorów i nowej generacji akumulatory żelazowo-fosforanowe oraz tytanowe. Zakres porównania dotyczy parametrów mających istotny wpływ na czas użytkowania i koszty instalacji magazynów opartych na tych akumulatorach. Ze względu na wysokie prądy ładowania, krótkie czasy ładowania i duże ilości cykli oraz bardzo korzystny zakres pracy w ujemnych temperaturach (-50 °C), akumulatory LiFePO₄ i LTO będą coraz szerzej wykorzystywane.

Abstract. Comparison of energy storage based on existing types of batteries and new generation of iron-phosphate and titanium batteries. The scope of the comparison is on parameters that have a significant impact on the service life and installation costs of storage facilities based on these batteries. Due to high charging currents, short charging times and a large number of cycles, as well as a very favorable range of operation in sub-zero temperatures (-50 °C), LiFePO₄ and LTO batteries will be more and more widely used. (Energy storage in electrochemical storage based on LiFePO₄ and LTO batteries).

Wstęp

Artykuł dotyczy porównania właściwości eksploatacyjnych akumulatorów Li-on z LiFePO₄ oraz LTO. Porównane zostaną główne cechy tych akumulatorów do których możemy zaliczyć:

- ilość cykli,
- głębokość rozładowania,
- pojemność,
- prądy ładowania i rozładowania,
- temperatury pracy,
- końcowe napięcie ładowania i rozładowania.

Analiza rozpatrywanych parametrów prowadzi do zastanowienia się nad rozwiązaniami i typami akumulatorów, które z jednej strony są tymi najtańszymi i ogólnie dostępnymi, a z drugiej strony nad najdroższymi oraz w chwili obecnej znacznie trudniej dostępnymi, a mimo tego bardzo opłacalnymi w perspektywie długiego czasu eksploatacji. Dodatkową zaletą akumulatorów LiFePO₄ oraz LTO są wysokie prądy ładowania i rozładowania dochodzące do 6 C (C oznacza ilość amperogodzin Ah akumulatora), co oznacza 10 minutowe czasy ładowania przy 6 C dla LFP i 6 minutowe przy 10 C dla LTO.

Akumulatory

Akumulator można zbudować z dowolnej ilości ogniw. Większość baterii litowo-jonowych składa się z ogniw typu 18650 łączonych szeregowo w celu uzyskania wyższego napięcia. Przykładowo bateria do laptopa ma napięcie 10,8 V (6 ogniw, łączonych 3S2P, czyli 3 szeregowo i 2 równolegle). Bateria do samochodu Tesla P100D o napięciu ponad 400 V i mocy maksymalnej 451 kW, składa się z ponad 7000 ogniw typu 18650.

Porównanie akumulatorów Li-on

Rysunek 1 i rysunek 2 przedstawiają zależność między końcowym napięciem ładowania, a ilością cykli i pojemnością uzyskaną dla danej wartości napięcia. Zależność ta wskazuje wyraźny spadek pojemności, wraz ze spadkiem napięcia ładowania, a także istotny spadek pojemności od ilości cykli. Dla nominalnej wartości napięcia ładowania 4,2 V pojemność początkowa 100 %, zmniejsza się po 1200 cyklach do ok. 65 %. Na podstawie Tabeli nr 2 widzimy, że ogniwo o pojemności 3000mAh utrzymuje nominalną ilość cykli na poziomie 500, natomiast w przypadku napięcia 3,9 V, posiada połowę pojemności, ale ilość cykli wzrasta ośmiokrotnie do 4000. Wśród akumulatorów litowo-jonowych, z tych najbardziej rozpowszechnionych i mających znaczenie praktyczne możemy zaliczyć następujące typy akumulatorów:

- Kobaltowe LiCoO₂ – LCO,

- Magnezowe LiMn₂O₄ - LMO,
- Niklowo-magnezowe LiNiMnCoO₂ - NMC,
- Niklowo-kobaltowo-aluminiowe LiNiMnCoAlO₂ - NCA,
- Żelazowo-fosforanowe LiFePO₄ – LFP,
- Tytanowe Li₂TiO₃ -LTO.

