

## Magazynowanie energii elektrycznej i gospodarka wodorowa

**Streszczenie.** W artykule dokonano przeglądu aktualnych technologii magazynowania energii elektrycznej oraz zestawiono uzyskiwane parametry w aspekcie zastosowań w zasobnikach systemowych. Przedstawiono studium możliwości magazynowania energii z odnawialnych źródeł energii (OZE) w zasobnikach akumulatorowych i elektrowniach szczytowo-pompowych w Polsce. Omówiono także możliwości wykorzystania systemów zasobnikowych w transporcie dla wykorzystania energii hamowania. Drugą część artykułu prezentuje wodór jako nośnik energii oraz zagadnienia związane z gospodarką wodorową: produkcja, transport, magazynowanie i zastosowania w ogniwach paliwowych.

**Abstract.** This article reviews the up-to-dated energy storage technologies for electricity and summarizes the parameters achieved in terms of applications in the large systems. It presents study of the possibility of storing energy from renewable energy sources (RES) in the battery storage and pumped storage power plants in Poland. Also discusses the possibilities of using energy storage in the transport system for the use of braking energy. The second part of the article presents hydrogen as an energy carrier and issues related to the economy of hydrogen: production, transport, storage and use in dedicated applications in fuel cells. (**Storage of electrical energy and hydrogen economy**).

**Słowa kluczowe:** technologie magazynowania energii, wielkie systemowe zasobniki energii, zasobniki energii w transporcie, wodór i gospodarka wodorowa, ogniwa paliwowe.

**Keywords:** energy storage technologies, large system energy storage, energy storage in transport, hydrogen and hydrogen economy, fuel cells.

Artykuł jest piątym z planowanej serii sześciu publikacji prezentujących Raport „Energia Elektryczna Dla Pokoleń” (REEDP), przyjęty 16 marca 2016 r. przez ZG SEP i 11 kwietnia 2016 r. przez II Kongres Elektryki Polskiej, a następnie wsparty wspólną uchwałą XXV Kongresu Techniki Polskiej i III Światowego Zjazdu Inżynierów Polskich z 17 czerwca 2016 roku.

Dysponentem raportu jest ZG SEP.<sup>1</sup> Jest to studium wielopokoleniowej strategii rozwojowej obejmującej problematykę zapewnienia podstaw bezpieczeństwa energetycznego Polski w realiach XXI wieku. Raport ma charakter ekspercki, a jego adresatami są główni decydenci polityczni: Prezydent, Sejm i Senat, Premier i Rada Ministrów, właściwe urzędy centralnej administracji państwowej oraz właściwe instytucje ze sfery B+R, podmioty gospodarcze i organizacje pozarządowe.

### Wprowadzenie

Ostatnie lata zainicjowały proces nowej znaczącej transformacji w elektroenergetyce polegający na rozwoju systemów sieci inteligentnych (ang. Smart Grids). Sieć inteligentna [1], [2] pozwala na integrację na szeroką skalę z systemem elektroenergetycznym (SEE) nowych elementów jakimi są odnawialne źródła energii (OZE) oraz magazyny (zasobniki) energii elektrycznej instalowane na każdym poziomie sieci. Rozpowszechnienie na szeroką skalę tych elementów, szczególnie na poziomie sieci dystrybucyjnej, diametralnie zmieni kształt funkcjonowania całego sektora. Zasobniki i źródła OZE będą odgrywać strategiczną rolę w równoważeniu bilansu SEE, zapewnienia ciągłości zasilania, jakości energii oraz optymalizacji kosztów zaopatrzenia w energię. Obecnie rozwój generacji z OZE napotyka w dalszym ciągu na liczne problemy. Wynikają one głównie z uzależnienia pracy OZE

od warunków atmosferycznych, pory doby i roku, a także z ograniczeń przyłączania OZE w Krajowym Systemie Elektroenergetycznym (KSE). Problemy te można łagodzić poprzez implementację na szeroką skalę w systemie elektroenergetycznym odpowiednich magazynów (zasobników) energii. Pozwalają one na: ograniczenie zmienności generacji ze źródeł odnawialnych, magazynowanie nadmiaru energii w dolinach zapotrzebowania, oddawanie energii do systemu w szczycie. Przyczyniają się tym samym do: maksymalizacji przychodów wytwórcy ze sprzedaży energii, poprawy bilansu w systemie. Zastosowanie zasobników energii pozwala także na: przyłączenie większej ilości OZE, ograniczenie konieczności rozbudowy linii elektroenergetycznych na potrzeby przyłączy. Obecnie systemy magazynowania energii są w dalszym ciągu dość kapitałochłonne. Niemniej jednak w związku z ciągłym postępowaniem technologicznym oraz utrzymującym się spadkiem cen technologii, należy oczekiwać coraz szerszego stosowania zasobników energii we wszystkich obszarach wytwarzania, przesyłu oraz użytkowania energii elektrycznej.

