

Technologie magazynowania energii. Cz. I

Energy storage technologies

HENRYK WOJCIECHOWSKI

Zasoby paliw kopalnianych na świecie są ograniczone i stopniowy wzrost udziału odnawialnych źródeł energii w produkcji energii jest konieczny. Przeszkodą do pełnego rozwoju układów technologicznych wykorzystujących odnawialne źródła energii jest brak przewidywalności produkcji energii. Ilość produkowanej energii w układach jest zależna od warunków atmosferycznych, które są zmienne i trudne do przewidzenia. Nadzieją na rozwiązanie tego problemu jest rozwój i szersze wykorzystanie technologii magazynowania energii, pozwalające na bilansowanie produkcji i zapotrzebowania mocy i energii. W ten sposób uzyskuje się pewniejsze źródło energii niezależne od nagłych zmian warunków atmosferycznych oraz o stabilniejszych parametrach. Efektywne magazyny energii elektrycznej rozwiązałyby problem przymusu produkcji mocy i energii dostosowanych do bieżącego zapotrzebowania. Celem artykułu jest przedstawienie problemu i potrzeby efektywnego magazynowania energii oraz zaprezentowanie stosowanych współcześnie technologii magazynowania energii, takich jak: baterie akumulatorów, kinetyczne zasobniki energii, koła zamachowe, elektrownie pompowe, sprężone powietrze, nadprzewodnikowe zasobniki energii (Superconducting magnetic energy storage – SMES), superkondensatory oraz magazynowanie energii w ciekłym powietrzu (Liquid Air Energy Storage – LAES). Jedną z najbardziej wydajnych metod magazynowania nadwyżek energii elektrycznej jest magazynowanie w ciekłym powietrzu – LAES. LAES nie podlega szczególnym wymaganiom geologicznym, co pozwala uniknąć żmudnych i skomplikowanych procedur uzyskania zezwoleń oraz otwiera możliwości szybkiego wdrożenia technologii. Sprawność magazynowania energii w ciekłym powietrzu wynosi ok. 70% i jest bliska sprawności elektrowni pompowych i posiada wielokrotnie niższe nakłady inwestycyjne niż elektrownia pompowa.
Słowa kluczowe: technologie magazynowania energii, charakterystyczne cechy, koszty magazynowania energii

Resources of fossil fuels in the world are limited and gradual increase in the share of renewable energy sources in energy production is necessary. The obstacle to the full development of technological systems using renewable energy sources is the lack of predictability of energy production. The amount of energy produced in the systems is dependent on weather conditions, which are variable and difficult to predict. Hope for a solution to this problem is the development and wider use of energy storage technologies, allowing for balancing production and demand of power and energy. In this way, a reliable source of energy independent of the sudden changes in weather conditions and the more stable performance. Efficient storage of electricity would solve the problem of coercion production of power and adapted to the current demand. The purpose of this article is to present the problem and the need for efficient energy storage and presentation of applied modern technologies of energy storage such as : batteries, kinetic energy storage, flywheels, power pumps, compressed air, superconducting energy storage, supercapacitors and energy storage in liquid air. One of the most efficient methods of storing surplus electricity storage in liquid air – LAES. LAES is not subject to special requirements geological, which avoids the tedious and complicated procedures for obtaining permits and opens up the possibility of rapid deployment of technology. The efficiency of energy storage in liquid air is approx. 70% and is close to the efficiency of the power plant pumping and has repeatedly lower investment than the power pump.

Keywords: energy storage technologies, characteristics, cost of energy storage

Wprowadzenie

Technologie magazynowania energii oparte są na wykorzystaniu różnych zjawisk [1,2]:

- elektrochemia – baterie, akumulatory, odwracalne ogniwa paliwowe,
- pole elektromagnetyczne – kondensatory i superkondensatory,
- pole magnetyczne – systemy magazynowania energii magnetycznej w układach nadprzewodzących (SMES – ang. *Superconducting magnetic energy storage systems*),
- fizykochemiczne – magazynowanie ciepła i chłodu, magazynowanie energii w kołach zamachowych, sprężonym gazie, sprężonym powietrzu, skroplonym powietrzu oraz wodnych układach pompowych.

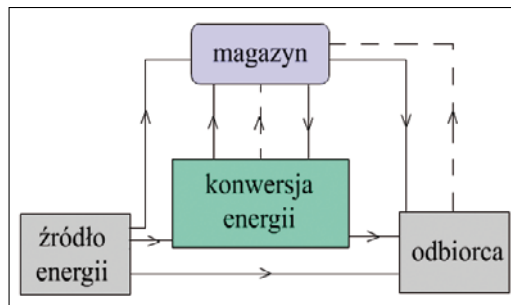
W tabeli 1 przedstawiono pierwotne nośniki energii ich konwersje i sposoby magazynowania

Różne technologie magazynowania energii koegzystują ze sobą, ponieważ ich charakterystyki czynią je atrakcyjnymi dla różnych zastosowań. Schematyczne posadowienie magazynu energii w układzie źródło energii-odbiorca z uwzględnieniem ewentualnej

Dr inż. Henryk Wojciechowski – em. docent w Politechnice Wrocławskiej, Katedra Energoelektryki Wydziału Elektrycznego Politechniki Wrocławskiej

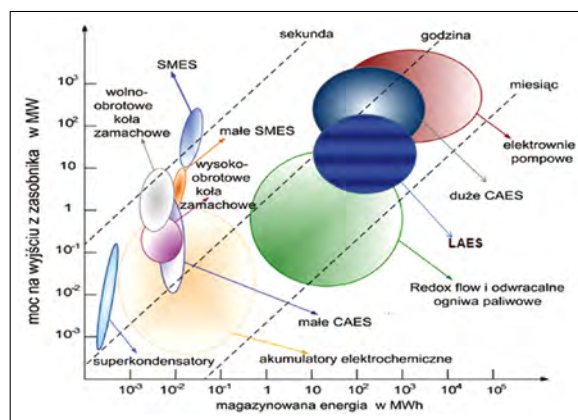
Tabela 1. Źródła energii pierwotnej ich konwersja i magazynowanie energii [2,3]

