

Aneta KALBARCZYK<sup>1</sup>

Aldona ZALEWSKA<sup>2</sup>

Michał MARZANTOWICZ<sup>3</sup>

Maciej NOWAGIEL<sup>4</sup>

Michał KALBARCZYK<sup>5</sup>

## **Praktyczne aspekty magazynowania energii**

### **Wprowadzenie**

Jednym z kluczowych problemów i wyzwań współczesnej cywilizacji jest efekt cieplarniany i bezpieczeństwo energetyczne (strategia Unii Europejskiej), konkurencyjność polskiej i europejskiej gospodarki oraz zmniejszenie zanieczyszczenia powietrza. Rozwój nowoczesnych baterii jonowo-litowych i poprawa zdolności magazynowania energii w bateriach ma strategiczne znaczenie dla Europy. Wojna na Ukrainie rozpoczęta w lutym 2022 r. zwróciła uwagę Europy na kwestię dywersyfikacji źródeł energii oraz konieczność inwestowania w odnawialne źródła energii. Rozpoczęto intensywne prace nad systemem energetyki rozproszonej, która nie może istnieć bez rozproszonego magazynowania energii.

Kluczem do rozwoju rynku magazynów energii jest opracowanie rozwiązań w zakresie nowoczesnych elektrochemicznych metod magazynowania energii, ze szczególnym uwzględnieniem poniższych parametrów: wydajność, przyjazność dla środowiska, koszty, bezpieczeństwo. Celem niniejszego zozdziału jest zaprezentowanie strategii projektowania nowego magazynu energii połączonego z instalacją fotowoltaiczną na wybranym modelo-

---

<sup>1</sup> Politechnika Warszawska, Warszawa;

ORCID iD: 0000-0003-1116-6815; e-mail: aneta.kalbarczyk.dokt@pw.edu.pl

<sup>2</sup> Politechnika Warszawska, Warszawa;

ORCID iD: 0000-0002-9326-9505; e-mail: aldonazalewska@pw.edu.pl

<sup>3</sup> Politechnika Warszawska, Warszawa;

ORCID iD: 0000-0003-2427-5263; e-mail: michal.marzantowicz@pw.edu.pl

<sup>4</sup> Politechnika Warszawska, Warszawa;

ORCID iD: 0000-0003-3223-2087; e-mail: maciej.nowagiel.dokt@pw.edu.pl

<sup>5</sup> Solid Energy Group Sp. z o.o., EŁk

wym domu, opartego na bateriach jonowo-litowych na podstawie zidentyfikowanych wyzwań technologicznych.

## 1. Baterie jonowo-litowe – zasada działania

Od odkrycia pierwszej baterii przez A. Voltę w 1800 roku rozwój technologii baterii przeszedł ogromną rewolucję. Poprzez pierwszy akumulator ołowiowy (1859) przez niebezpieczny dla środowiska akumulator niklowo-kadmowy (1899) do bezpieczniejszych akumulatorów jonowo-litowych stosowanych od lat 90. XX wieku (Gosiewska 2013).

Baterie jonowo-litowe są jednym z najpopularniejszych systemów baterii (Sälzer i in. 2020). Stosowane są w telefonach komórkowych, laptopach i niewielkich urządzeniach elektronicznych, w takim zakresie, że trudno wyobrazić sobie bez nich współczesną elektronikę.

Zaletami baterii litowo-jonowych jest ich:

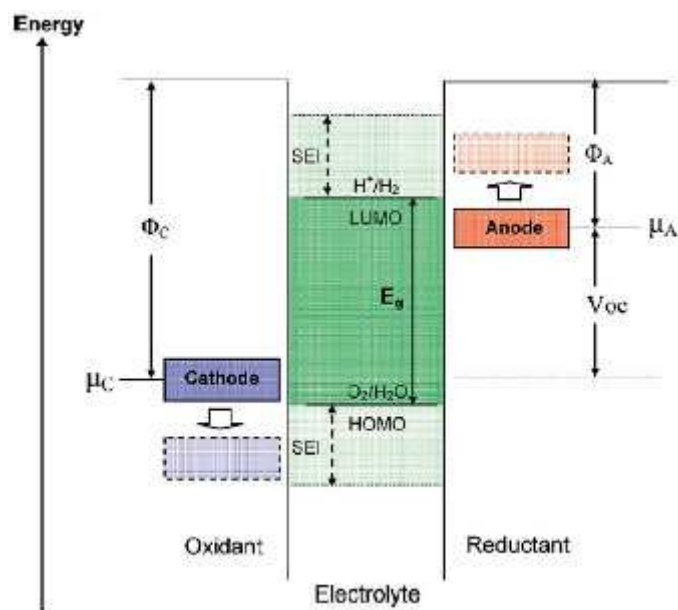
- duża żywotność cykliczna,
- brak efektu pamięci,
- duża gęstość energii,
- wysokie napięcie pracy,
- wysoka wydajność,
- odporność na dużą liczbę cykli ładowania oraz rozładowania.

Ogniwa Li-ion składają się z czterech głównych elementów:

- elektrody ujemnej (anody),
- elektrody dodatniej (katody),
- separatora – porowatej folii (membrana poliolefinowa) zabezpieczającej przed bezpośrednim kontaktem elektrod (zwarciem), jednocześnie umożliwiającej transfer jonów litu,
- elektrolitu – najczęściej mieszanina organicznych rozpuszczalników (węgieln propylenowy, węgieln etylenowy, glikole, estry organiczne), w której rozpuszczone są złożone chemicznie sole litowe ( $\text{LiPF}_6$ ,  $\text{LiBF}_4$ ,  $\text{LiClO}_4$ ,  $\text{LiCF}_3\text{SO}_3$ ). Dzięki elektrolitowi jony litu są w stanie przemieszczać się między elektrodami. Ze względu na lotność organicznych węglianów, elektrolity te są palne, co powoduje poważne problemy z bezpieczeństwem.

Niezwykle ważnym parametrem ogniwa jest okno elektrochemiczne elektrolitu, które liczbowo jest równe różnicy pomiędzy potencjałem katody i anody. Stabilną pracę ogniwa możemy uzyskać jedynie w przypadku odpowiedniego wzajemnego położenia poziomów energetycznych anody, katody oraz elektrolitu (Michalski b.d.).