### Rodzaje technologii magazynowania energii elektrycznej

Podstawowym zagadnieniem wymagającym rozważenia przy zastosowaniu zasobników (magazynów) energii elektrycznej jest ich funkcja celu. Parametry użytkowe takie jak: dostępna moc elektryczna, pojemność, czas życia w cyklach pracy magazynu, sprawność przemiany energii, a także koszt wytworzenia jednostki mocy lub energii, mogą się diametralnie różnić w zależności od rodzaju analizowanej technologii. W kolejnych podpunktach opisano najważniejsze, najbardziej rozpowszechnione technologie stosowane w celach magazynowania energii wraz z przykładami istniejących instalacji [3], [4], [7], [20]. Parametry wybranych technologii podano w Tabeli 1.

<sup>1</sup> Raport został wydany na zlecenie ZG SEP w formie książki przez Centralny Ośrodek Szkolenia i Wydawnictwo SEP – COSiW, ISBN 978-83-61163-64-0. Dostęp do REEDP i dokumentów związanych: [www.sep.com.pl](http://www.sep.com.pl)

#### ❖ WIELKIE SYSTEMOWE ZASOBNIKI WODNE

Wodne elektrownie szczytowo-pompowe ESP (ang. Pumped-Storage Hydropower – PSH) są znane i szeroko wykorzystywane do akumulacji energii. Charakteryzują się dużymi mocami (nawet do 4000 MW), wysokimi nakładami inwestycyjnymi, długim czasem budowy, lecz także długim czasem życia. Ich czas generacji w pojedynczym cyklu elektrowni wynosi kilka godzin. Największą elektrownią tego typu w Polsce jest położona w województwie pomorskim elektrownia wodna Żarnowiec. Jej budowę rozpoczęto w 1973 r., a do eksploatacji została oddana dziesięć lat później. Posiada moc 716 MW i 800 MW odpowiednio dla pracy prądnicowej oraz pracy pompowej. W sumie elektrownie ESP w Polsce osiągają moc 1,76 GW i energię 7,8 GWh (patrz Tabela 3.)

#### ❖ WIELKIE SYSTEMOWE ZASOBNIKI PNEUMATYCZNE

Elektrownie wykorzystujące systemy sprężonego powietrza SPS (Compressed Air Energy Storage – CAES) wykorzystywane są do akumulacji energii. Zasobniki tego typu to technologia dojrzała, jednak dalej rozwijana w nowych odmianach. Technologia ta wymaga znacznych nakładów inwestycyjnych. Charakteryzuje się dużymi mocami (do 400 MW) oraz czasem generacji w pojedynczym cyklu elektrowni rzędu kilkunastu godzin. W Europie znajduje się jedna instalacja tego typu w Huntorf. Niemiecka elektrownia posiada moc 321 MW i 70 MW odpowiednio dla pracy prądnicowej i sprężarkowej. Praca prądnicowa przy pełnej mocy elektrowni jest możliwa przez 3 godziny dzięki dwóm kavernom na sprężone powietrze o pojemności ok. 300 000 m<sup>3</sup>.

#### ❖ ZASOBNIKI KINETYCZNE WYKORZYSTUJĄCE MASY WIRUJĄCE

Wirujące koła zamachowe KZ (ang. Flywheels – FW) to technologia dojrzała i wykorzystywana do celów regulacyjnych. Najbardziej rozpowszechnione elektrownie tego typu znajdują się w USA, Australii i w Europie. Technologia ta charakteryzuje się szybkim czasem reakcji (<4 sekund), dużą ilością ekwiwalentnych cykli oraz stosunkowo niskimi kosztami eksploatacji. Jedną z takich instalacji jest elektrownia w Stephentown, Nowy York, o mocy ok. 20 MW i czasie oddawania mocy ok. 15 minut. Stosowana jest do regulacji częstotliwości w systemie lokalnego operatora sieci.