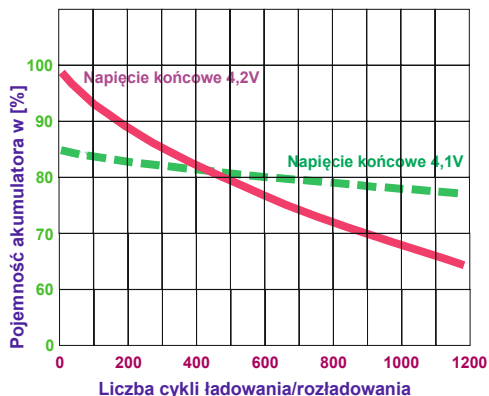
Każdy z tych typów akumulatorów charakteryzuje się innymi parametrami i właściwościami. Najważniejsze cechy z punktu widzenia inwestora i użytkownika baterii to ilość cykli, pojemność i głębokość rozładowania. Dlatego mając na uwadze te właściwości i magazyny energii w zastosowaniach innych niż motoryzacyjne, w dalszych rozważaniach będą brane pod uwagę dwa główne typy: LFP i LTO (tab. 1), które jednocześnie spełniają warunki krótkich czasów ładowania i dużych prądów rozładowania.

Tabela 1. Podstawowe parametry wybranych typów akumulatorów [1, 2].

Parametr	NCA	NMC	LFP	LTO
Gęstość energii [Wh/kg]	200-260	150-190	100-135	90-120
Gęstość energii [Wh/l]	670	300	247	200
Liczba cykli (DOD 100%) [tys.]	0,5	3	3,6	15-25
Rezystancja wewnętrzna [mΩ]	20	0,3	<15	0,5
Samorozładowanie [%/m-c]	5	5	4	3
Napięcie komórki [V]	3,6/3,7	3,6/3,7	3,2/3,3	2,2/2,3
Odcięcie napięcia podczas ładowania [V/cell]	4,2	4,2	4,2	2,8
Odcięcie napięcia podczas rozładowania [V/cell, 1C]	2,5	2,5-3,0	2,5	1,5
Prąd ładowania	0,5C	1C	1C	5-10C
Prąd rozładowania	2C	2-3C	3C	5-10C
Temp. ładowania [°C]	0-45	0-55	-20-55	-20-55
Temp. rozładowania [°C]	-20-60	-30-55	-30-55	-30-55
Stosunek ceny do LTO [%]	30	50	55	100

Parametry akumulatorów NMC i NCA przedstawione w tabeli nr 1 w porównaniu z parametrami innych odmian akumulatorów Li-on wskazują, że są zdecydowanie lepszym rozwiązaniem w zakresie mobilnych magazynów energii, jako np. zasilanie samochodów elektrycznych i hybrydowych. Zasadniczy parametr wskazujący na taki rodzaj zastosowania, to gęstość energii, mieszcząca się w zakresie 150-260 Wh/kg [1] dla akumulatorów NMC i NCA; natomiast dla akumulatorów LFP i LTO zakres ten wynosi 90-135 Wh/kg. Dodatkową zaletą akumulatorów NCA i NMC są wyższe napięcia pracy, zaś niekorzystne właściwości tych akumulatorów to zdecydowanie mniejsze

bezpieczeństwo pracy, niższe temperatury pracy i niższe prądy ładowania. Wartość napięcia ładowania ma zasadniczy wpływ na ilość cykli pracy akumulatorów, dla typowych akumulatorów np. LCO, NCA i LMO, mają typową ilość cykli ok. 500 dla napięcia ładowania 4,2 V. Przy zwiększeniu napięcia ładowania do 4,3 V, ilość cykli spada o połowę do 250, natomiast przy obniżeniu napięcia do 3,9 V, ilość cykli wzrasta 8-krotnie do 4000 (rys. 1, tab. 2) lecz pojemność akumulatorów z przykładowej pojemności 3000 mAh, spada o połowę do 1500 mAh.



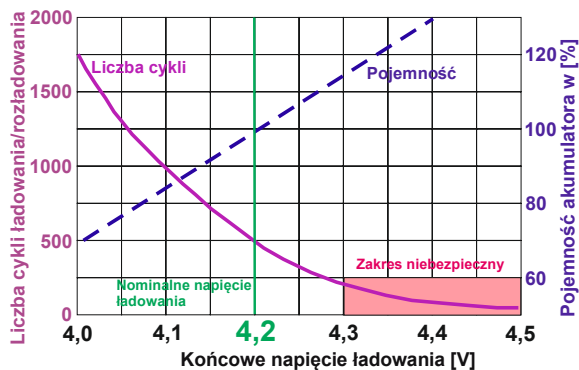
Rys. 1. Zależność między liczbą cykli, pojemnością akumulatora w stosunku do końcowego napięcia ładowania [3].