Źródła energii	Proces przetwarzania	Rodzaj energii	Magazynowanie, odzyskiwanie	Magazynowanie energii
<ul style="list-style-type: none"> • Paliwa kopalne • Paliwa jądrowe • Odnawialne źródła energii: biomasa, wiatr, woda, energia promieniowania słonecznego 	➔	<ul style="list-style-type: none"> • Energia elektryczna • Ciepło • Chłód • Energia potencjalna • Energia kinetyczna • Sprężone powietrze • Skroplone powietrze 	↔	<ul style="list-style-type: none"> • Baterie • Pola elektro-magnetyczne • Odwracalne ogniwa paliwowe • Zbiorniki ciepła i chłodu • Koła zamachowe • Elektrownie pompowe • Elektrownie na sprężone powietrze



Rys.1. Schemat układu źródło-odbiorca z magazynem energii i konwersją energii

Rys.2. Moc uzyskiwana z zasobników w zależności od zdolności i technologii magazynowania energii [2]
SMES – systemy magazynowania energii magnetycznej w układach nadprzewodzących,
CAES – magazynowanie energii w sprężonym powietrze
LAES – magazynowanie energii elektrycznej w ciekłym powietrze.



i często jest niezależny od jego wielkości. Z tych względów pewne systemy magazynowania są ekonomicznie uzasadnione tylko powyżej minimalnej wartości pojemności energii i mocy na wyjściu.

• Wyposażenie monitorujące i kontrolne

Zachowanie niektórych systemów może być monitorowane ze szczególną łatwością i przy niskich kosztach, podczas gdy inne systemy wymagają szczególnego wysiłku dla uzyskania informacji o dostępnej do wykorzystania energii i bezpieczeństwie jej magazynowania.

• Sprawność magazynowania energii

Proces magazynowania/rozładowywania energii może powodować znaczące straty, specyficzne dla danego zastosowania. Wiele elementów wyposażenia pomocniczego charakteryzuje się statym poborem mocy, a dodatkowo występujące straty energii, związane są z samą zasadą magazynowania, np. samorozładowywanie się akumulatorów lub straty ciepła do otoczenia. Mogą to być straty bardzo wysokie w odniesieniu do pojemności energetycznej magazynu.

Ograniczenia eksploatacyjne

Koszt zapewnienia prawidłowej eksploatacji i granicznych parametrów pracy, takich jak temperatura i systemy bezpieczeństwa są czynnikami, które muszą być uwzględniane przy ocenie czasu życia i kosztów całkowitych. Moc na wyjściu i zdolność zmagazynowania energii w układzie są charakterystycznymi cechami technologii magazynowania i zastosowania. Szczególną uwagę należy zwrócić na te różnice przy interpretacji rys.2. Obszar poszczególnych sposobów magazynowania określa zakres energii i mocy jaki może być uzyskany w poszczególnych technologiach magazynowania, nie uwzględniając czynników ekonomicznych.

Magazynowanie energii

Akumulatory i akumulatory zaawansowane

Akumulatory (baterie) wielokrotnego ładowania są najstarszą formą magazynowania energii elektrycznej i są szczególnie szeroko-

konieczności konwersji energii zamieszczono na rys.1.

Wyboru najbardziej odpowiedniej technologii magazynowania energii użytkownik dokonuje na podstawie kryteriów technicznych i ekonomicznych. Są to:

• Gęstość energii i mocy

Dostępna energia oraz maksymalna moc na jednostkę objętości lub masy jest istotną daną dla większości zastosowań, lecz najistotniejszą jest dla zastosowań w transporcie i mobilnej komunikacji. Tu masa (ciężar) lub objętość są bezwzględny ograniczeniem bądź czynnikiem determinującym dla projektowania i osiągnięć systemu magazynowania.

• Czas odpowiedzi

W pewnych zastosowaniach występują bardzo restrykcyjne wymagania dotyczące prędkości z jaką energia może być uwolniona lub zaabsorbowana. W zastosowaniach w UPS¹ czas kilku milisekund może niekiedy być maksymalnym, akceptowalnym czasem odpowiedzi.

• Żywotność

Całkowity koszt magazynowania energii jest określony przez początkowy koszt inwestycyjny i przewidywany okres eksploatacji magazynu. Określenie żywotności jest szczególnie ważnym problemem dla systemów magazynowania elektrochemicznego.

• Koszty i ekonomika skali

Wyposażenie dodatkowe, wymagane przez niektóre systemy magazynowania energii, określa całkowity koszt systemu

¹ zasilacz UPS (ang. uninterruptible power supply – nieprzerwywalne zasilanie energią)

Tabela 2. Magazynowanie energii. Akumulatory [2]

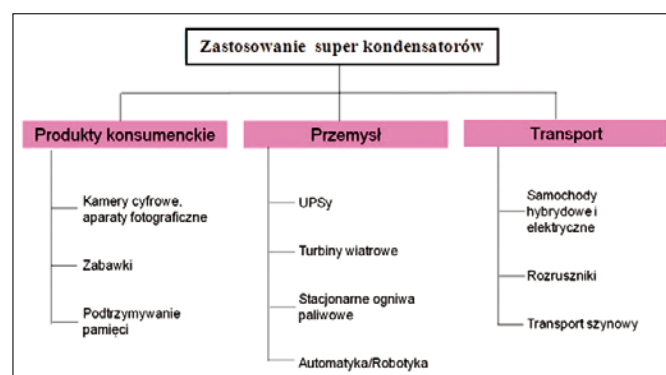
Gęstość energii i mocy	Gęstość energii (20 – 100) Wh/kg, gęstość mocy 170 W/kg; gęstość mocy dla bardzo krótkich impulsów mocy osiągają 150 W/kg a nawet 400 W/kg. Stosunek energii do mocy akumulatora jest cechą jego konstrukcji
Koszt/ekonomika skali	Większość typów baterii o potencjale ekonomicznym jest już produkowana w znacznych ilościach. Koszt materiałów i obróbki są czynnikami postępu. Dla baterii w zastosowaniach hybrydowych koszt jest czynnikiem najważniejszym.
Czas życia	Czynnik warunkujący dla większości zastosowań. Szczególne problemy występują dla baterii magazynujących energię z OZE i baterii „mocy” w pojazdach hybrydowych.
Monitorowanie i sterowanie	Złożone, brak adekwatnych rozwiązań.
Sprawność	Ponad 90 % i bardzo zależna od rodzaju zastosowań, straty trybu czuwania w większości baterii są pomijalne.