#### ❖ ZASOBNIKI ELEKTROCHEMICZNE STAŁE - AKUMULATORY

Technologia polegająca na przemianie elektrochemicznej, która cechuje się znacznym potencjałem rozwoju. Ze względu na rodzaj elektrolitu możemy wyróżnić między innymi następujące rodzaje baterii: sodowo-siarkowe, litowo-jonowe, litowo-polimerowe, czy też kwasowo-ołowiowe. Wiele innych typów baterii znajduje się w fazie przedkomercyjnej. Akumulatory mają ogromny zakres zastosowania. Między innymi stanowią podstawowy element zasilania przenośnych urządzeń elektronicznych, samochodów elektrycznych, a w krajach wysoko rozwiniętych w gospodarstwach domowych, pełnią rolę banków energii w instalacjach prosumenckich. W maju 2015 r. firma Tesla – potentat w branży samochodów elektrycznych zaprezentowała nowe produkty pod nazwą Powerwall – baterie o pojemności 7 i 10 kWh dostępne już za cenę odpowiednio 3-3,5 tys. dolarów. Łącząc tego typu baterie z panelami fotowoltaicznymi, każdy odbiorca energii elektrycznej będzie mógł znacząco zredukować pobór energii z sieci, zarówno za dnia, jak i w nocy. Baterie elektrochemiczne wykorzystywane są także jako przemysłowe instalacje o dużej pojemności i mocy do

kilkudziesięciu megawatów, służące m.in. do integracji OZE z systemem elektroenergetycznym. Przykładami takiego wykorzystania akumulatorów są instalacja Duke Energy (Teksas, USA, baterie kwasowo-ołowiowe) o mocy 36 MW i pojemności 238 MWh, do współpracy z farmą wiatrową 153 MW, lub instalacja w Honshu (prefektura Aomori, Japonia, baterie sodowo-siarkowe) o mocy 34 MW i pojemności 238 MWh, współpracująca z farmami wiatrowymi o łącznej mocy 51 MW. W Polsce, w ramach programu Generator Koncepcji Ekologicznych (Gekon), realizowana jest we Władysławowie instalacja kontenerowych baterii litowo-jonowych o pojemności 1,5 MWh i mocy 0,75 MW.

#### ❖ ZASOBNIKI ELEKTROCHEMICZNE PRZEPLYWOWE

Baterie przepływowe BP (ang. Flow Battery – FB) to technologia stacjonarna wykorzystująca przemianę elektrochemiczną. Stosowana w akumulacji energii w zastosowaniach stacjonarnych. Cechuje się dużą możliwością skalowania instalacji zależną od liczby ogniw oraz ilości wykorzystywanego elektrolitu. Przykładowa instalacja tego typu to Prudent Energy znajdująca się w Gills Onions, Oxnard w Kalifornii (USA). Jej moc zainstalowana wynosi 600 kW, a pojemność 3600 kWh. W Europie w Tussenhausen (Bawaria), uruchomiono ostatnio baterię wanadową Renox (ang. Vanadium Redox Flow – VRF) o mocy 200 kW i pojemności 400 kWh w lokalnej sieci współpracującej z systemem ogniw fotowoltaicznych o mocy maksymalnej 560 kW. Z punktu widzenia operatorów sieci technologia BP są niezwykle obiecujące, bo oferują: stosunkowo wysoką moc i pojemność przy względnie niskich cenach jednostkowych, długą żywotność, niemal nieograniczoną liczbę cykli ładowania, a także mogą być całkowicie rozładowywane. Dzięki modułowej konstrukcji, pojemność baterii może być łatwo zwiększona. Bateria prawie nie wymaga konserwacji.

#### ❖ SUPERKONDENSATORY

Superkondensatory SC (ang. Super Caps – EDLC) zwane też ultrakondensatorami, są specyficznej budowy kondensatorami elektrolitycznymi gromadzącymi energię w polu elektrycznym. Ich działanie polega na gromadzeniu ładunków elektrycznych w obrębie podwójnej warstwy elektrycznej (ang. Electric Double Layer – ELD), która powstaje na granicy ośrodków elektroda – elektrolit. Dzięki zastosowaniu nowoczesnych nanotechnologii elektrody węglowe, co pozwala osiągnąć olbrzymie powierzchnie właściwe (przekraczające nawet 2000 m<sup>2</sup> na jeden gram elektrody), co zapewnia ogromne pojemności, rzędu kilku tysięcy faradów. SC charakteryzują się niską gęstością energii rzędu 10 Wh/kg, bardzo dużą gęstością mocy (pobór dużej energii w krótkim czasie) – kształtującą się nawet na poziomie 10000 W/kg, wysoką sprawnością (nawet przekraczającą 95%), bardzo dużą trwałością (zarówno wyrażaną w postaci czasu eksploatacji szacowanego na 20 lat, jak i wysoką liczbą cykli ładowania-rozładowania do około 100000), krótkimi czasami uzupełniania energii (rzędu kilku minut), możliwością pracy w szerokim zakresie temperatur (-40°C ÷ 65°C), niewielką degradacją własności użytkowych przy wielokrotnych cyklach ładowania i rozładowania, a także małą szkodliwością dla środowiska. Zasobniki SC znajdują zastosowanie głównie w transporcie oraz systemach UPS, często współpracując z akumulatorami elektrochemicznymi.