W przypadku napięcia ładowania, bardzo istotne znaczenie ma dokładność pomiaru napięcia ładowania, oczywiście z uwzględnieniem temperatury ogniwa w trakcie ładowania, ponieważ przekroczenie wartości napięcia w nawet jednym ogniwie, może spowodować wyłączenie całej gałęzi co zostało przedstawione na rysunku nr 2.

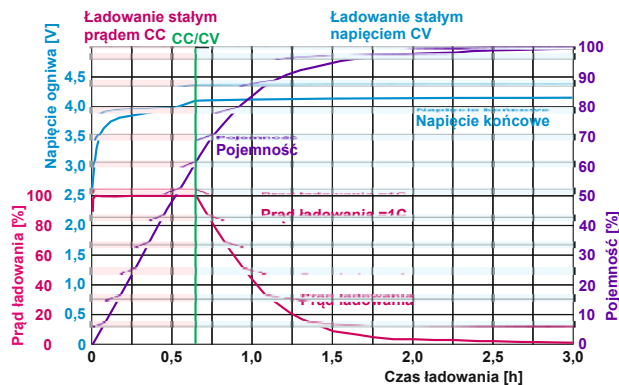
Tabela 2. Zależności wartości napięcia i ilości cykli ładowania ogniwa Li-Ion [4].

Napięcie [V]	Ilość cykli rozładowania	Pojemność po pełnym naładowaniu [mAh]
4,3	250	3300
4,2	500	3000
4,1	1000	2700
4,0	2000	2100
3,9	4000	1500

Przekroczenie zakresu ładowania 4,3 V oznacza osiągnięcie wartości niebezpiecznej i zmniejszenie liczby cykli poniżej 250 (rys nr. 2). Niekontrolowany przyrost temperatury (thermal runaway), szczególnie w przypadku akumulatorów LCO, dla których ta temperatura wynosi 150°C, może spowodować zapalenie się ogniwa lub jego wybuch. Bezpiecznymi pod tym względem są ogniwa LTO [5], które nie zawierają reaktywnego kobaltu i palnych elektrolitów.

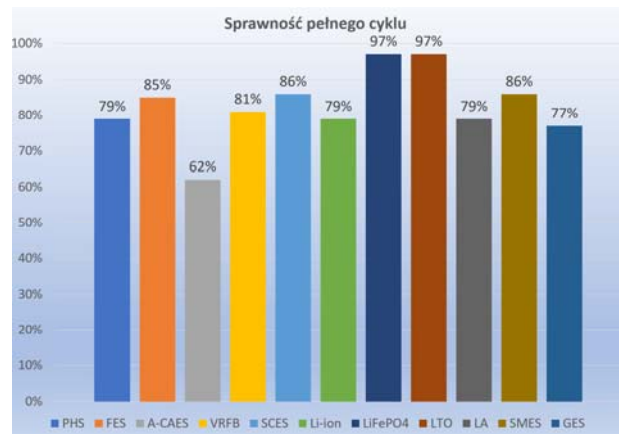


Rys. 2. Wykres przedstawiający zakres napięcia ładowania dla ilości cykli i pojemności [3].



Rys. 3. Przykładowy wykres ładowania ogniwa Li-Ion [3].

Osiągnięcie nominalnych wartości ilości cykli wymaga stosowania zależności przedstawionych na rysunku 3, w głównej mierze zależy to od ładowania prądem stałym tryb CC do napięcia 4,2 V, a po uzyskaniu tej wartości ładowanie stałym napięciem CV. Rysunek 4 wskazuje na istotną różnicę w sprawności między akumulatorami Li-on ze sprawnością na poziomie 79%, a akumulatorami LiFePO₄ i LTO na poziomie 97%. Rysunek ten nie pokazuje zależności takich jak temperatura, głębokość rozładowania, czy wielkość prądu ładowania i rozładowania, które również mają wpływ na osiągane parametry tych akumulatorów.