Tabela 3. Magazynowanie energii. Superkondensatory [2]

Gęstość energii i mocy	Gęstość energii i mocy dla modułu 10 Wh/kg i 10 kW/kg, a dla pojedynczego superkondensatora – 12 Wh/kg i 12 kW/kg
Koszt/ekonomika skali	Nadal bardzo wysokie koszty, głównie na skutek małej produkcji, brak zastosowań komercyjnych
Czas życia	Brak praktycznych ograniczeń liczby cykli, czas życia 20 lat
Monitorowanie i sterowanie	Monitorowanie proste, lecz nadal konieczna złożona elektronika sterująca eksploatacją.
Sprawność	Efektywność brutto powyżej 97 %, znaczące tempo rozładowania – ok. 5% na dzień

Tabela 4. Magazynowanie energii. Odwracalne ogniwa paliwowe [2]

Gęstość energii i mocy	Gęstość energii 75 Wh/kg; energia i gęstość mocy są niezależnymi parametrami konstrukcyjnymi. Planowane magazynowanie energii na poziomie kilkuset MWh
Koszt/ekonomika skali	Efektywne kosztowo będą tylko duże systemy (dla pojazdów lub zastosowań stacjonarnych). Zwiększenie potencjału energii jest znacznie tańsze niż zwiększenie mocy wyjściowej
Czas odpowiedzi	W zasadzie jak dla baterii – kilka sekund
Sprawność	(50 – 60)%, ale niskie straty w trybie czuwania



Rys.3. Zastosowanie superkondensatorów w urządzeniach

ko stosowane. Akumulatory przechowują energię elektryczną w postaci chemicznej. Ich właściwości są w złożony sposób zależne od stosowanych materiałów, procesów wytwarzania i warunków eksploatacji. Akumulatory litowo-jonowe i niklo-metalowo-hybrydowe (NiMH) są jedynymi nowymi technologiami akumulatorowymi, które osiągnęły znaczącą penetrację rynkową w ostatnim dziesięcioleciu. Inne nowe technologie z tej dziedziny, takie jak: akumulatory sodowo-siarkowe i sodowo-niklo-chlorowe nie spełniły dotychczas wiązanych z nimi oczekiwań, aczkolwiek osiągnięte parametry uzyskane w badaniach są dość obiecujące.

Akumulatory zdolne są do reagowania na zapotrzebowanie mocy w ciągu milisekund i tylko superkondensatory mogą im dorównać. Akumulatory na ogół cechują się bardzo niskimi stratami w trybie oczekiwania („stand-by”) i mogą osiągnąć wysoką sprawność energetyczną zależną od zastosowania i warunków eksploatacyjnych. Pojemność akumulatora i maksymalny pobór mocy są ze sobą związane. W zastosowaniach stacjonarnych, wymagających bardzo wysokich mocy wyjściowych przez krótki okres, akumulatory konkurują z kołami zamachowymi, super kondensatorami i systemami magazynowania energii magnetycznej w układach nadprzewodzących (SMES’ami).

Racjonalnym kierunkiem w rozwoju nowych systemów akumulatorowych jest zwiększenie gęstości energii, gęstości mocy oraz czasu życia w rzeczywistych warunkach eksploatacji i zastosowaniach. Stosowane jest rozróżnienie pomiędzy „akumulatorami mocy”, zdolnymi do dostarczania i magazynowania krótkich

impulsów mocy i „akumulatorami energii”, zdolnymi do dostarczania znacznych wartości energii, ale przy znacznie niższym obciążeniu mocą. Badania w zakresie akumulatorów są ukierunkowane obecnie na nowe, ulepszone materiały i procesy wytwarzania, jak też na warunki pracy.

- **W zastosowaniach stacjonarnych** dostępne akumulatory ołowiowo-kwasowe długo jeszcze nie znajdują konkurencji z powodu tego, że ciężar w takich zastosowaniach nie jest czynnikiem ograniczającym. Jest to obecnie najtańszy z używanych systemów magazynowania, cechuje się wysokim stopniem recyklingu i spełnia większość wymagań. Badacze skupiają się na ich udoskonaleniach dla specyficznych zastosowań. Nadal możliwe są udoskonalenia, szczególnie w zakresie ich żywotności. Czas życia akumulatorów ołowiowo-kwasowych w skrajnych warunkach klimatycznych i zdalnych instalacjach zewnętrznych nie jest zadowalający, wobec czego stosowane są akumulatory niklo – kadmowe (NiCd). W przyszłości inne systemy magazynowania, np. akumulatory litowo-jonowe, po udoskonaleniu mogą być zdolne do konkurencji.
- **Dla zastosowań przenośnych** badania skupiają się na akumulatorach litowo-jonowych i litowo-polimerowych, a także na akumulatorach niklo-metalowo-hybrydowych. Akumulatory NiCd są nadal najpowszechniej stosowane przy wymaganej wysokiej mocy na wyjściu, np. przy zelektryfikowanych wydzielonych instalacjach elektrycznych do napędu elektronarzędzi pobierających duże moce w czasie rozruchu. Jednakże zastosowanie kadmu w produktach dla przemysłu i konsumpcji wiąże się z zagrożeniem dla środowiska i ogranicza badania do nowych zastosowań i ulepszeń technicznych.
- **Dla pojazdów elektrycznych i hybrydowych** badania skupiają się na akumulatorach litowo-jonowych i litowo-polimerowych z uwagi na ich duże gęstości energii. Pomimo znacznie wyższego ciężaru akumulatory ołowiowo-kwasowe są nadal traktowane jako konkurencyjne dla pojazdów hybrydowych z uwagi na ich znacznie niższy koszt. W tabeli 2 zestawiono charakterystyczne dane akumulatorów.

Większość akumulatorów zawiera materiały toksyczne, tak, że zawsze rozważać należy skutki ekologiczne – od procesów wydobycia materiałów po ich recykling oraz niekontrolowaną gospodarkę akumulatorami zużytymi. Panuje powszechne przekonanie, że

nie występuje nieakceptowane ryzyko w czasie użytkowania, ale nadal konieczne jest by wysoki procent akumulatorów trafił do miejsc zbiórki i recyklingu.

Duże magazyny energii zbudowane z akumulatorów istnieją między innymi w Puerto Rico (14 MWh pojemności, akumulatory kwasowo-ołowiowe) i w Fairbanks na Alasce (6,75 MWh pojemności, akumulatory niklowo-kadmowe).

