

# Fizyka magazynowania energii w nowoczesnym zarządzaniu przedsiębiorstwem – przegląd współczesnych technologii i wyzwań

Honorata Sierocka 

Politechnika Białostocka, Wydział Inżynierii Zarządzania

e-mail: h.sierocka@pb.edu.pl

DOI: 10.24427/az-2026-0039

## Streszczenie

Dynamiczny rozwój technologii energetycznych oraz wzrost znaczenia transformacji energetycznej powodują, że systemy magazynowania energii stają się jednym z kluczowych elementów współczesnego zarządzania przedsiębiorstwem. Celem artykułu jest przegląd aktualnych technologii magazynowania energii z perspektywy fizycznych podstaw ich działania oraz znaczenia dla zarządzania organizacją. W opracowaniu omówiono najważniejsze rozwiązania technologiczne, w tym akumulatory litowo-jonowe, superkondensatory oraz technologie wodorowe. Przedstawiono również znaczenie magazynowania energii dla efektywności energetycznej, bezpieczeństwa energetycznego i realizacji strategii zrównoważonego rozwoju przedsiębiorstw. Artykuł ma charakter przeglądowy i opiera się na analizie współczesnej literatury naukowej z zakresu fizyki, energetyki i nauk o zarządzaniu.

## Słowa kluczowe

efektywność energetyczna, zarządzanie przedsiębiorstwem, technologie energetyczne

## Wstęp

Współczesna gospodarka światowa znajduje się w okresie intensywnej transformacji energetycznej związanej z koniecznością ograniczania emisji gazów cieplarnianych, wzrostem cen energii oraz dynamicznym rozwojem odnawialnych źródeł energii. W ostatnich latach coraz większego znaczenia nabierają technologie umożliwiające stabilizację systemów energetycznych oraz zwiększenie efektywności

energetycznej przedsiębiorstw. Szczególną rolę odgrywają w tym zakresie systemy magazynowania energii, które umożliwiają gromadzenie nadwyżek energii i ich wykorzystanie w okresach zwiększonego zapotrzebowania [Díaz-González i in., 2012].

Znaczenie magazynowania energii wzrosło wraz z rozwojem gospodarki opartej na odnawialnych źródłach energii, takich jak energia słoneczna i wiatrowa. Źródła te charakteryzują się dużą niestabilnością produkcji energii wynikającą z warunków atmosferycznych, co wymaga wdrażania rozwiązań umożliwiających stabilizację sieci energetycznych [Luo i in., 2015]. W literaturze podkreśla się, że magazyny energii stają się jednym z podstawowych elementów nowoczesnych systemów energetycznych oraz inteligentnych sieci typu smart grid [Yang i in., 2011].

Rzeczony rozwój technologii magazynowania energii jest bezpośrednio związany z osiągnięciami fizyki, elektrochemii i inżynierii materiałowej. Współczesne systemy wykorzystują zjawiska elektrochemiczne, elektromagnetyczne oraz termodynamiczne do akumulacji i przetwarzania energii. Szczególnie dynamicznie rozwijają się technologie akumulatorów litowo-jonowych, superkondensatorów oraz magazynowania energii w postaci wodoru [Goodenough i Park, 2013].

Jednocześnie technologie magazynowania energii stają się ważnym elementem zarządzania strategicznego przedsiębiorstw. Wdrażanie nowoczesnych systemów energetycznych wpływa na ograniczenie kosztów działalności, zwiększenie bezpieczeństwa energetycznego oraz realizację polityki środowiskowej zgodnej z koncepcją ESG. W literaturze coraz częściej wskazuje się, że efektywne zarządzanie energią stanowi jeden z kluczowych czynników budowania przewagi konkurencyjnej przedsiębiorstw funkcjonujących w warunkach gospodarki niskoemisyjnej [Zakeri i Syri, 2015].

Celem niniejszego artykułu jest przedstawienie fizycznych podstaw magazynowania energii oraz analiza znaczenia współczesnych technologii magazynowania energii dla zarządzania przedsiębiorstwem. Opracowanie ma charakter przeglądowy i zostało przygotowane na podstawie analizy aktualnej literatury naukowej z zakresu fizyki, energetyki i nauk o zarządzaniu.