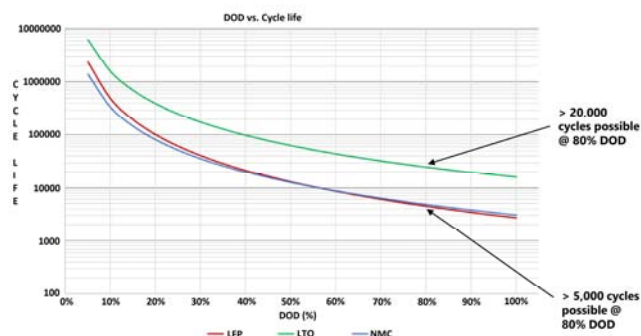
Rys. 4. Porównanie sprawności pełnego cyklu dla poszczególnych magazynów energii [opracowanie własne]

Atrakcyjność akumulatorów LTO i LiFePO₄ zależy głównie od:

- Bardzo dużej ilości cykli do 30 000,
- Dużej głębokości rozładowania dla DOD do 100%,
- Szybkości ładowania i rozładowania do 10 C,
- Szerokiego zakresu temperatur pracy od -30 do 55 °C,
- Niskich kosztów inwestycyjnych po uwzględnieniu ilości cykli i czasu eksploatacji ok. 25 lat [6].

Dane przedstawione w tabeli 2 oraz na rysunku 5, wskazują na bardzo wysoką korelację między głębokością rozładowania, a ilością cykli. Najbardziej popularne akumulatory Li-on, a zarazem najtańsze osiągają ok. 500 cykli przy głębokości rozładowania 80%, natomiast akumulatory które możemy zaliczyć do grupy o wysokiej ilości cykli (LTO, LFP i NMC), realną wielkością jest 5 000 do 25 000 cykli w zależności od typu akumulatora. W tym wypadku zdecydowanie korzystniejszym rozwiązaniem jest zastosowanie akumulatora LTO, ponieważ pomimo najwyższej ceny, jego osiągi w zakresie głębokiego rozładowania do nawet 100%, a ilość cykli powyżej 25 000, niwelują wyższy koszt samych akumulatorów. Porównanie ilości cykli wypada zdecydowanie na korzyść akumulatorów

LTO w stosunku do LFP i NMC, ponieważ ta ilość cykli jest pięciokrotnie wyższa, a w przypadku akumulatorów Li-on nawet pięćdziesięciokrotnie.



Rys. 5. Ilość cykli w zależności od głębokości rozładowania dla akumulatorów LTO, NMC i LFP [7].

Jeśli przyjąć cenę akumulatorów LTO za 100 % (tab. 1), to akumulatory LFP i NMC są o około połowę tańsze niż LTO, natomiast akumulatory NCA kosztują już tylko ok. 30 %. Akumulatory NCA pomimo, że kosztują 30 % w stosunku do kosztów akumulatorów LTO, to ilość cykli mają 50 razy mniejszą i tym samym akumulatory LTO pomimo że najdroższe to w perspektywie długiego użytkowania wypadają najkorzystniej. Dodatkowymi zaletami akumulatorów LTO, są wysokie prądy ładowania i rozładowania dochodzące do 10 C oraz szerszy zakres temperaturowy pracy i co z tego wynika, krótki czas ładowania ok. 6 minut. Wadami natomiast są niższe gęstości energii i niższe napięcia jednostkowe.

Tabela 3. Parametry akumulatorów LTO [8, 9, 10, 11, 12, 13].

Parametry akumulatorów LTO	Yinlong	Leclanche	ELB	Toshiba
Napięcie nominalne [V]	2,3	2,2	2,3	2,3
Pojemność [Ah]	45	34	40	45
Gęstość energii [Wh/l]	144	66,7		202
Gęstość energii [Wh/kg]	80	42,2	74,2	82,8
Wewnętrzna rezystancja [mΩ]	<0,7		1	
Maksymalny prąd ładowania [A]	240	204	240	160
Maksymalny prąd rozładowywania [A]	240	204	240	160
Prąd rozładowania 10s [A]	400		400	350
Zakres temperatur pracy [°C]	-50 +65	-20 +55	-40 +60	-30 +45
Ilość cykli przy DOD 100% i prądzie ład./rozład. 1C, [25°C], x1000	>30	15	20	20
Ilość cykli przy DOD 100% i prądzie ład./rozład. 1C, [55°C]	>10 000			
Wymiary [mm]	66x161		66x161	116x22x106
Waga [kg]	1,25	1,692	1,21	0,550

Przykładowymi producentami akumulatorów LTO [14] są: Yinlong, EV-Power, Microvast, Proterra, Toshiba,

Leclanche, Altairnano, ELB, Seiko, AnHui TianKang YinTong, ShenZhen TianJiao.