Jaki akumulator może pojawić się na rynku?

Obecnie największą bolączką wytwarzania energii ze źródeł odnawialnych, takich jak energia wiatrowa czy promieniowania słonecznego, jest ich nieciągłość produkcji zależna od warunków klimatycznych. Wielu ekspertów, dostrzegając ten problem, skupia się na pracach nad akumulatorami przepływowymi. Akumulatory takie przechowują energię w płynach znajdujących się w zewnętrznych zbiornikach. Głównymi składnikami takiego systemu są urządzenia, przez które przepływają płyny (one decydują o pojemności elektrycznej akumulatora) oraz zbiorniki ze wspomnianymi płynami (od ich wielkości zależy pojemność energetyczna). Wielkość tych elementów można dobierać niezależnie od siebie, zatem właściwości akumulatora można dopasować do zastosowań, co pozwala na przechowywanie energii taniej niż w przypadku tradycyjnych akumulatorów. Do przechowywania energii używa się jonów metali i żadna z istniejących metod nie pozwala na tanie przechowywanie dużych ilości energii. Wykorzystanie molekuł organicznych otworzyło całe spektrum nowych możliwości. Chinony to pierwsze molekuły powszechnie występujące w ropie naftowej i roślinach. W pierwszym chinonowym akumulatorze przepływowym wykorzystano chinon niemal identyczny z tym występującym w rabarbarze (roślina).

Superkondensatory

Superkondensatory magazynują energię w polu elektrycznym powstającym pomiędzy dwiema elektrodami węglowymi. Jako materiał na elektrody możliwe jest również wykorzystanie polimerów przewodzących elektrony. Podstawowe konstrukcje i właściwości elektryczne są zbliżone do konwencjonalnych kondensatorów, stosowanych w przemyśle elektrycznym i elektronicznym. Konstrukcja elektrod i dobór elektrolitu umożliwiając uzyskanie wysokiej gęstości ładowania na powierzchni elektrod, ale graniczne napięcie wynosi ok. 2,7 V na ogniwo (cele). Pomimo niskiego napięcia, ilość zmagazynowanej energii jest znacznie wyższa niż w kondensatorach konwencjonalnych i może osiągnąć rząd kilku Wh dla największych kondensatorów, dostępnych komercyjnie. Superkondensatory są łączone dla uzyskania większych modułów z pojemnością energetyczną do 1 kWh i dalej zestawiane w większe jednostki magazynowania energii. Superkondensatory cechuje wysoka wartość mocy wyjściowej i systemy magazynowania energii – obecnie w fazie badań – mogą dostarczać (50 – 100) kW. W wielu zastosowaniach magazynowana energia może być uzyskiwana tylko przez kilka sekund lub minut. Liczba cykli ładowanie/rozładowanie dla wszystkich praktycznych zastosowań jest niemal nieograniczona, ale ograniczony jest przepływ energii w szybkich operacjach cyklicznych. Dla bezpiecznej i niezawodnej eksploatacji, konieczne są układy kontrolno równoważące indywidualne poziomy napięć poszczególnych kondensatorów, połączonych szeregowo dla uzyskania wyższych wartości napięcia na wyjściu. Czas życia superkondensatorów jest w granicach żywotności dużych konwencjonalnych kondensatorów – 10 lat. Sprawność cyklu ładowanie/rozładowanie jest bardzo wysoka, jednak w porównaniu z akumulatorami znacząca jest prędkość samorozładowania. Superkondensatory sprawdziły się w projektach demonstracyjnych i osiągają obecnie fazę wdrożeń komercyjnych. Docelowymi zastosowaniami są układy UPS i pojazdy hybrydowe. W zastosowaniach UPS konkurują zarówno z akumulatorami jak i kołami zamachowymi przy wysokich wymaganiach mocy. W pojazdach hybrydowych są one elastyczne konstrukcyjnie, oferując wysoką moc przy wymaganej niewielkiej pojemności energetycznej. Zastosowania superkondensatorów przedstawiono na rys. 3. Dalsze badania będą skupiać się na kosztach, procesach wytwarzania, obniżeniu rezystancji początkowej. Podstawowym celem jest osiągnięcie poziomu kosztu konkurencyjnego z wartościami dla SMES, kół zamachowych i akumulatorów. Charakterystyczne dane superkondensatorów zestawiono w tabeli 3.

Odwracalne systemy ogniwo paliwowych i akumulatorów redox

Ogniwo paliwowe przetwarza wodór ze zbiornika gazu lub z układu reformującego gaz oraz tlen z powietrza atmosferycznego na wodę i generuje prąd w procesie elektrochemicznym. Reakcja elektrochemiczna jest odwracalna, jednak materiały i konstrukcja ogniwa paliwowego muszą spełniać konfliktowe wymagania przy odwracaniu reakcji. Dla magazynowania energii wymagania, typowe dla ogniwo paliwowych i elektrolizerów, muszą być połączone w jednym systemie – odwracalnym ogniwie paliwowym. Zamiast wodoru i tlenu można wykorzystać także inne materiały, np. cynk/brom oraz cynk lub tlenek wanadu. Materiały aktywne reagują gdy istnieje możliwość wymiany protonów przez elektrolit nieprzewodzący elektronów i generują prąd poprzez reakcję elektrochemiczną. Są to akumulatory o przepływie redoksowym. Ich sprawność energetyczna może być wyższa niż odwracalnych ogniwo paliwowych, ale nadal jest niższa od efektywności energetycznej, osiąganej przez większość akumulatorów.

Małe akumulatory redoksove mogą znaleźć zastosowanie w pojazdach elektrycznych, natomiast wersje większe o zakresie setek MW znajdują się jeszcze w fazie rozwoju. Celem jest ich wykorzystanie w dużych farmach wiatrowych oraz systemach energii dla wyrównania napięcia z czasem rozładowania do 24 godzin. Stosowane materiały w ogniwach paliwowych i akumulatorach redox są na ogół zagrożeniem dla środowiska i należy przedsięwziąć szczególne środki ostrożności przy budowie wielkich zbiorników dla magazynowania energii rzędu MW.