Praca ogniwa, możliwa dzięki różnicy potencjałów między katodą i anodą, prowadzi do zamiany energii chemicznej w elektryczną. Oknem elektrochemicznym  $E_g$ , w którym ogniwo będzie pracować stabilnie, jest różnica między najniższym energetycznie nieobsadzonym orbitalem molekularnym elektrolitu LUMO a najwyższym energetycznie obsadzonym HOMO. Okno może zostać poszerzone poprzez wytworzenie SEI, czyli warstwy między katodą lub anodą a elektrolitem. Naturalna warstwa SEI stanowi produkty reakcji między



Rys. 1. Poziomy energetyczne elektrod i elektrolitu,  $\mu_A$  i  $\mu_C$  oraz  $\Phi_A$  i  $\Phi_C$  – potencjały elektrochemiczne i prace wyjścia anody i katody (Michalski b.d.).

Fig. 1. Energy levels of electrodes and electrolyte,  $\mu_A$  and  $\mu_C$  and  $\Phi_A$  and  $\Phi_C$  – electrochemical potentials and anode and cathode exit works

elektrolitem a katodą bądź anodą, co prowadzi do narastania dendrytów obniżenia sprawności i wydajności oraz problemów z bezpieczeństwem.

Dla bezpiecznej pracy ogniwa wymagane jest spełnienie zależności:

$$e_{voc} = \mu_A - \mu_C \leq E_g$$

### 1.1. Rozwiązania w zakresie katod

Katoda to elektroda dodatnia – zachodzą na niej (podczas rozładowywania ogniwa) procesy redukcji, co wiąże się z przyjęciem elektronów z zewnętrznego obwodu oraz wejściem wionów litu. Standardowo używanymi materiałami katodowymi są związki o właściwościach utleniających (akceptory elektronowe), takie jak tlenek litowo-kobaltowy  $\text{LiCoO}_2$ , czy fosforan litowo-żelazowy  $\text{LiFePO}_4$  (Łuka 2011). Aby spełniać swoje zadanie, materiał katodowy musi posiadać kilka cech:

1. Zawierać jon łatwo ulegający utlenieniu/redukcji, np. metalu przejściowego.
2. Reagować z litem w sposób odwracalny.
3. Reakcja z litem winna zachodzić z wysoką entalpią swobodną, oraz szybko i wydajnie (przynajmniej jeden atom litu na jeden atom metalu katody). Spełnienie tych warunków

proceeds to the achievement of fires with good parameters of capacity, power and energy. Potential energy for the reaction with lithium should be about 4 V.

4. Material should be a good electronic conductor, which allows for easy electron transfer in electrochemical processes and enables the reaction to occur on the entire cathode surface, not only in places with good conductivity (e.g. doped graphite), and a good ionic conductor, which enables the uptake of ions from the electrolyte.

5. Material should be stable, i.e. not undergo decomposition during subsequent charging/discharging cycles and be safe and non-toxic to the environment. In Figure 4, examples of known cathode materials and their parameters are shown.

6. Possessing the highest possible voltage (expressed relative to the  $\text{Li/Li}^+$  electrode) while remaining outside the electrolyte window (Preparation of Graphene..., FINAL REPORT, 2020).

Intercalation is a process of inserting atoms or molecules into the structure of other compounds without significant changes in their structure. These compounds must have crystallographic sites of appropriate size, allowing for free diffusion and diffusion of particles, i.e. fast diffusion channels. Intercalation is one of the most important processes occurring in lithium-ion batteries.

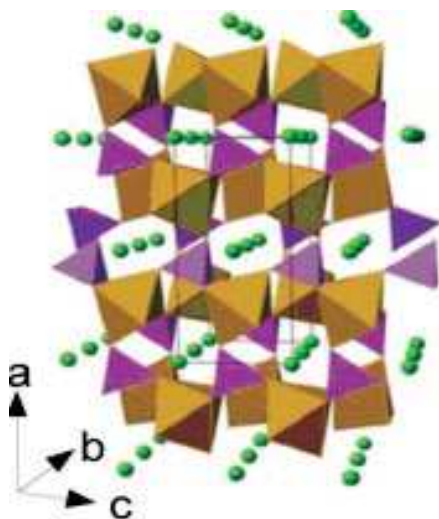
The cathode of lithium-iron phosphate  $\text{LiFePO}_4$ , commercialized in 1996, is a very popular cathode material due to its low cost, high capacity (theoretical 170 mAh/g), high operating voltage (3.45 V). It shows high energy and very good stability. It is one of the safest cathodes. However, it shows slow diffusion of lithium ions ( $10^{-14}$  to  $10^{-16}$   $\text{cm}^2 \text{ s}^{-1}$ ) due to the one-dimensional diffusion channels of lithium ions along the [010] direction and low electronic conductivity (Preparation of Graphene..., FINAL REPORT, 2020; Baster 2012). It is difficult to charge and discharge quickly or pulse (above 1 C). A major advantage of the  $\text{LiFePO}_4$  cathode is the practical absence of degradation/capacity loss with subsequent charging/discharging cycles according to Figure 3. It shows low electronic conductivity. To improve the electrochemical properties of the cathode, methods such as nanosizing to nanoscale  $\text{LiFePO}_4$  or coating the cathode (Lung-Hao et al. 2013). The materials used are mainly carbon-coated cathodes, i.e. graphite.

The cathode of  $\text{LiFePO}_4$  has a very interesting quasi-one-dimensional structure – formed by parallel chains of atoms loosely connected to each other, as shown in Figure 2.

## 1.2. Rozwiązania w zakresie materiałów anodowych

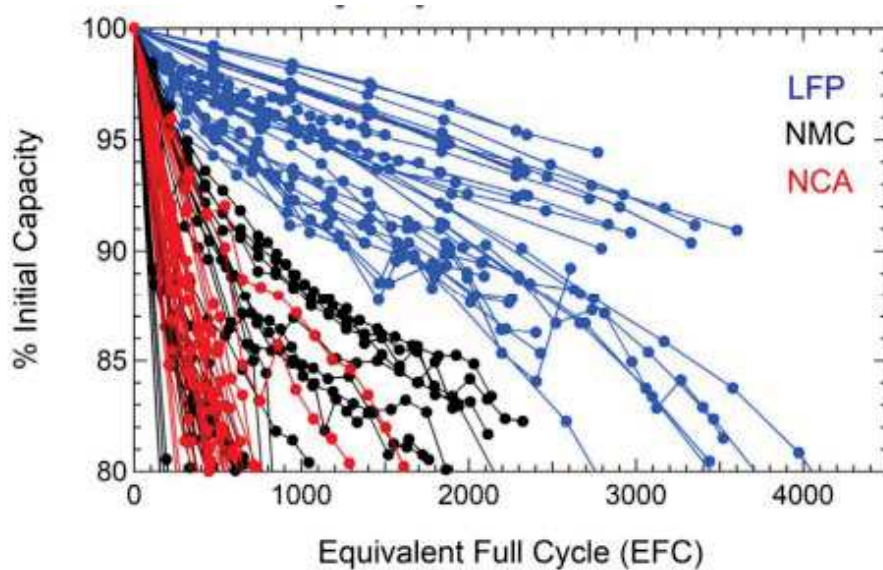
Anode is the negative electrode of the battery. It is distinguished by anodes containing lithium or other metals, which do not have in their structure. Four main types of compounds that can serve as the negative electrode are:

- carbonaceous materials e.g. graphite,
- alloys and composites of Sn and Si,
- $\text{Li}_4\text{Ti}_5\text{O}_{12}$  (LTO, lithium titanate),
- metal oxides.



Rys. 2. Struktura  $\text{LiFePO}_4$  (Julien i in. 2014)

Fig. 2.  $\text{LiFePO}_4$  structure



Rys. 3. Porównanie parametrów najbardziej znanych katod (Preger i in. 2020)

Fig. 3. Comparison of parameters of the most well-known cathodes

Materiały węglowe wykazują różne właściwości elektrochemiczne ze względu na ich strukturę krystalograficzną. W komercyjnych ogniwach litowo-jonowych stosuje się dwa typy materiałów węglowych – grafity naturalne bądź grafity pirolityczne. Krystaliczna struktura

grafitu to płaskie warstwy atomów węgla połączone ze sobą w strukturę heksagonalną. Wiele miejsca w literaturze poświęca się anodom z grafenu oraz nanorurkom węglowym, które jako anody przyczyniają się do zwiększenia wydajności ogniwa.

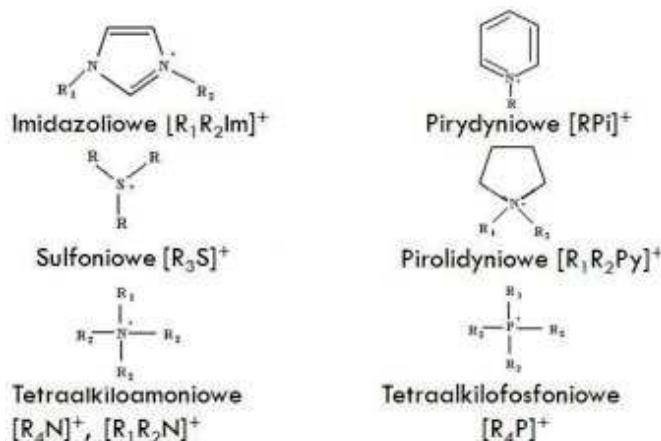
Stopy metali posiadają zdolność do gromadzenia jonów litu co przekłada się na dużą moc oraz gęstość energii. Jednak podczas cyklicznej pracy ogniwa następuje pękanie i kruszenie metali. Odpowiedzią na te problemy jest zastosowanie stopów dwóch metali

Litowany tlenek tytanu  $\text{Li}_4\text{Ti}_5\text{O}_{12}$  stanowi alternatywę dla anod węglowych. Materiał ten charakteryzuje się doskonałą stabilnością, niskim kosztem, dużą cyklicznością pracy. Stosowanie tej katody daje możliwość uniknięcia powstawania SEI ze względu na fakt, iż LTO posiada potencjał znacznie poniżej potencjału redukcji większości znanych organicznych elektrolitów (Rudnicka 2016).

### 1.3. Rozwiązania w zakresie stosowanych elektrolitów

Elektrolit to medium, w którym zachodzi transfer jonów między katodą i anodą. Idealny elektrolit powinien charakteryzować się wysoką przewodnością jonową oraz zerową elektronową. Ważne, aby elektrolit zachowywał parametry pracy w zakresach temperatury, w których pracują ogniwa litowe, tj., od  $-20$  do około  $60^\circ\text{C}$ . Elektrolit musi być również odporny na efekt starzenia tj. wykazywać stabilność termiczną oraz nie wykazywać oddziaływań z elektrodami. Ponadto elektrolit musi wykazywać wysoką wartość stałej dielektrycznej, niską lepkość oraz szerokie okno elektrochemiczne. Obecnie głównymi elektrolitami są związki organiczne (węglan propylenowy, węglan etylenowy, glikole, estry organiczne), w której rozpuszczone są złożone chemicznie sole litowe ( $\text{LiPF}_6$ ,  $\text{LiBF}_4$ ,  $\text{LiClO}_4$ ,  $\text{LiCF}_3\text{SO}_3$ ), jednak poważną ich wadą jest łatwopalność i lotność.

Ciekłe elektrolity, wykorzystywane powszechnie w akumulatorach litowo-jonowych, zapewniają wysokie wartości przewodnictwa jonowego, jednak ich lotne opary zagrażają gwałtownym wybuchem baterii. Kolejnym ważnym problemem w bateriach jonowo-litowych jest rozpuszczenie soli litowych w łatwopalnych i lotnych rozpuszczalnikach organicznych w elektrolitach, stanowi to problem ze względu na ograniczenie bezpieczeństwa ich pracy. Jest niezwykle istotne żeby poszukiwać nowe elektrolity do zastosowań w bateriach. Cieczami o niezwykłych możliwościach są ciecz jonowe, które są nielotne i niepalne i mogą stanowić rolę separatorów i nośników ładunku elektrycznego w bateriach litowych i jonowo-litowych. Podstawowymi zaletami cieczy jonowych jest wysoka stabilność termiczna, niska prężność par, odporność na zapłon, wysoka polarność, zachowanie stanu ciekłego w szerokim zakresie temperatur. Przewodnictwo jonowe takich elektrolitów sięga do  $10^{-2} \text{ S/cm}^{-1}$ . Ciecze jonowe są to sole, zbudowane z jonów. Te związki jonowe są zbudowane z dużego heterocyklicznego, organicznego kationu i anionu o charakterze zarówno organicznym, jak i nieorganicznym. Ładunek jest zlokalizowany na atomie azotu, siarki lub fosforu. Najczęściej stosowanymi w bateriach jonowo-litowych cieczami jonowymi są związki zbudowane z kationów imidazoliowych, pirydynowych, piroolidynowych, sulfonowych i czwartorzędowych soli amoniowych i fosfonowych przedstawione na rysunku 4.