Największym ograniczeniem jest stosunkowo niskie napięcie ogniwa dla akumulatorów LTO (tab. 3), które nominalnie wynosi 2,3 V. Drugim poważnym ograniczeniem szczególnie w zakresie zastosowań mobilnych, to gęstość energii, która wynosi ok. 80- 83,8 Wh/kg [15], natomiast nie jest to takim poważnym ograniczeniem w zakresie zastosowań stacjonarnych. Akumulatory LTO korzystne parametry posiadają w zakresie ilości cykli, które większość producentów podaje 20 000, ale są firmy które podają nawet powyżej 30 000 (firma Yinlong [10, 11]) i dla DOD 100 %, a także bardzo korzystne parametry temperaturowe, dla temperatur ujemnych -50 °C. Mając na uwadze ilość cykli, należy to szczególnie podkreślić, że dla akumulatorów LFP i LTO, zmniejszenie głębokości rozładowania zdecydowanie zwiększa ilość cykli (rys. 5) dla DOD 40 % i akumulatorów LTO wynosi ok. 100 000 cykli. Bardzo korzystną właściwością są bardzo wysokie prądy ładowania i rozładowania dochodzące do 10 C, co pozwala na naładowanie takiego akumulatora w czasie 6 minut.

Tabela 4. Parametry akumulatorów LFP [16, 17, 18, 19].

Parametry akumulatorów LFP	IFPE 100	CATL 100	WB-LYP100 AHAB	EVE LF105
Napięcie nominalne [V]	3,2	3,2	3,2	3,2
Pojemność [Ah]	100	100	100	105
Gęstość energii [Wh/kg]	155	190		
Wewnętrzna rezystancja [mΩ]	<1,6	0,39	0,45	0,4
Maksymalny prąd ładowania [A]	100	100	300	105
Maksymalny prąd rozładowywania [A]	100	100	300	105
Prąd rozładowania impuls [A]	200		2000	
Zakres temperatur pracy [°C]	-20~65	-30~60	-40~85	-35~65
Ilość cykli przy DOD 80% i prądzie ład./rozład. 1C, [25°C]	>4000		3000	3000
Wymiary [mm]	216x130 x36	200x172 x33	218x179 x62	200x130 x37
Waga [kg]	2	2,27	3,5	2

Rozwój produkcji ogniw LFP jest już znaczny i wiele firm je produkuje, przykładem jest chociażby firma EVLITHIUM [20], która oferuje ogniwa LFP następujących firm: Winston Battery, Thundersky Battery [14], CALB Battery, CALB Cells, Sinopoly Battery, CATL Battery, CATL Battery Cell, Forklift Lithium Battery, Fortune LiFePO4 Battery. Ogniwa LFP ładowane i rozładowywane są prądami od 100 A do 300 A, dlatego stosowane są balansery do 10 A [21], dla których zakres 10 A, może i tak okazać się zbyt mały. Szczególnie jest to bardzo ważne przy maksymalnych prądach, ponieważ nawet niewielkie różnice w parametrach poszczególnych ogniw, wymagają znacznych korekt regulacyjnych z zakresu działania balanserów. Poziom regulacji balanserów jest zazwyczaj ograniczony do około kilku amperów co jest jeszcze bardziej istotne w przypadku akumulatorów LTO, gdzie prądy ładowania i rozładowania są jeszcze większe (tab. 3).