Odwracalne ogniwa paliwowe i akumulatory redox umożliwiają oddzielenie cechy wysokiej pojemności energii od maksymalnej mocy wyjściowej. Ilość zmagazynowanej energii jest określona wielkością zbiornika magazynowania materiałów aktywnych, zaś moc – poprzez powierzchnię elektrod i konstrukcję reaktora. Straty trybu czuwania („stand-by”) są niskie z powodu fizycznego oddzielenia przechowywanych materiałów aktywnych.

Technologia ogniwo paliwowych, elektrolizerów oraz akumulatorów redox jest w zasadzie opanowana. Nadal trwają badania wpływu temperatury zewnętrznej na eksploatację pomp, zaworów i innych elementów wyposażenia pomocniczego instalacji. Kluczowym problemem w rozwoju ogniwo paliwowych jest konstrukcja membran do separacji wodoru. Dane charakterystyczne odwracalnych ogniwo paliwowych zestawiono w tabeli 4.

W zastosowaniach stacjonarnych konkurencyjnymi rozwiązaniami są akumulatory ołowiowo-kwasowe, wodne elektrownie pompowe i niekiedy wzmocnienie zdolności przesyłowych sieci.

SMES – nadprzewodzące systemy magazynowania energii magnetycznej

SMES'y magazynują energię w polu magnetycznym cewki, wykonanej ze specjalnych stopów. Przez ochłodzenie przewodów do minus 269°C oporność materiału na przepływ prądu zanika, umożliwiając przewodzenie bardzo wysokich wartości prądu bez strat energii. Z punktu widzenia całości systemu konieczne jest uwzględnienie poboru energii przez układ chłodzenia. Również konieczny jest przepływ prądu przez elementy niemające cech nadprzewodnictwa oraz łączniki energoelektroniczne, w których występują straty obciążeniowe. Pomimo tego, ogólna sprawność w komercyjnych zastosowaniach jest bardzo wysoka.

Zdolność magazynowania (pojemność energetyczna) SMES w zastosowaniach komercyjnych wynosi dziś tylko ok. 1 kWh, a maksymalna moc wyjściowa do 1 MW i ograniczona przez obciążalność elementów energoelektronicznych. Koszty eksploatacyjne związane z chłodzeniem nadprzewodzących systemów magazynowania energii magnetycznej (SMES) nie są efektywne ekonomicznie dla małych wartości mocy na wyjściu. Żywotność cewki nadprzewodzącej i liczba cykli ładowanie/rozładowanie jest bardzo wysoka i przewyższa parametry wszystkich konkurujących technologii, aczkolwiek występują naprężenia mechaniczne elementów, prowadzące do zmęczenia materiału. Czas odpowiedzi SMES jest ograniczony do kilku milisekund przez prędkość, z którą przesyłany jest impuls do rozładowania i prędkość następujących po tym operacji łączeniowych elementów energoelektronicznych. W praktyce jest to czas kilku milisekund.

SMES wykazał pozytywne cechy eksploatacyjne w licznych zastosowaniach i stał się produktem komercyjnym w aplikacjach wymagających szczególnie wysokich wartości prądowych, lecz przy niskim zapotrzebowaniu energii, np. UPS-y i urządzeniach dla poprawy jakości energii w sieciach elektroenergetycznych. Kluczowymi czynnikami rozwoju SMES są: redukcja kosztów, osiągalna prawdopodobnie przez konstruowanie wysokotemperaturowych materiałów nadprzewodzących i niskotemperaturowej energoelektroniki. Koszty są również zależne od liczby jednostek, sprzedawanych w przyszłości. Dane charakterystyczne SMES zestawiono w tabeli 5.

Nadprzewodzące systemy magazynowania energii konkurują z kołami zamachowymi oraz akumulatorami w zakresie poprawy jakości energii elektrycznej. Podstawowym celem badawczym SMES jest osiągnięcie konkurencyjnej ceny w odniesieniu do innych technologii magazynowania energii.

Koła zamachowe (bezwładniki)

Energia jest magazynowana w postaci energii kinetycznej masy wirującej. Wartość zgromadzonej energii wzrasta wraz z kwadratem prędkości kątowej wirowania, która jest ograniczona wytrzymałością stosowanego materiału do budowy koła. Materiały lekkie umożliwiają osiągnięcie wyższych prędkości niż materiały cięższe o tej samej wytrzymałości na rozciąganie i przez to mogą zmagazynować większą energię. Wirniki, zbudowane z tworzyw sztucznych, wzmocnione włóknami o wysokich wartościach wytrzymałości na rozciąganie i osiągające prędkości do 100 000 obr/min, mogą zmagazynować więcej energii na jednostkę objętości niż wirniki wykonane z wysokowytrzymałej stali o prędkości 10 000 obr/min (koła zamachowe wolnoobrotowe). Koło zamachowe jest sprzęgane z konwencjonalną prądnicą, wytwarzającą energię elektryczną z wyhamowania energii kinetycznej wirującej masy (rys. 4). Koła zamachowe mogą dostarczać wysoką moc, ograniczoną przez parametry generatora i energoelektroniki. Największe dostępne handlowo koło zamachowe może dostarczyć 1,6 MW przez 10 sekund. Odpowiada to ilości energii ok. 4,4 kWh. Czas odpowiedzi koła zamachowego, jako magazynu, jest ograniczony do kilku milisekund przez prędkość, z którą przesyłany jest impuls do rozładowania i prędkość następujących po tym operacji łączeniowych elementów energoelektronicznych. Liczba cykli ładowanie/rozładowanie koła zamachowego jest limitowana jedynie przez efektywność chłodzenia układu elektrycznego i energoelektroniki. Tarcie o otaczające powietrze stanowi podstawowy powód strat. Wolnoobrotowe koła zamachowe (do ok. 10 000

Rys. 4. Wirujące koła zamachowe (bezwładnik) magazynem energii

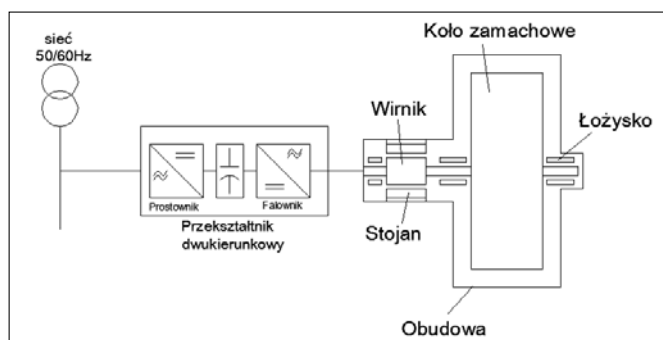


Tabela 5. Magazynowanie energii. Nadprzewodzące magazynowanie energii magnetycznej [2]