Rys. 4. Podział cieczy jonowych ze względu na rodzaj kationu (Gosiewska 2013)

Fig. 4. Division of ionic liquids by type of cation

Możliwość różnych kombinacji cieczy jonowych szacuje się na  $10^6$ . Modyfikacje kationu i anionu wpływają na zmianę właściwości cieczy w tym parametrów takich jak gęstość, lepkość czy temperatura topnienia.

Dużą popularnością w ostatnich dziesięcioleciach cieszą się również elektrolity polimerowe, które ze względu na budowę można podzielić na trzy grupy:

- żelowe elektrolity polimerowe,
- porowate elektrolity polimerowe,
- stałe elektrolity polimerowe.

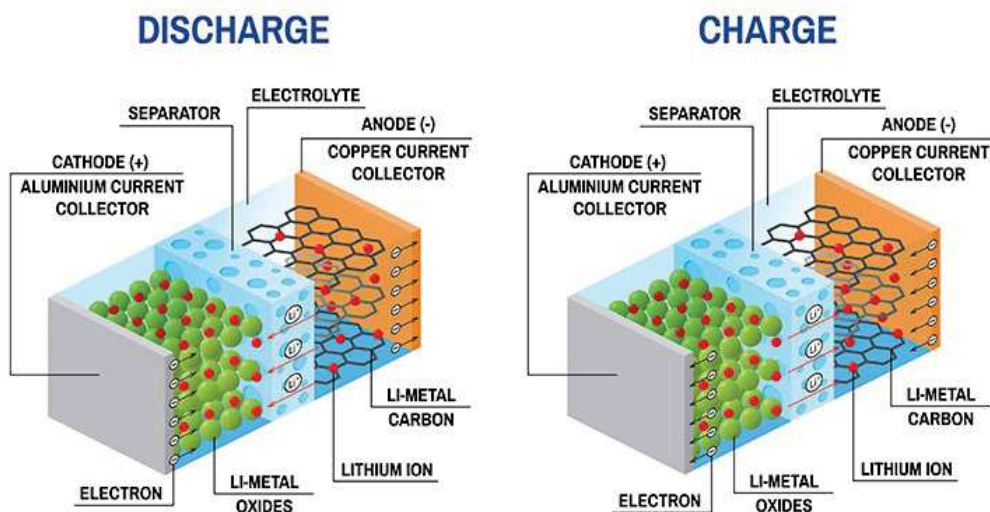
Baterią (akumulatorem) nazywa się układ połączonych ogniw (lub pojedyncze ogniwo), posiadający kontakty służące do odbioru energii elektrycznej, które w wyniku reakcji elektrochemicznej zamieniają energię chemiczną w elektryczną. W bateriach jonowo-litowych zachodzi proces interkalacji polegający na odwracalnym wbudowaniu w strukturę ciała stałego jonów  $\text{Li}^+$ . Jony litu przemieszczają się z katody do anody poprzez elektrolit podczas ładowania. Na elektrodzie dodatniej (katodzie) zachodzi proces redukcji natomiast na elektrodzie ujemnej (anodzie) proces utleniania. Schemat działania baterii jonowo-litowej przedstawiony jest na rysunku 5.

## 2. Rynek magazynów energii

Popularyzacja samochodów elektrycznych spowodowała gwałtowny wzrost wolumenu produkcji akumulatorów litowo-jonowych, co przełożyło się na dynamiczny spadek kosztów produkcji i oferowanych cen. Obserwuje się również wzrost zainteresowania domowymi magazynami energii ze względu na rosnące ceny energii elektrycznej, obawy o bezpieczeństwo energetyczne oraz chęć bycia niezależnym. Najczęściej magazyny energii instalowane są razem z instalacją fotowoltaiczną.



## LITHIUM-ION BATTERY



Rys. 5. Zasada działania ogniwa jonowo-litowego (<https://www.istockphoto.com>)

Fig. 5. The principle of operation of the lithium-ion cell

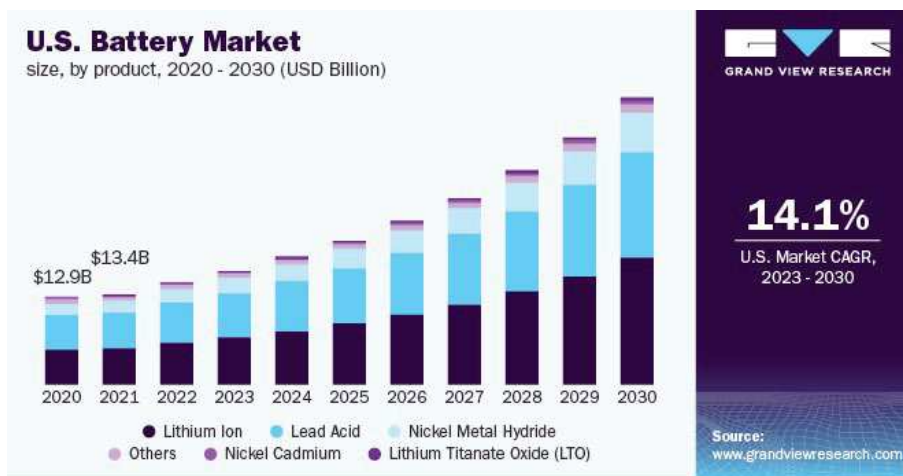
Przewidywany wzrost globalnego rynku baterii szacuje się na poziomie 14,1% w latach 2020–2030, osiągając wartość 188,68 mld USD w 2026 roku w porównaniu do 88,49 milionów USD w 2019 r. zgodnie z rysunkiem 6 przedstawiającym analizę rynku baterii w Stanach Zjednoczonych na lata 2020–2030. Pandemia COVID-19 spowodowała spadek produkcji baterii produkowanej z Chin, natomiast wzrost produkcji baterii produkowanych w Europie (wzrost 8,5% w 1 kwartale 2020 r.) Wzrost wartości tego rynku warunkowany jest coraz niższymi cenami baterii jonowo-litowych (dzięki poprawie technologii wytwarzania) oraz zwiększonemu zapotrzebowaniu na urządzenia elektroniczne (telefony, samochody elektroniczne).