Wnioski

W zastosowaniach w których nie jest wymagany długi okres pracy i duża ilość cykli zapewne przez najbliższe lata będą wykorzystywane „zwykłe” akumulatory Li-on w różnych wersjach w zależności od potrzeb. Dla zastosowań gdzie jest wymagana duża gęstość energii i duża ilość cykli, będą miały zastosowanie akumulatory NMC i NCA, głównie ze względu na dużą gęstość energii i znacznie wyższą ilość cykli z wykorzystaniem akumulatorów NMC. Akumulatory z grupy tych o wysokiej ilości cykli głównie LFP i LTO, będą wprowadzane do zastosowań stacjonarnych tam, gdzie głównym ograniczeniem nie jest brak miejsca, a wymagana jest duża ilość cykli. Dla akumulatorów LTO czas życia przy trzykrotnym cyklu dziennym i DOD 80 % wynosi ponad 23 lata (25 000 cykli podzielone przez 365 dni x 3 cykle), co jest wynikiem bardzo zadawalającym. W tym okresie akumulatory Li-on, musiałyby być wymienione wielokrotnie. W przypadku mniejszej głębokości rozładowania (rys. 5), ilość dziennych cykli można znacznie zwiększyć lub wydłużyć czas użytkowania (przy 40 % DOD, odpowiada 100 000 cykli dla akumulatorów LTO). Bardzo ważnym aspektem w przypadku akumulatorów o prądach ładowania 10 C (czas ładowania 6 min.), jest zastosowanie ładowarek o wysokiej sprawności i precyzyjnie kontrolowanych wartościach parametrów ładowania. W przypadku stosowania dużych prądów ładowania 10 C lub więcej [22, 23], bardzo mocno wzrastają wymagania w stosunku do balanserów, dla których korygowany prąd niejednokrotnie będzie przekraczał poziom 10 A [15], a przy dużej ilości ogniw połączonych w szereg (10 lub więcej), może to powodować wyłączenia takich gałęzi. W takich przypadkach (przy dużych prądach ładowania), balansery o działaniu liniowym, będą pogarszały sprawność układów ładowania i będą źródłem nadmiernych ilości ciepła, w związku z tym korzystniejszym rozwiązaniem będzie zastosowanie balanserów o działaniu dyskretnym [24]. Wykorzystanie balanserów o działaniu impulsowym, spowoduje rozbudowę układów elektronicznych w stosunku do liniowych typów balanserów, co może spowodować wzrost kosztów. Praca układów ładowania i rozładowania z tak dużymi prądami, znacząco zwiększy również wymagania w stosunku do dokładności kontroli napięć i warunków temperaturowych w których zachodzi proces ładowania i rozładowania akumulatora. Te uwarunkowania wymuszą zapewne powstanie innego typu konfiguracji i algorytmów działania systemów ładowania tego typu wysokoprądowych akumulatorów. Ze względu jednak na wysokie prądy ładowania, krótkie czasy ładowania i duże ilości cykli oraz bardzo korzystny zakres pracy w ujemnych temperaturach (-50 °C), będą coraz szerzej wykorzystywane. Nawet występujące ograniczenia spowodowane mniejszą gęstością magazynowanej energii, nie będą ograniczeniem ze względu na silne zapotrzebowanie rynku na tego typu akumulatory. Dalszy rozwój rynku motoryzacyjnego w zakresie samochodów elektrycznych, spowoduje zapewne w najbliższych latach zwiększenie gęstości magazynowanej energii lub powstanie nowych odmian akumulatorów na bazie LFP i LTO.

Autorzy: mgr inż. Patryk Gałuszkiewicz, Politechnika Częstochowska, Wydział Elektryczny, Katedra Elektroenergetyki, Al. Armii Krajowej 17, 42-200 Częstochowa, E-mail: patryk.galuszkiewicz@pcz.pl; mgr inż. Zbigniew Gałuszkiewicz, MEGATECH, ul. Powstańców Śląskich 4, 42-660 Kalety, E-mail: megatech@megatech.org.pl.