## 1. Metodyka badań

Artykuł ma charakter przeglądowy i został przygotowany na podstawie analizy współczesnej literatury naukowej dotyczącej technologii magazynowania energii oraz ich znaczenia dla zarządzania przedsiębiorstwem. W procesie badawczym za-

stosowano metodę krytycznej analizy literatury, która jest jedną z najczęściej wykorzystywanych metod badawczych w opracowaniach przeglądowych z zakresu nauk o zarządzaniu i nauk technicznych.

Dobór literatury oparto na publikacjach naukowych indeksowanych w renomowanych bazach danych, takich jak Scopus, Web of Science, ScienceDirect, SpringerLink oraz IEEE Xplore. Analizie poddano przede wszystkim recenzowane artykuły naukowe opublikowane w latach 2011–2025. Uwzględniono również wybrane publikacje klasyczne dotyczące rozwoju technologii magazynowania energii oraz fizycznych podstaw działania systemów energetycznych.

Analiza literatury została ukierunkowana na identyfikację najważniejszych technologii magazynowania energii, fizycznych podstaw ich działania oraz znaczenia tych rozwiązań dla współczesnego zarządzania przedsiębiorstwem. Szczególną uwagę poświęcono zagadnieniom związanym z efektywnością energetyczną, bezpieczeństwem energetycznym oraz realizacją strategii zrównoważonego rozwoju organizacji.

## **2. Przegląd literatury**

### **2.1. Fizyczne podstawy magazynowania energii**

Magazynowanie energii polega na gromadzeniu energii w określonej postaci w celu jej późniejszego wykorzystania. Z fizycznego punktu widzenia energia może być przechowywana między innymi w postaci chemicznej, elektrycznej, mechanicznej lub cieplnej [Chen i in., 2009]. Rozwiązania te umożliwiają stabilizację systemów energetycznych oraz poprawę efektywności wykorzystania energii.

Podstawowym parametrem opisującym system magazynowania energii jest pojemność energetyczna określająca ilość energii możliwej do zgromadzenia w układzie. Istotna jest również sprawność energetyczna definiowana jako stosunek energii oddanej do energii pobranej. W praktyce każdemu procesowi magazynowania towarzyszą straty wynikające między innymi z oporu elektrycznego, procesów cieplnych oraz degradacji materiałów [Ibrahim i in., 2008].

Wysoka sprawność energetyczna stanowi jeden z kluczowych czynników wpływających na opłacalność wdrażania technologii magazynowania energii w przedsiębiorstwach. Według Luo i współautorów [2015] nowoczesne systemy magazynowania energii mogą osiągać sprawność przekraczającą 90%, co znacząco zwiększa ich ekonomiczną atrakcyjność.

W literaturze wyróżnia się kilka podstawowych grup technologii magazynowania energii: elektrochemiczne, mechaniczne, elektryczne i termiczne [Dunn i in.,

2011]. W praktyce przemysłowej największe znaczenie posiadają obecnie technologie elektrochemiczne, przede wszystkim akumulatory litowo-jonowe.

Rozwój systemów magazynowania energii jest również związany z postępowaniem w zakresie fizyki materiałowej. Współczesne badania koncentrują się na zwiększaniu gęstości energii, trwałości oraz bezpieczeństwa pracy układów energetycznych [Liu i in., 2025]. Szczególne znaczenie przypisuje się nowym materiałom elektrochemicznym umożliwiającym poprawę parametrów eksploatacyjnych baterii.

## 2.2. Współczesne technologie magazynowania energii

Akumulatory litowo-jonowe należą obecnie do najważniejszych technologii magazynowania energii. Ich działanie opiera się na procesach elektrochemicznych zachodzących pomiędzy anodą i katodą przy udziale elektrolitu [Tarascon i Armand, 2001; Goodenough i Park, 2013]. Główną zaletą tych systemów jest wysoka gęstość energii, stosunkowo niewielka masa oraz możliwość wielokrotnego ładowania. Technologie litowo-jonowe znajdują szerokie zastosowanie w elektromobilności, systemach fotowoltaicznych oraz przemysłowych magazynach energii. W ostatnich latach obserwuje się intensywny rozwój baterii typu solid-state, które charakteryzują się wyższym poziomem bezpieczeństwa oraz większą trwałością. Pomimo licznych zalet akumulatory litowo-jonowe posiadają również ograniczenia związane z kosztami produkcji, degradacją materiałów oraz koniecznością recyklingu zużytych ogniw. W literaturze podkreśla się także problem dostępności surowców strategicznych, takich jak lit czy kobalt [Nykvist i Nilsson, 2015; Njema i in., 2024].