Magazyn energii pozwala na zużycie energii elektrycznej w czasie innym niż wyprodukowanej w instalacji PV. Możliwe jest również magazynowanie energii wyprodukowanej w ciągu dnia w celu wykorzystania jej wieczorem. Ponadto, posiadanie magazynu energii umożliwia przechowywanie energii zakupionej w tańszej taryfie (np. w nocy) do wykorzystania, gdy energia elektryczna jest droga (rano). System ten daje nam również awaryjne zasilanie w przypadku braku prądu. Schemat wyrównania szczytów podaży prądu solarne zaprezentowano na rysunku 7.

Istnieje kilka rodzajów magazynów energii:

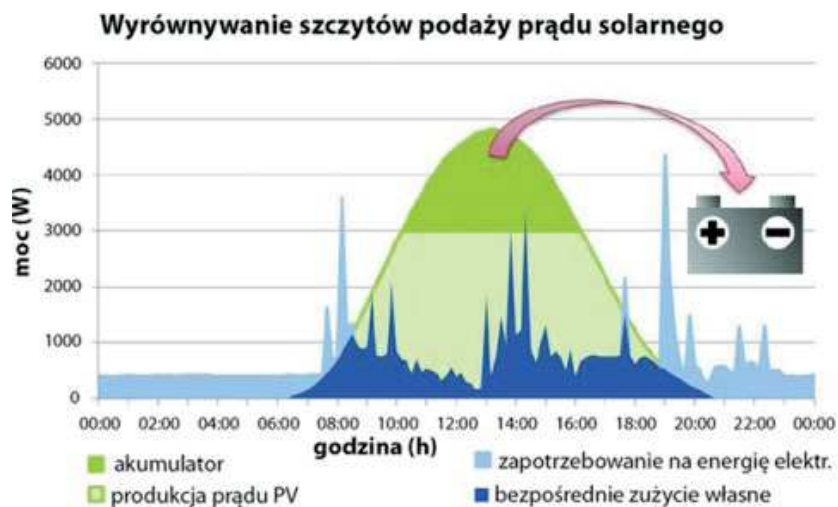
- mobilne magazynowanie energii, w tym zastosowania domowe,
- przemysłowe magazyny energii,
- operatorskie magazyny energii.





Rys. 6. Analiza rynku baterii w Stanach Zjednoczonych na lata 2020–2030 (Battery Market Size Share & Trends Analysis Report 2021)

Fig. 6. Analysis of the battery market in the United States for the years 2020–2030



Rys. 7. Wyrównanie szczytów podaży prądu solarnego (ISEA/RWTH Aachen University 2015)

Fig. 7. Levelling the peaks of solar electricity supply

Magazynowanie energii spełnia również wiele funkcji w nowoczesnych systemach energetycznych poprzez:

- wspieranie procesu transformacji w kierunku energetyki zeroemisyjnej,
- modernizację sieci energetycznych poprzez zwiększenie odporności na zakłócenia pogodowe,

- udoskonalenie inteligentnych technologii umożliwiających cyfrowe sterowanie sieciami,
- regulację częstotliwości sieci energetycznych,
- umożliwienie stworzenia wirtualnej elektrowni z kilkudziesięciu małych magazynów,
- zwiększenie bezpieczeństwa energetycznego,
- stabilizację sieci w miejscach gdzie przyłączonych jest dużo elektrowni OZE,

Przez wiele lat ze względu na rozwijającą się technologię magazynowania energii w ogniwach litowo-jonowych oraz wysokie ceny akumulatorów były one nadal mało popularne wśród użytkowników domowych. Wzrost zainteresowania domowymi magazynami energii w Europie związany był z dotacjami państwowymi. Pierwsze dopłaty do magazynów energii w Europie wprowadzono w Niemczech w latach 2013–2015. W celu zapewnienia, że magazyny energii będą wykorzystywane w sposób wspierający sieć, ilość energii elektrycznej wprowadzanej do sieci przez beneficjenta w godzinach szczytu nie mogła przekroczyć 60% mocy zainstalowanej systemu PV. W ramach tego programu zakupiono 19 000 magazynów energii (Preparation of Graphene-Modified... FINAL REPORT 2020; Baster i in. 2012).

Według danych Instytutu Fraunhofera na koniec 2021 roku w Niemczech w instalacjach fotowoltaicznych podłączonych do sieci niskiego napięcia zainstalowanych było około 326 048 magazynów energii<sup>10</sup>. Łączna pojemność magazynów energii wyniosła 3521 MWh. Jedna trzecia z tego została dodana w samym 2021 roku. We Włoszech, które są drugim największym rynkiem magazynowania energii w Europie, według ANIE Rinnovabili, włoskiego stowarzyszenia energii odnawialnej, w 2021 roku zainstalowano 122 279 systemów magazynowania energii ([www.gramwzielone.pl](http://www.gramwzielone.pl)). Zdecydowana większość z nich (99,9%) to systemy podłączone do instalacji fotowoltaicznych. Według ANIE Rinnovabili, większość stosowanych urządzeń (98,5%) oparta jest na technologii litowo-jonowej. Reszta wykorzystuje akumulatory ołowiowe (1,1%), są to inne technologie. Zdecydowaną większość stanowią instalacje o mocy poniżej 20 kWh. Wyraźną przewagę mają systemy o pojemności od 5 do 10 kWh (40%), następnie instalacje w przedziale 10–15 kWh (26%) i trzecie – poniżej 5 kWh (21%).

Ze względu na znaczną liczbę magazynów energii w Niemczech możemy wyciągnąć wnioski z rozwoju tego rynku. Na podstawie badania przeprowadzonego w Niemczech: *Impact on use of Energy storage on large scale* – możliwe jest zmniejszenie szczytów zasilania energią słoneczną w skali całego systemu (o ok. 40%), a do 66% może być podłączone do tej samej sekcji więcej mocy zainstalowanej w systemie PV. Warunkiem uzyskania takiego efektu jest jednak zastosowanie magazynu energii w odpowiedni sposób wspierający sieć energetyczną, tzn. zapewniający, że energia elektryczna wytworzona w przydomowej instalacji PV będzie trafiała do magazynu w czasie południowych szczytów dostaw energii, a nie do sieci.

Rynek magazynów energii w Polsce wciąż się rozwija. Według szacunków Ministerstwa Klimatu i Środowiska w Polsce działa obecnie około 7000 przydomowych magazynów energii (ok. 2000 instalacji w 2021 r.) o łącznej mocy 27,5 MW współpracujących z instalacjami fotowoltaicznymi ([www.gramwzielone.pl](http://www.gramwzielone.pl)).