Gęstość energii i mocy	Pomijalny potencjał energii (do 1 kWh), ale bardzo wysokie wyjście mocy (3 MVA). Dane dla gęstości energii i mocy są bezużyteczne dla zastosowań w zakresie poprawy jakości energii
Koszt/ekonomika skali	Najmniejsze dostępne jednostki mają wyższe wyjście mocy niż jakakolwiek technologia konkurencyjna za wyjątkiem elektrowni wodnych pompowych oraz dużych obiektów na sprężone powietrze. Koszt wyposażenia oraz niski poziom sprzedaży wykluczają konkurencyjność dla małych mocy
Czas odpowiedzi	Kilka milisekund z uwagi na obwody sterowania i energoelektronikę
Czas życia	Bez ograniczeń liczby cykli, łatwy monitoring
Sprawność	Gwarantowana 99% dla zastosowań kontroli jakości energii

Rys.5. Poprawa jakości wytwarzanej energii elektrycznej przez elektrownię wiatrową we współpracy z kołem zamachowym

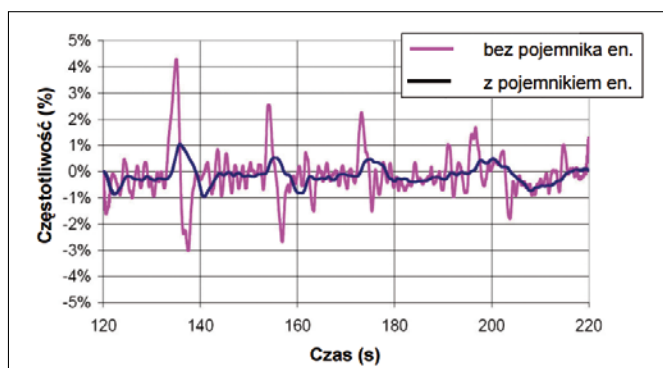
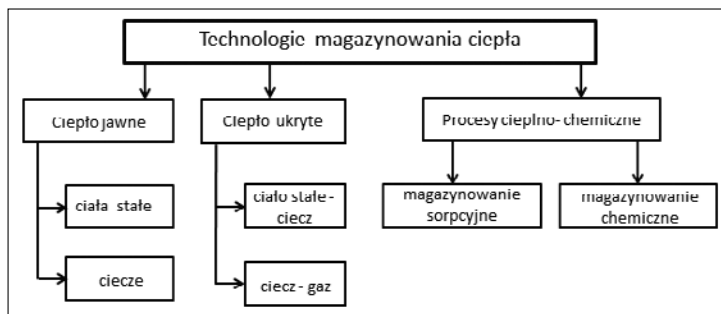
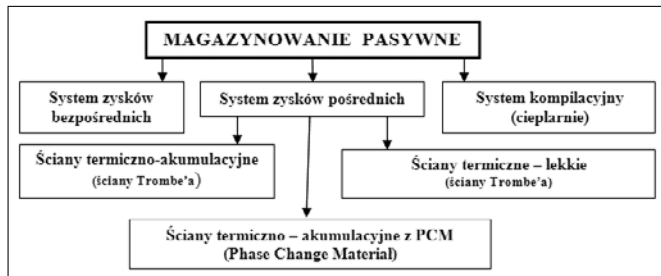


Tabela 6. Magazynowanie energii. Koła zamachowe [2]

Gęstość energii i mocy	Gęstość energii ok. 0,01 kWh/kg; zdolność magazynowania energii (1 – 10) kWh w zakresie mocy od 300 kW do 2 MW
Koszt/ekonomika skali	Moc większa niż 100 kW
Czas życia	Bez ograniczeń liczby cykli, prosty monitoring i długi ogólny czas życia
Sprawność	Ponad 95%, ale straty w trybie czuwania 100%/dobę

Tabela 7. Fizyczne właściwości niektórych związków chemicznych stosowanych w zasobnikach ciepła utajonego [4]

Nazwa związku	Wzór chemiczny	Gęstość w kg/m ³	Temperatura topnienia w °C	Ciepło topnienia w kJ/kg
Sól glauberska	Na ₂ SO ₄ ·10H ₂ O	1460	32	250
Soda krystaliczna	Na ₂ CO ₃ ·10H ₂ O	1440	34	250
Węglan sodowy	Na ₂ CO ₃ ·7H ₂ O	1510	32	265
Chlorek żelazowy	FeCl ₃ ·6H ₂ O	1620	37	220
Tiosiarczan sodowy	Na ₂ S ₂ O ₃ ·5H ₂ O	1650	48,5	100
Octan sodowy	Na ₂ C ₂ H ₃ O ₂ ·3H ₂ O	1450	58	265
Ortofosforan trójsodowy	Na ₃ PO ₄ ·12H ₂ O	1620	75	190
Wosk parafinowy		785	50	210
Kwas stearynowy	C ₁₇ H ₃₅ COOH	1430	71	200

**Rys. 6. Aktywne sposoby magazynowania ciepła i chłodu****Rys. 7. Pasywne systemy magazynowania ciepła i chłodu w materiałach i elementach budowlanych**

Magazynowanie termiczne (ciepło/chłód) [4,5]

Stosowane sposoby magazynowania ciepła i chłodu klasyfikowane są następująco:

- magazynowanie aktywne (rys. 6):
 - z wykorzystaniem ciepła właściwego ciał (ciepło jawne),
 - ciepła przemian fazowych (ciepło utajone, ciepło ukryte),
 - ciepła przemian chemicznych i fotochemicznych;
- magazynowanie pasywne w elementach konstrukcyjnych budowlanych (rys. 7).