Superkondensatory stanowią alternatywną technologię magazynowania energii wykorzystującą zjawiska elektrostatyczne. W przeciwieństwie do klasycznych akumulatorów umożliwiają bardzo szybkie ładowanie i rozładowywanie oraz charakteryzują się dużą liczbą cykli pracy. Technologie te są wykorzystywane przede wszystkim w systemach wymagających krótkotrwałego dostarczenia dużej mocy, między innymi w transporcie publicznym, automatyce przemysłowej i systemach odzysku energii. Głównym ograniczeniem superkondensatorów pozostaje stosunkowo niska gęstość energii w porównaniu z akumulatorami litowo-jonowymi. Z tego względu często stosowane są w układach hybrydowych łączących różne technologie magazynowania energii [Enasel i Dumitrascu, 2025, Kumar i Rosen, 2024].

Wodór uznawany jest za jeden z najbardziej perspektywicznych nośników energii przyszłości. Magazynowanie energii w postaci wodoru opiera się na procesie elektrolizy, podczas którego energia elektryczna wykorzystywana jest do rozdzielenia cząsteczek wody na wodór i tlen. Technologie wodorowe umożliwiają długoter-

minowe magazynowanie energii oraz integrację odnawialnych źródeł energii z systemami przemysłowymi. Coraz częściej wskazuje się ich znaczenie dla przemysłu ciężkiego, transportu oraz energetyki. Rozwój gospodarki wodorowej napotyka jednak liczne bariery technologiczne i ekonomiczne. Do najważniejszych należą wysokie koszty infrastruktury, straty energetyczne podczas konwersji energii oraz problemy związane z bezpiecznym magazynowaniem wodoru [Luo i in., 2015; Sahoo i Timmann, 2023].

### **3. Znaczenie i bariery magazynowania energii dla zarządzania przedsiębiorstwem**

Systemy magazynowania energii odgrywają coraz większą rolę w nowoczesnym zarządzaniu przedsiębiorstwem. W warunkach rosnących cen energii oraz zwiększającej się niestabilności rynku energetycznego przedsiębiorstwa poszukują rozwiązań umożliwiających poprawę efektywności energetycznej oraz ograniczenie kosztów działalności operacyjnej.

Jednym z najważniejszych aspektów wykorzystania magazynów energii jest możliwość optymalizacji zużycia energii elektrycznej. Przedsiębiorstwa mogą magazynować energię w okresach niższych cen i wykorzystywać ją w momentach zwiększonego zapotrzebowania lub wysokich cen energii. Takie rozwiązania umożliwiają ograniczenie kosztów działalności oraz poprawę stabilności finansowej organizacji [Zakeri i Syri, 2015].

Istotnym elementem zarządzania przedsiębiorstwem jest również bezpieczeństwo energetyczne. Współczesne organizacje przemysłowe są w dużym stopniu uzależnione od ciągłości dostaw energii elektrycznej. Nawet krótkotrwałe przerwy w dostawach energii mogą powodować znaczące straty finansowe oraz zakłócenia procesów produkcyjnych. Magazyny energii umożliwiają utrzymanie ciągłości funkcjonowania przedsiębiorstw w sytuacjach awaryjnych oraz zwiększają odporność organizacji na zakłócenia zewnętrzne [Sahoo i Timmann, 2023].

W literaturze coraz większą uwagę poświęca się również znaczeniu technologii energetycznych dla realizacji strategii ESG. Wdrażanie systemów magazynowania energii umożliwia bardziej efektywne wykorzystanie odnawialnych źródeł energii oraz ograniczenie emisji CO<sub>2</sub>. W rezultacie przedsiębiorstwa mogą realizować cele środowiskowe i budować pozytywny wizerunek organizacji odpowiedzialnej społecznie [Topalović i in., 2023].

Technologie magazynowania energii są także ważnym elementem koncepcji Przemysłu 4.0. Integracja systemów energetycznych z rozwiązaniami opartymi na

sztucznej inteligencji oraz analizie danych umożliwia bardziej efektywne zarządzanie procesami przemysłowymi. Systemy AI mogą przewidywać zapotrzebowanie na energię oraz optymalizować procesy ładowania i rozładowywania magazynów energii [Jobin i in., 2019].