Tabela 1. Parametry wybranych technologii magazynowania energii [5]

Parametry/ Technologia	Moc [MW]	Czas pracy	Liczba cykli (czas życia)	Gęstość energii (Wh/l)	Gęstość mocy (W/l)	Sprawność cyklu	Czas reakcji
Szczytowo- pompowe (ESP)	100 - 1000	4 - 12h	30 - 60 lat	0,2 - 2	0,1 - 0,2	70-85%	sek-min
Sprężone powietrze (SPS)	10 - 1000	2 - 30h	20 - 40 lat	2 - 6	0,2 - 0,6	40-75%	sek-min
Koła zamachowe (KZ)	0,001 - 1	sekundy- godziny	20000 - 100000	20 - 80	5000	70-95%	< sek
Baterie NaS	10 - 100	1 min - 8h	2500 - 4500	150 - 300	120 - 160	70-90%	< sek
Baterie Li-ion	0,1 - 20	1 min - 8h	1000 - 10000	200 - 400	1300 - 10000	85-98%	< sek
Baterie prze- pływowe (BP)	0,1 - 100	10h	12000 - 14000	20 - 70	0,5 - 2	60-85%	< sek
Superkonden- satory (SC)	0,01 - 1	ms - min	10000 - 100000	10 - 20	40000-120000	80-98%	< sek
Nadprzewodniki (SMES)	0,1 - 1	ms - sek	100000	~6	~2600	80-95%	< sek
Ciekła sól	1 - 150	godziny	30 lat	70 - 210	n/a	80-90%	min
Wodór	0,01 - 1000	minuty- tygodnie	5 - 30 lat	600	0,2 - 20	25-45%	sek-min
Gaz syntezowy	50 - 1000	godziny- tygodnie	30 lat	1800	0,2 - 2	25-50%	sek-min

#### ❖ INNE ZASOBNIKI ENERGII

Wśród pozostałych technologii magazynowania, należy wymienić nadprzewodzące zasobniki magnetyczne gromadzące energię w polu magnetycznym (ang. Superconducting Magnetic Energy Storage – SMES) [5] oraz zasobniki rozproszone określane jako Vehicle-to-Grid (V2G) [6], które wykorzystują energię akumulatorów w pojazdach elektrycznych dołączonych do sieci poprzez ładowarki dwukierunkowe. Technologie te są rzadko wykorzystywane i znajdują się ciągle w fazie rozwoju.

#### ❖ PARAMETRY WYBRANYCH ZASOBNIKÓW ENERGII

W Tabeli 1. podano orientacyjne parametry wybranych technologii magazynowania energii elektrycznej. Najwyższą sprawnością cyklu (powyżej 90%) charakteryzują się koła zamachowe (KZ), baterie litowo-jonowe, superkondensatory (SC) oraz zasobniki nadprzewodnikowe (SMES). Do celów związanych z poprawą jakości energii stosowane są zasobniki charakteryzujące się wysoką dynamiką, czyli odpowiednim poziomem mocy rozładowania i szybkim czasem reakcji. Pojemność w tym przypadku ma drugorzędne znaczenie. W układach stanowiących wsparcie przy świadczeniu usług regulacyjnych bądź też przy wyrównywaniu obciążeń dobowych najbardziej istotna jest pojemność zasobników.