Zasobniki na ciepło jawne są nadal najbardziej powszechne. Substancjami akumulującymi ciepło są woda oraz ciała stałe (skały, kamienie, żwir). Woda jest łatwo dostępna (cenowo i ilościowo) i charakteryzuje się dużą właściwą, objętościową pojemnością cieplną – wynoszącą 1,16 kWh/(m³ K). Właściwa pojemność cieplna skał, kamieni, żwiru, cegły, betonu jest o 50% niższa niż wody, zatem wymagana objętość złoża tych zasobników musi być znacznie większa od zasobnika wodnego dla tej samej ilości ciepła. Stosowanie wody do celów chłodniczych w stanie ciekłym ma ograniczenia w jej wykorzystaniu wynikające z niewielkiego, możliwego przyrostu temperatury czynnika chłodzącego nieprzekraczającego w praktyce kilku stopni. Przy przyroście temperatury o 5K zdolność akumulacyjna 1m³ wody wynosi 6 kWh. Praktycznie eliminuje to wodę w tej postaci z zastosowań w chłodnictwie. W chłodnictwie znajduje zastosowanie energia gromadzona lub uwalniana podczas przemian fazowych substancji zachodzących w stałej temperaturze (przy niezmiennym ciśnieniu). Energia absorbowana lub uwalniana podczas tego procesu jest z reguły wielokrotnie większa niż energia niezbędna do zmiany temperatury substancji. Ciepło potrzebne do stopienia 1 m³ lodu w temperaturze 0°C wynosi 93 kWh. W magazynach na ciepło utajone znajdują zastosowanie również uwodnione sole, których właściwości zestawiono w tabeli 7.

W magazynach chemicznych wykorzystuje się możliwość przechowywania i odzyskiwania ciepła na drodze odwracalnych reakcji endo – i egzotermicznych. Zasobniki chemiczne mają możliwość gromadzenia ciepła w małych zbiornikach i znajdują zastosowa-

nie (obr/min) są zatem umieszczane w pojemnikach wypełnionych helem (dla ograniczenia tarcia), zaś koła wysokoobrotowe utrzymywane są w próżni. Straty trybu czuwania są znaczące, ale sprawność wyjście/wejście jest bardzo wysoka. Czas życia zależy od zastosowanego łożyskowania. W kołach wolnoobrotowych łożyska są produktem komercyjnym o wieloletniej żywotności i łatwym monitoringu eksploatacyjnym. Dla kół szybkoobrotowych zalecane są bezstykowe łożyska magnetyczne.

Na terenie Europy użytkuje się kilkaset wolnoobrotowych kół zamachowych w zastosowaniach komercyjnych, np. w UPS dla dostawców internetu i podtrzymywania zasilania w energię specjalnych maszyn. Koła zamachowe wysokoobrotowe mają zastosowanie w transporcie z uwagi na znacznie mniejszy ciężar. W zastosowaniach stacjonarnych są coraz częściej wykorzystywane do poprawy jakości energii elektrycznej wytwarzanej przez elektrownie wiatrowe (rys. 5). Badania w zakresie kół zamachowych skupiają się na ulepszeniu materiałów kompozytowych do ich budowy, zmniejszeniu strat łożyskowych i ograniczeniu kosztów eksploatacyjnych. Przedmiotem badań są również aspekty bezpieczeństwa i obudowy dla zastosowań mobilnych. Cechy charakterystyczne kół zamachowych zestawiono w tabeli 6.

Koła zamachowe konkurują ze SMES w zastosowaniach wymagających dostarczenia mocy rzędu 1 MW przez okres (1 – 2) sekund i z akumulatorami, gdy czas podtrzymania zasilania w energię musi być dłuższy niż 15 sekund.

nie w mobilnych zasobnikach ciepła, które można transportować na duże odległości [4].

Pasywne systemy magazynowania ciepła w budynkach

Pasywne systemy magazynowania ciepła promieniowania słonecznego umożliwiają gromadzenie nadmiaru ciepła w godzinach największego nasłonecznienia i oddawanie go w godzinach nocnych, a także w dni chłodne.

Rozróżnia się następujące systemy magazynowania energii promieniowania słonecznego:

- z bezpośrednim pochłanianiem ciepła,
- z pośrednim pochłanianiem ciepła,
- z wyizolowanym magazynem ciepła w elementach kamiennych pod podłogą.

W pasywnych systemach wykorzystuje się głównie pojemność cieplną materiałów i ciepło przemian fazowych. W pierwszym z tych systemów, operując roletami, okiennicami, kolorami ścian i podłóg, a także stosując dywany i kilimy, można zmieniać proporcje zaabsorbowanej i odbitej energii bezpośredniego promieniowania słonecznego. Energia zaabsorbowana zamienia się na ciepło i może być, w zależności od grubości ścian i podłóg, zmagazynowana nawet przez kilka miesięcy. W systemach pośrednich rolę akumulatorów ciepła spełniają dodatkowe elementy absorbujące: stacjonarne (ceramiczne, metalowe, kamienne, z zamkniętymi zbiornikami wodnymi), tzw. ściany Trombe'go, lub przesuwne (akwaria, kwietniki itp.). Systemy z odizolowaną częścią absorpcyjną, taką funkcję może spełniać: zbiornik wodny umieszczony na dachu, dodatkowe pomieszczenie lub kamienne złożę w piwnicy. Zastosowanie zbiornika dachowego z układem odsuwanych i zasuwanych rolet umożliwia magazynowanie ciepła latem oraz „doładowanie” zimą, wiosną i jesienią w dni słoneczne, oraz oddawanie go w godzinach nocnych. W rozwiązaniu tym rolety spełniają dwie funkcje:

- w słoneczne, letnie dni odbijają promieniowanie,
- zimą izolują ciepło, zgromadzone w magazynie, zabezpieczając przed stratami do otoczenia.

Ponadto w okresie upałów zbiornik dachowy odgrywa rolę pasywnego systemu chłodzenia.

Zbiorniki do magazynowania ciepła w nośniku energii

W zbiorniku o objętości wewnętrznej V_B można zmagazynować ciepło, którego wartość można obliczyć z zależności [5]:

$$Q_{max} = V_B(\rho_1 c_1 t_1 - \rho_2 c_2 t_2), \quad (1)$$

gdzie:

- V_B – objętość wewnętrzna zbiornika,
- t_1 – temperatura wody w górnej części zbiornika,
- t_2 – temperatura wody w dolnej części zbiornika,
- c_1 – ciepło właściwe wody o temperaturze t_1 ,
- c_2 – ciepło właściwe wody o temperaturze t_2 ,
- ρ_1 – gęstość wody o temperaturze t_1 ,
- ρ_2 – gęstość wody o temperaturze t_2 .