Nowelizacja prawa energetycznego niewątpliwie przyczyniła się do rozwoju rynku magazynów energii w Polsce, ponieważ po raz pierwszy całościowo reguluje kwestie magazynowania energii i magazynów energii. Zgodnie z nowelizacją magazynowania energii stało się

odrębnym przedmiotem działalności gospodarczej. Nastąpiła zmiana architektury systemu – magazynowanie jako wsparcie każdego obszaru systemu elektroenergetycznego. Prosument, który chce mieć magazyn energii, musi tylko zgłosić ten fakt operatorowi systemu dystrybucyjnego. Obniżono również opłatę za przyłączenie magazynu do sieci. Tylko magazyny o mocy zainstalowanej wyższej niż 50 kW, podlegają wpisowi do rejestru

### **3. Charakterystyka problemu**

Pomimo komercyjnego sukcesu technologii ogniw jonowo-litowych w magazynach energii połączonych z fotowoltaiką ogniwa wykazują szereg wad, które znacznie ograniczają możliwości ich stosowania m.in. niedostateczna gęstość zgromadzonej energii, zagrożenie dla bezpieczeństwa, toksyczność, wysokie koszty wytworzenia materiałów elektrodowych, wciąż niska sprawność paneli fotowoltaicznych oraz układu BMS (*battery management system* – system zarządzania magazynem energii) rzutuje na ogólnie niską sprawność całego układu. W celu upowszechnienia technologii magazynów energii gromadzących energię pochodzącą z paneli słonecznych niezbędne jest projektowanie nowego magazynu energii. Na podstawie dokonanego przeglądu literaturowego oraz wiedzy i doświadczenia Zespołu Projektowego dobrano metody badawcze, dzięki którym zostaną przeprowadzone poszczególne fazy badawcze prowadzące do rozwiązania problemu.

### **4. Projektowanie nowego magazynu energii**

Praca zakłada zaprojektowanie magazynu energii dla domku jednorodzinny 8 kWh z zainstalowaną instalacją fotowoltaiczną. Korzyściami jakie przyniesie montaż magazynu dla mieszkańców domu związana jest z maksymalizacją wykorzystania produkowanej energii oraz podniesieniem poziomu autokonsumpcji energii z instalacji fotowoltaicznej, a tym samym zmniejszeniem ilości energii zakupionej u operatora. Ponadto magazyn zapewni nam źródło zasilania kluczowych obwodów domowych, gdy zanika napięcie z sieci oraz pełni funkcję stabilizacji sieci. Schemat analizowanego w projekcie domu jednorodzinny, dla którego będzie produkowany magazyn energii, przedstawiono na rysunku 8.

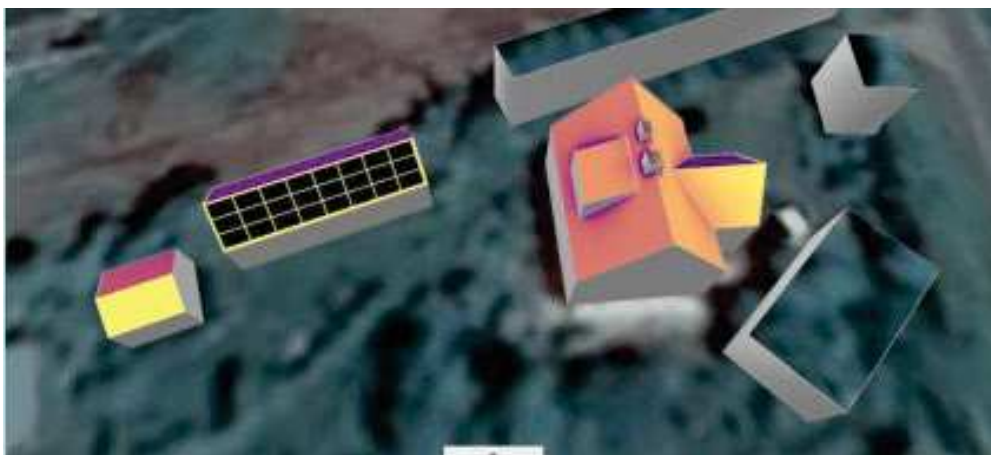
W celu wyboru zaprojektowania nowego magazynu dla danego zastosowania niezbędne jest określenie parametrów takich jak:

- gęstość energii i mocy,
- czas odpowiedzi magazynu,
- żywotność,
- rozmiar,
- stopa zwrotu z inwestycji,
- wyposażenie dodatkowe,
- sprawność magazynowania,
- profil zużycia energii,
- taryfa energetyczna.



Rys. 8. Schematyczny rysunek analizowanego w projekcie domu jednorodzinnego, dla którego będzie produkowany magazyn energii (<https://www.oze-biomas.pl/magazyn-energii>)

Fig. 8. Schematic drawing of a single-family house analyzed in the project, for which energy storage will be produced



Rys. 9. Rzut domu oraz budynku gospodarczego, na którym są zamontowane panele fotowoltaiczne

Fig. 9. Projection of the house and the outbuilding on which the photovoltaic panels are mounted

Następnie następuje analiza dostępnej technologii oraz znalezienie obszarów do udoskonalenia. Badania nad nowymi magazynami koncentrują się głównie na rozwiązaniu następujących problemów:

- obniżenie kosztów produkcji,
- zwiększenie pojemności akumulatorów przy zachowaniu tej samej masy lub zmniejszeniu masy (zwiększenie gęstości energii),

- zwiększenie żywotności baterii (zwiększenie liczby cykli ładowania i rozładowania),
- zwiększenie mocy przy zachowaniu tej samej objętości/masy lub mniejszej objętości/masy (zwiększenie gęstości mocy),
- skrócenie czasu ładowania akumulatorów,
- zmniejszenie lub wyeliminowanie ryzyka pożaru akumulatora.