LITERATURA

- [1] BU-216: Summary Table of Lithium-based Batteries, <https://batteryuniversity.com/article/bu-216-summary-table-of-lithium-based-batteries>
- [2] Koniak M., A Czerepicki A., Selection of the battery pack parameters for an electric vehicle based on performance requirements, 2017 IOP Conf. Ser.: Mater. Sci. Eng. 211 012005
- [3] Górecki P., Akumulatory litowe, Elektronika Praktyczna 3/2015
- [4] Kompendium wiedzy o akumulatorach Li-Ion – 18650 i nie tylko – update 08.2023, <https://diodek.pl/kompendium-wiedzy-o-akumulatorach-li-ion-18650/>
- [5] Katalog firmy TOSHIBA Industrial Lithium-ion Battery, Toshiba Rechargeable Battery SCiB, https://www.tipsh.toshiba.com.cn/en/file/Catalogue-SCiB_en.pdf
- [6] Karta katalogowa Altairnano 24V 70Ah Battery Module, <https://altairnano.com/products/battery-module/>
- [7] Mabrey M., Advantages & Marine Applications of Various Lithium Ion Battery Chemistries, Spear Power Systems, MARAD META Battery Propulsion Conference, December 15, 2016
- [8] Katalog firmy Leclanche, High energy batteries for mobility, Power M2 Modules (LTO, 34Ah), <https://www.leclanche.com/wp-content/uploads/2020/10/LECLANCHE-M2-module-LT34-LTO-34Ah.pdf>
- [9] Katalog firmy Tianshi, SCiB Toshiba Prismatic 2.4V 20Ah LTO Cells, <https://tianshibattery.com/products/scib-toshiba-prismatic-2-4v-20ah-lto-cells>
- [10] Katalog firmy Osn power, LTO Lithium Titanate Battery 66160D 2.3V 45Ah, https://www.osnpower.com/lto-lithium-titanate-battery-66160d-2-3v-45ah_p10.html
- [11] Osn power Energy Limited, <https://www.osnpower.com/uploadfile/downloads/OSN%20POWER%20ENERGY-LTO%20catalog.pdf>
- [12] Leclanche, LTO Technology, LT34 Power Cell 34Ah, Article number 936901, <https://www.leclanche.com/wp-content/uploads/2020/10/LECLANCHE-CELL-ITO-25.2.2021-1.pdf>
- [13] Karta katalogowa ELB 40Ah LTO Battery, <https://www.ecolithiumbattery.com/product/40ah-lto-battery/>
- [14] MarketWatch, raport "Lithium Titanate (LTO) Batteries Market" Top Companies Forecast 2023-2030, <https://www.marketwatch.com/press-release/latest-report-on-lithium-titanate-lto-batteries-market-top-companies-forecast-2023-2030-2023-05-26>
- [15] Karta katalogowa Altairnano 70 Amp Hour Cell, <https://altairnano.com/products/70-amp-hour-cell/>
- [16] Karta katalogowa IFPE100I 3.2 v 100ah Prismatic LiFePO4 Battery Cell, <https://www.evliithium.com/LiFePO4-Battery/ifpe100i-100ah-lifepo4-battery-cell.html>
- [17] Karta katalogowa 3.2V 100Ah CATL LiFePO4 Battery cell with screws for easy connection, <https://www.evliithium.com/catl-battery-cell/1004.html>
- [18] Karta katalogowa Winston Battery, <https://www.evliithium.com/winston-battery.html>
- [19] Karta katalogowa EVE Lifepo4 Bateria 3.2v 12v 24v 48v 100Ah 105Ah Komórka LF105 105Ah, <https://polish.lithium-solarbattery.com/sale-33642543-grade-a-eve-lifepo4-battery-3-2v-12v-24v-48v-100ah-105ah-cell-lf105-105ah.html>
- [20] Karta katalogowa Thunder Sky Winston Battery, <https://www.evliithium.com/thunder-sky-winston-battery/>
- [21] Karta katalogowa Battery Balance Module for 4S lithium battery, EVL-BBM-4S, <https://www.evliithium.com/battery-balancer.html>
- [22] Karta katalogowa 55AH LTO Lithium Titanate Battery, <https://www.evliithium.com/Lithium-Titanate-Battery-LTO/520.html>
- [23] Łebkowski A., Temperature, Overcharge and Short-Circuit Studies of Batteries used in Electric Vehicles, Przegląd Elektrotechniczny, ISSN 0033-2097, R. 93 NR 5/2017 67
- [24] Maćków P., Guzdek P., Biskupski J., Grzesiak W., Innowacyjne magazyny energii wyposażone w funkcję monitorowania i nadzoru. Wybrane zagadnienia, Przegląd Elektrotechniczny, ISSN 0033-2097, R. 98 NR 9/2022