W kontekście zarządzania strategicznego przedsiębiorstwa coraz częściej traktują inwestycje w magazynowanie energii jako element budowania przewagi konkurencyjnej. Organizacje posiadające własne systemy energetyczne są mniej podatne na wahania cen energii oraz mogą skuteczniej realizować strategię zrównoważonego rozwoju.

Pomimo dynamicznego rozwoju technologii magazynowania energii nadal istnieje szereg czynników ograniczających tempo ich wdrażania w przedsiębiorstwach. Jedną z najczęściej wskazywanych barier są wysokie koszty inwestycyjne związane z zakupem, instalacją oraz eksploatacją systemów magazynowania energii. Choć w ostatnich latach obserwowany jest systematyczny spadek kosztów technologii bateryjnych, inwestycje te nadal wymagają znacznych nakładów finansowych, szczególnie w przypadku dużych przedsiębiorstw przemysłowych [Nykvist i Nilsson, 2015; Zakeri i Syri, 2015]. Istotnym wyzwaniem pozostaje również ograniczona trwałość niektórych technologii magazynowania energii. Akumulatory litowo-jonowe podlegają procesom starzenia elektrochemicznego prowadzącym do stopniowego spadku pojemności i sprawności. W konsekwencji przedsiębiorstwa muszą uwzględniać koszty wymiany lub regeneracji systemów magazynowania energii w długim okresie eksploatacji [Goodenough i Park, 2013; Njema i in., 2024].

Coraz większego znaczenia nabierają również aspekty środowiskowe. Produkcja nowoczesnych ogniw wymaga wykorzystania surowców krytycznych, takich jak lit, kobalt czy nikiel, których wydobycie wiąże się z obciążeniem środowiska naturalnego. Dodatkowym wyzwaniem jest organizacja efektywnych systemów recyklingu zużytych baterii oraz odzysku cennych materiałów wykorzystywanych w procesach produkcyjnych [Dunn i in., 2011; Winter i Brodd, 2004].

Barierę rozwoju rynku magazynowania energii stanowią również uwarunkowania regulacyjne i organizacyjne. W wielu krajach przepisy dotyczące integracji magazynów energii z sieciami elektroenergetycznymi nadal znajdują się w fazie rozwoju. Brak stabilnych mechanizmów wsparcia inwestycyjnego oraz niejednoznaczne regulacje mogą ograniczać skłonność przedsiębiorstw do wdrażania nowoczesnych technologii energetycznych [Luo i in., 2015; Sahoo i Timmann, 2023].

Pomimo wskazanych ograniczeń większość autorów podkreśla, że dalszy rozwój technologii magazynowania energii będzie odgrywał kluczową rolę w transformacji energetycznej gospodarki oraz realizacji strategii zrównoważonego rozwoju przedsiębiorstw [Enasel i in., 2025; Kumar i Rosen, 2024].

## Podsumowanie

Technologie magazynowania energii stanowią obecnie jeden z najważniejszych obszarów rozwoju współczesnej energetyki i przemysłu. Ich rozwój jest bezpośrednio związany z osiągnięciami fizyki, elektrochemii oraz inżynierii materiałowej.

Wdrażanie systemów magazynowania energii wpływa nie tylko na poprawę efektywności energetycznej przedsiębiorstw, lecz także na bezpieczeństwo energetyczne i realizację strategii zrównoważonego rozwoju. Jednocześnie rozwój tych technologii wymaga dalszych badań nad zwiększeniem sprawności, bezpieczeństwa i trwałości systemów energetycznych.

Można stwierdzić, że fizyka magazynowania energii będzie w kolejnych latach odgrywała coraz większą rolę zarówno w rozwoju nowoczesnych technologii, jak i w zarządzaniu przedsiębiorstwami funkcjonującymi w warunkach transformacji energetycznej.

W najbliższych latach można oczekiwać dalszego intensywnego rozwoju technologii magazynowania energii. Szczególnie duże znaczenie przypisuje się nowym materiałom elektrochemicznym zwiększającym pojemność i trwałość baterii.

Coraz większą rolę odgrywa także sztuczna inteligencja wykorzystywana do zarządzania przepływem energii i optymalizacji pracy systemów energetycznych. Rozwój inteligentnych sieci energetycznych typu smart grid umożliwia bardziej efektywną integrację magazynów energii z odnawialnymi źródłami energii.