Wśród wyzwań technologicznych, z którymi zmagają się naukowcy na całym świecie dotyczących projektowania nowych magazynów energii, wyróżniliśmy:

- niestabilną SEI (warstwę międzyfazową między elektrodą a elektrolitem, która jeśli jest szczelna zapewnia katodę i anodę przed bezpośrednim kontaktem z elektrolitem) (Sun i in. 2019; Moitzheim i in. 2019; Wang i in. 2018),
- zagrożenie wybuchem – spowodowane zjawiskiem *thermal runaway*, polegającym na występowaniu szeregu samonapędzających się i niekontrolowanych wydarzeń związanych z wydzieleniem energii cieplnej prowadzący do wybuchu baterii,
- toksyczność baterii – szczególnie wielu elektrolitów używanych w bateriach jonowo-litowych o właściwościach toksycznych,
- spadek pojemności baterii – oznaczający spadek zdolności ogniwa do przechowywania ładunku elektrycznego, głównie spowodowany zmianami elektrochemicznymi zachodzącymi w ogniwach, niedostateczna gęstość energii – oznacza ilość energii, jaka może być przechowywana na jednostkę akumulatora. Pomimo intensywnych badań nad nowymi substancjami chemicznymi stosowanymi w bateriach i średnim tempie wzrostu o 7% (od poziomu 80 Wh/kg w latach 90. XX wieku do 250 Wh/kg obecnie) gęstość energii baterii jonowo-litowych jest ciągle sto razy mniejszy niż benzyny (Wang i in. 2018),
- recykling – wraz z rosnącym popytem na samochody elektryczne, domowe oraz przemysłowe magazyny energii recykling baterii stanie się wyzwaniem dla przemysłu, obecnie tylko 5% baterii jonowo-litowych ulega recyklingowi, reszta się marnuje,
- wysokie koszty – rosnące ceny surowców oraz inflacja doprowadziły do wzrostu cen baterii jonowo-litowych o 7% w 2022 r. w stosunku do 2021 roku. Niezbędne jest poszukiwanie tańszych komponentów baterii, których zakup będzie mniej zależny od zmieniających się czynników geopolitycznych oraz zastępowanie w bateriach drogiego kobaltu.

Odpowiedzią na wyzwania są strategie projektowania magazynu energii są:

- zastosowanie nanometrycznej katody (Wang i in. 2018; Hornsveld 2022);
- stosowanie nanostrukturalnego materiału katodowego jest zauważalnym trendem w nowoprojektowanych bateriach jonowo-litowych. Pomimo zwiększenia mocy wyjściowej, zmniejszenie cząstek do skali nanometrycznej powoduje wzrost niepożądanych reakcji ubocznych;
- powlekanie katody;
- modyfikacja elektrolitu – rozwój nowych elektrolitów, które powinny posiadać następujące cechy: niepalność, nietoksyczność, niską prężność par, wysoką stabilność termiczną oraz szerokie okno elektrochemiczne. Obecnie trwają intensywne prace nad rozwojem cieczy jonowych jako elektrolitów do ogniw ze względu na ich cechy: dużą rozpuszczalność soli litu, wysoką temperaturę wrzenia, nietoksyczność, stabilność termiczną, niepalność oraz wysoki potencjał utlenienia;

- modyfikacja anody;
- zastosowanie nowoczesnego systemu BMS (*Battery Management System*) – systemu zwiększającego bezpieczeństwo baterii oraz zwiększającego jej sprawność połączonego do ogniw.

Podsumowanie wyzwań oraz strategii projektowania magazynu energii zaprezentowano na rysunku 10.



Rys. 10. Wyzwania technologiczne projektowania nowego magazynu energii oraz strategie na jego zaprojektowanie (opracowanie własne)

Fig. 10. Technological challenges of designing a new energy storage facility and strategies for its design

### **Podsumowanie**

Na podstawie powyższych paramentów wybrane zostały trzy obszary badawcze projektowania magazynu energii. Pierwszym obszarem jest zastosowanie katody zapewniającej bezpieczeństwo. Kolejną kwestią, na którą zwrócimy uwagę, będzie zastosowanie nowoczesnego



elektrolitu. Ostatnim zagadnieniem, które uważamy za wartę uwagi, to kwestie zaprojektowania nowoczesnego systemu BMS zwiększającego bezpieczeństwo baterii.

Zaprojektowanie efektywnego magazynu energii jest złożonym zagadnieniem konstrukcyjnym, ekonomicznym oraz prawnym. Przed przystąpieniem do projektowania należy rozpoznać skalę oraz przeznaczenie magazynu i wybrać odpowiednią technologię. W celu poprawy parametrów pracy magazynu energii warto wybrać przynajmniej jedną ze strategii projektowania magazynu energii przedstawioną w niniejszym opracowaniu.