Jednostkową zdolność magazynowania ciepła w 1 m³ wody można obliczyć z zależności

$$q = \rho_1 c_1 t_1 - \rho_2 c_2 t_2 \quad (2)$$

Jednostkową zdolność magazynowania ciepła w wodzie w funkcji różnicy temperatur w górnej i dolnej części zbiornika przedstawiono na rys.8.

Przy ładowaniu zbiornika, z idealną stratyfikacją termiczną w postaci termokliny o temperaturze górnej strefy – t_1 , dolnej – t_2 , magazynowana w czasie energia wyniesie:

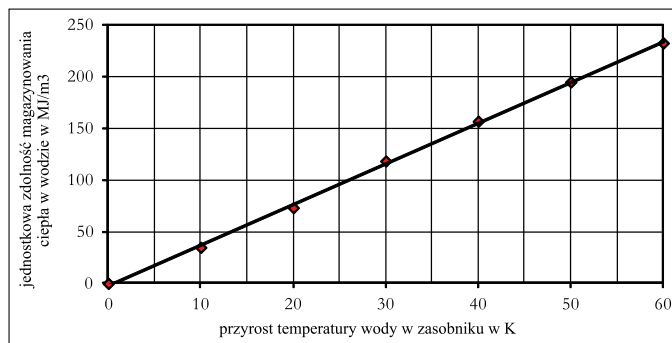
$$Q_{str} = m^* \cdot (c_1 t_1 - c_2 t_2) \tau, \quad (3)$$

w którym:

- m^* – masowe natężenie przepływu wody w rurociągu zasilającym zbiornik,
- τ – okres ładowania.

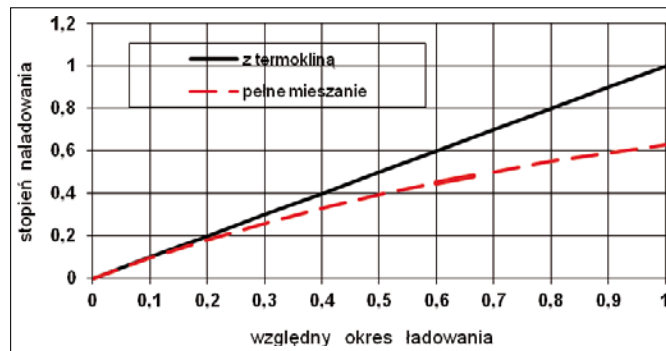
Tabela 8. Magazynowanie energii. Magazynowanie ciepła i chłodu [2]

Zdolność magazynowania	Potencjał magazynowanej energii wynika z wielkości zbiornika, zaś moc wynika z wymiarów wymiennika ciepła. Typowa gęstość energii do 0,1 kWh/kg
Koszt/ekonomika skali	Dzięki różnorodności zastosowań planowanie i budowa wielkich systemów powoduje bardzo wysokie koszty, małe instalacje zasobnikowe są produktami standardowymi.
Koszt udostępnienia inwestycji	Koszty udostępnienia inwestycji są bardzo niskie i konkurują z bezpośrednim kosztem paliwa
Czas życia	Dla większości systemów ponad 10 lat, czynnikiem ograniczającym jest stabilność termiczna materiałów magazynujących. Dla systemów wodnych czas życia układów przekracza 20 lat
Straty w trybie czuwania	Ważny czynnik podlegający analizie, zwłaszcza dla systemów termochemicznych. Konieczna dobra i starannie wykonana izolacja.



Rys. 8. Jednostkowa zdolność magazynowania ciepła w zasobniku wodnym

Rys.9. Stopień wykorzystania objętości zasobnika ciepła z stratyfikacją termiczną w odniesieniu do zbiornika z pełnym zmieszaniem zawartości



Okres ładowania zbiornika τ zawiera się w zakresie:

$$0 \leq \tau \leq \frac{M}{m^*} \quad (4)$$

w którym:

$$M = V_B \rho_1 \quad (5)$$

gdzie:

M – masa wody w zbiorniku o objętości V_B .

Zbiornik z pełnym zmieszaniem warstw wody (bez stratyfikacji termicznej) może zmagazynować w tym samym okresie ciepło

$$Q_{mix} = m^* (c_1 t_1 - c_2 t_2) \left[1 - \exp\left(-\tau \frac{m^*}{M}\right) \right], \quad (6)$$

a stopień wykorzystania objętości zasobnika ciepła do magazynowania ciepła wynosi

$$\frac{Q_{mix}}{Q_{str}} = 1 - \exp\left(-\tau \frac{m^*}{M}\right). \quad (7)$$

Porównanie stopnia wykorzystania objętości zbiornika zasobnika ciepła z pełną stratyfikacją i z pełnym mieszaniem w funkcji bezwymiarowego czasu przedstawiono na rys.9.

Stratyfikacja termiczna w zbiorniku zależy głównie od objętości i kształtu zbiornika, lokalizacji króćców wlotowych (dyfuzorów) i wylotowych (konfuzorów) oraz sposobu rozprowadzania wchodzącej do zbiornika wody, a także od właściwego rozmieszczenia wewnątrz zbiornika elementów potencjalnie zaburzających stratyfikację. W prawidłowo zaprojektowanej i eksploatowanej instalacji stratyfikacja w zbiorniku wytwarza się samorzutnie, a jej brak świadczy o niewłaściwej konstrukcji zbiornika lub źle dobranych parametrach eksploatacyjnych. Wykorzystanie objętości zbiornika do magazynowania ciepła zmniejsza się prawie o 40 % przy pełnym zmieszaniu zawartości wody w zasobniku.

Przykładem magazynowania ciepła może być podziemny zasobnik ciepła o pojemności 105 000 m³ w Lyckebo (Szwecja), współpracujący z kolektorami słonecznymi o powierzchni 4300 m², ogrzewającymi w lecie wodę w zbiorniku, uzyskując 19800 GJ ciepła. Zgromadzone ciepło w zbiorniku umożliwia zaopatrzenie 550 domów jednorodzinnych w 90% ciepła w zimie. Układ wyposażony jest w pompę ciepła. W tabeli 8 zestawiono charakterystyczne cechy zasobników ciepła i chłodu.

c.d. artykułu w następnym numerze Instal