W literaturze podkreśla się również znaczenie technologii długoterminowego magazynowania energii, w szczególności rozwiązań opartych na wodorze oraz magazynowaniu termicznym.

## ORCID iD

Honorata Sierocka: <https://orcid.org/0000-0001-5903-9258>

## Literatura

1. Chen H., Cong T.N., Yang W., Tan C., Li Y., Ding Y. (2009), *Progress in electrical energy storage system: A critical review*, Progress in Natural Science 19 (3), pp. 291-312.
2. Díaz-González F., Sumper A., Gomis-Bellmunt O., Villafáfila-Robles R. (2012), *A review of energy storage technologies for wind power applications*, Renewable and Sustainable Energy Reviews 16 (4), pp. 2154-2171.

3. Dunn B., Kamath H., Tarascon J.M. (2011), *Electrical energy storage for the grid: A battery of choices*, Science 334 (6058), pp. 928-935.
4. Enasel E., Dumitrascu G. (2025), *Storage solutions for renewable energy: A review*, Energy Nexus 17, Article 100391
5. Goodenough J.B., Park K.S. (2013), *The Li-Ion Rechargeable Battery: A Perspective*, Journal of the American Chemical Society 135 (4), pp. 1167-1176.
6. Ibrahim H., Ilinca A., Perron J. (2008), *Energy storage systems - Characteristics and comparisons*, Renewable and Sustainable Energy Reviews 12 (5), pp. 1221-1250.
7. Jobin A., Ienca M., Vayena E. (2019), *Artificial Intelligence: the global landscape of ethics guidelines*, Nature Machine Intelligence 1 (9), pp. 389-399.
8. Kumar R., Rosen M.A. (2024), *Different energy storage techniques: recent advancements, challenges, and future prospects*, Journal of Thermal Analysis and Calorimetry 149, pp. 1-25.
9. Liu X., Zhang Y., Wang H. (2025), *Advancements in Energy-Storage Technologies: A Review of Materials, Methods and Applications*, Sustainability 17 (18), Article 8354.
10. Luo X., Wang J., Dooner M., Clarke J. (2015), *Overview of current development in electrical energy storage technologies and the application potential in power system operation*, Applied Energy 137, pp. 511-536.
11. Njema G.G., Ouma R.B.O., Kibet J.K. (2024), *A Review on the Recent Advances in Battery Development and Energy Storage Technologies*, International Journal of Energy Research 2024.
12. Nykvist B., Nilsson M. (2015), *Rapidly falling costs of battery packs for electric vehicles*, Nature Climate Change 5 (4), pp. 329-332.
13. Sahoo S., Timmann P. (2023), *Energy Storage Technologies for Modern Power Systems: A Detailed Analysis of Functionalities, Potentials, and Impacts*, IEEE Access 11, pp. 103760-103789.
14. Tarascon J.M., Armand M. (2001), *Issues and challenges facing rechargeable lithium batteries*, Nature 414, pp. 359-367.
15. Topalović Z., Haas R., Ajanović A., Sayer M. (2023), *Prospects of electricity storage*, Renewable Energy and Environmental Sustainability 8.
16. Winter M., Brodd R.J. (2004), *What Are Batteries, Fuel Cells, and Supercapacitors?*, Chemical Reviews 104 (10), pp. 4245-4269.
17. Yang Z., Zhang J., Kintner-Meyer M.C.W., Lu X., Choi D., Lemmon J.P., Liu J. (2011), *Electrochemical energy storage for green grid*, Chemical Reviews 111 (5), pp. 3577-3613.
18. Zakeri B., Syri S. (2015), *Electrical energy storage systems: A comparative life cycle cost analysis*, Renewable and Sustainable Energy Reviews 42, pp. 569-596.

# **The Physics of Energy Storage in Modern Business Management: An Overview of Current Technologies and Challenges**

## **Abstract**

The rapid development of energy technologies and the growing importance of the energy transition mean that energy storage systems are becoming one of the key elements of modern business management. The aim of this article is to provide an overview of current energy storage technologies from the perspective of the physical principles underlying their operation and their significance for organisational management. The study discusses the most important technological solutions, including lithium-ion batteries, supercapacitors and hydrogen technologies. It also presents the importance of energy storage for energy efficiency, energy security and the implementation of sustainable development strategies in enterprises. The article is a review and is based on an analysis of contemporary scientific literature in the fields of physics, energy and management sciences.

## **Key words**

energy efficiency, business management, energy technologies