## Literatura

- Baster i in. 2012 – Baster, D., Zajac, W. i Molenda, J. 2012 – Chemiczna modyfikacja powierzchni LiFePO<sub>4</sub> dla uzyskania materiału katodowego dla ogniw litowych o wysokiej pojemności. *Czasopismo Techniczne Mechanika* 9(26), s. 23–31.
- Bruce i in. 2008 – Bruce, P.G., Scrosati, B. i Tarascon, J.-M. 2008 – Nanomaterials for rechargeable lithium batteries. *Angewandte Chemie International Edition* 47, 2930–2946, DOI: 10.1002/anie.200702505.
- Gosiewska, P. 2013 – Imidazolowe cieczki jonowe, jako składniki elektrolitów polimerowych przeznaczonych do akumulatorów litowo-jonowych. Praca magisterska, Wydział Chemiczny, Politechnika Warszawska.
- Hu i in. 2013 – Hu, L.-H., Wu, F.-Y., Lin, C.-T., Khlobystov, A.N. i Li, L.-J. 2013. Graphene-modified LiFePO<sub>4</sub> cathode for lithium ion battery beyond theoretical capacity, *Nature Communication* 1, DOI: 10.1038/ncomms2705.
- Hornsveld, N. 2022 – Atomic layer deposition for Li-ion batteries: Novel chemistries, surface reactions and film properties. Praca doktorska, Eindhoven University of Technology.
- Łuka, G. 2011 – Warstwy ZnO i ZnO:Al otrzymane metodą osadzania warstw atomowych do zastosowań w organicznej elektronice. Rozprawa doktorska, Instytut Fizyki Polskiej Akademii Nauk.
- Michalski, P. – Skrypt do ćwiczenia Nanokrystaliczne materiały katodowe, Politechnika Warszawska.
- Moitzheim i in. 2019 – Moitzheim, S., Balder, J.E., Ritasalo, R., Ek, S., Poodt, P., Unnikrishnan, S., De Gendt, S. i Vereecken, P. 2019 – Toward 3D thin-film batteries: optimal current-collector design and scalable fabrication of TiO<sub>2</sub> thin-film electrodes. *ACS Applied Energy Materials* 4, s. 1774–1783, DOI: 10.1021/acsami.8b01905. [Online] <https://heatdecor.com/magazyny-energii-czyli-niezalezosc-energetyczna-u-progu/> [Dostęp: 08.12.2022].
- [Online] <https://www.muratorplus.pl/technika/elektroenergetyka/magazyny-energii-efektywne-wykorzystanie-energii-odnawialnej-aa-b8Lp-yqDe-MKVq.html> [Dostęp: 08.12.2022].
- [Online] <https://www.gramzielone.pl/magazynowanie-energii/108716/wloskie-systemy-magazynowania-energii-przekroczyly-700-mw> [Dostęp: 08.12.2022].
- [Online] <https://www.gramzielone.pl/magazynowanie-energii/108716/wloskie-systemy-magazynowania-energii-przekroczyly-700-mw> [Dostęp: 08.12.2022].
- [Online] <https://www.oze-biomar.pl/magazyn-energii> [Dostęp: 08.12.2022].
- Preparation of Graphene-Modified LiFePO<sub>4</sub> Cathode for Li-Ion Battery, FINAL REPORT 2020 – North Dakota Department of Commerce Renewable Energy Program.
- Rudnicka, E. 2016. Kinetyka procesów w ogniwach litowo-jonowych. Praca doktorska, Politechnika Poznańska, Wydział Technologii Chemicznej.
- Sälzer i in. 2020 – Sälzer, F., Pescara, L.P., Franke, F., Müller, C., Winkler, J., Schwalm, M. i Røling, B. 2020 – Assessing the Ion Transport Properties of Highly Concentrated Non-Flammable Electrolytes in a Commercial Li-Ion Battery Cell. *Batteries & Supercaps* 3, s. 117–125, DOI: 10.1002/batt.201900111.
- Sun i in. 2019 – Sun, Y., Guan, P., Liu, Y., Xu, H., Li, S. i Chu, D. 2019 – Recent progress in lithium lanthanum titanate electrolyte towards all solid-state lithium ion secondary battery. *Critical Reviews in Solid State and Material Science* 44(78), s. 265–282, DOI: 10.1080/10408436.2018.1485551.
- Wang i in. 2018 – Wang, A., Kadam, S., Li, H. i Shi, S. 2018 – Review on modeling of the anode solid electrolyte interphase (SEI) for lithium-ion batteries. *npj Computational Materials* 4(15), DOI: 10.1038/s41524-018-0064-0.
- Wang i in. 2010 – Wang, Y., Li, H., He, P., Hosono, E. i Zhou H. 2010 – Nano active materials for lithium-ion batteries. *Nanoscale* 2, s. 1294–1305, DOI: 10.1039/C0NR00068J.

## *Praktyczne aspekty magazynowania energii*

Słowa kluczowe: odnawialne źródła energii, magazynowanie energii, OZE, akumulatory, baterie jonowo-litowe

Streszczenie: Jednym z kluczowych problemów i wyzwań współczesnej cywilizacji jest efekt cieplarniany i bezpieczeństwo energetyczne (strategia Unii Europejskiej), konkurencyjność polskiej i europejskiej gospodarki oraz zmniejszenie zanieczyszczenia powietrza w miastach. Rozwój nowoczesnych baterii litowo-jonowych i poprawa zdolności magazynowania energii w bateriach ma strategiczne znaczenie dla Europy. Wojna na Ukrainie rozpoczęła w lutym 2022 r. zwróciła uwagę Europy na kwestię dywersyfikacji źródeł energii oraz konieczność inwestowania w odnawialne źródła energii. Rozpoczęto intensywne prace nad systemem energetyki rozproszonej, która nie może istnieć bez rozproszonego magazynowania energii.

Kluczem do rozwoju rynku magazynów energii jest opracowanie rozwiązań w zakresie nowoczesnych elektrochemicznych metod magazynowania energii, ze szczególnym uwzględnieniem poniższych parametrów: wydajność, przyjazność dla środowiska, koszty, bezpieczeństwo.

Celem niniejszego opracowania jest zaprezentowanie strategii projektowania nowego magazynu energii połączonego z instalacją fotowoltaiczną na wybranym modelowym domu, opartego na bateriach jonowo-litowych na podstawie zidentyfikowanych wyzwań technologicznych. Magazyny energii produkowane w oparciu o europejskie łańcuchy dostaw oraz o lokalną myśl techniczną przyczynią się do zwiększenia bezpieczeństwa energetycznego, rozwoju rozproszonej energetyki oraz uniezależnienia od komponentów dostarczanych z Azji. W rozdziale poruszono kwestie technologiczne związane z budową ogniw jonowo-litowych oraz poszczególnych elementów ogniw takich jak katoda, anoda oraz elektrolit. Ponadto zaprezentowane są również dane dotyczące rozwoju rynku baterii na rynku światowym oraz trendy na rynkach europejskich. Na podstawie wyróżnionych wyzwań technologicznych projektowania nowego magazynu energii zaprojektowano strategię zmierzającą do pokonania trudności, a co za tym idzie, zbudowania nowego magazynu charakteryzującego się: obniżonymi kosztami produkcji, zwiększoną pojemnością, zwiększoną mocą, zwiększoną żywotnością oraz wzrostem bezpieczeństwa.

## *Practical aspects of energy storage*

Keywords: renewable energy sources, energy storage, RES, accumulators, lithium-ion batteries

Abstract: One of the key problems and challenges of modern civilization is the greenhouse effect and energy security (European Union strategy), the competitiveness of the Polish and European economies and the reduction of urban air pollution. The development of modern lithium-ion batteries and the improvement of battery energy storage capacity is of strategic importance for Europe. The war in Ukraine, which began in February 2022, has drawn Europe's attention to the issue of diversification of energy sources and the need to invest in renewable energy sources. Intensive work has begun on a distributed energy system, which cannot exist without distributed energy storage. The key to the development of the energy storage market is the development of solutions for modern electrochemical methods of energy storage, with particular attention to the following parameters: efficiency, environmental friendliness, cost, safety.

The purpose of this article is to present a strategy for the design of a new energy storage combined with a photovoltaic installation on a selected model house, based on lithium ion batteries on the basis of the identified technological challenges. Energy storages produced on the basis of the European supply chain and local technical thought will contribute to increased energy security, the development of distributed energy and independence from components supplied from Asia. The article addresses technological issues related to the construction of lithium ion cells and individual cell components such as cathode, anode and electrolyte. In addition, data on the development of the battery market in the global market and trends in European markets are also presented. On the basis of the highlighted technological challenges of designing a new energy storage, strategies are designed to overcome the difficulties and thus build a new storage characterized by: reduced production costs, increased capacity, increased power, increased life and increased safety.