#### Magazynowanie energii elektrycznej produkowanej przez OZE – Studium możliwości

##### ❖ MAGAZYNOWANIE ENERGII OZE W UKŁADACH AKUMULATOROWYCH

Najtańszym rozwiązaniem jest magazynowanie energii OZE w elektrowniach szczytowo pompowych ESP [ZG6-2]. Możliwość budowy takich elektrowni są jednak ograniczone przez warunki geograficzne. Najpierw będą rozpatrzone możliwości i koszty magazynowania energii w układach akumulatorowych. Koszty magazynowania energii OZE przy wykorzystaniu różnych systemów akumulatorowych podano przykładowo w Tabeli 2. Koszty energii uśrednione w cyklu całego życia LCOE (ang. *levelized cost of stored energy - LCOE*) obliczono dla ogniw fotowoltaicznych jako stosunek kosztów poniesionych w ciągu całego okresu eksploatacji elektrowni do ilości wytworzonej przez nią energii elektrycznej. Tę samą definicję zastosowano do

układów magazynowania energii [7]. Wobec tego, że układ magazynowania energii nie może energii generować, cena wewnętrznego transferu energii jest miarą wartości magazynowanej energii w danym okresie czasu, tzn. cena ta określa koszt, po jakim system magazynowania energii kupuje energię z systemu wytwarzania, z sieci lub z innych źródeł. Jak widać, koszty magazynowania energii w akumulatorach są wysokie – nie zawsze do przyjęcia w rozwiązaniach na dużą skalę.

##### ❖ MOŻLIWOŚCI MAGAZYNOWANIA ENERGII OZE W ESP W POLSCE

Polska (dane z 2013 r.) zużywa rocznie 160 036 GWh [9]. Wg propozycji Greenpeace wiatr powinien dostarczać średnio moc  $0,22 \times 160\,036 \text{ GWh} / (365 \text{ d} \times 24 \text{ h/d}) = 4 \text{ GW}$ . Gdyby tę moc wliczać do bilansu mocy w polskim systemie, to w przypadku braku pracy elektrowni wiatrowych należy ten deficyt pokrywać ze zbiorników regulacyjnych elektrowni wodnych [ZG6/2]. Całkowite dobowe możliwości produkcyjne wszystkich ESP (Tabela 3) to: moc osiągalna 1,76 GW, dobowo produkcja 7,8 GWh (przy opróżnianiu zbiorników ESP bez dopompowywania i przy czasach ich pracy 3-5 godzin/dobę).

Przy zmagazynowanej energii 7,8 GWh, zbiorniki wodne mogą zastąpić brak wiatru przez  $7,8/4 =$  niecałe 2 godziny.

Przerwy w dostawach energii wiatrowej rzędu 5 dni są uważane za normalne, a bywają i dłuższe. Co ma zrobić gospodarka polska przez czas 118 godzin, to jest od 2 godz. na jakie wystarczą rezerwy, do 5 dni po których pojawi się znów wiatr?

Poprzez produkcję wodoru także nie da się odzyskać energii elektrycznej, ponieważ obliczenia wykazują, że łączne straty (przekształcanie DC-AC, elektroliza, turbina gazowa + prądnicą) w stosunku do energii wyjściowej wynoszą przynajmniej 80%, głównie w postaci ciepła odpadowego.

Ta mała część energii wiatru, która pozostaje, kosztuje po takim „procesie magazynowania” pięć razy więcej niż początkowa energia wiatru, która już i tak jest droga [11]. Trzeba więc dysponować elektrowniami pozostającymi w rezerwie oraz pokrywać ich koszty inwestycyjne i koszty pracy przy obniżonej mocy lub pozostawiania w stanie rezerwy.

Tabela 2. Charakterystyka elektrochemicznych zasobników energii dla OZE [8].

Parametr	BP Redox-Flow	Litowo-jonowe	Ołowowo-kwasowe
<b>Specyficzne parametry rozważanego rozwiązania</b>			
Zainstalowana moc [MW]	1,0	1,0	1,0
Nakłady inwestycyjne [miliony €]	5,0	2,4	1,2
Wskaźnik C (nominalny)	0,25	1	1
Wykorzystanie dostępnej pojemności akumulatora	100%	100%	100%
Liczba cykli rocznie	365	365	365
<b>Parametry zewnętrzne</b>			
Cena energii [€/kWh]	0,03	0,03	0,03
Cena energii PIF	2%	2%	2%
Okres pożyczki	10 lat	10 lat	10 lat
Stopa procentowa WACC	3,5%	3,5%	3,5%
<b>Parametry akumulatora</b>			
Wartość resztkowa/koszt inwestycyjny	15%	0%	0%
Sprawność	70%	80%	65%
Koszty utrzymania	2%	1%	-
Degradacja pojemności/rok	0,1%	2,0%	3,7%
Kalendarzowy czas życia	25	7	3
Pojemność możliwa do wykorzystania	100%	80%	20%
<b>Koszty uśrednione/czas ekspl. LCOE [€/kWh]</b>	<b>0,338</b>	<b>1,678</b>	<b>3,072</b>

Tabela 3. Możliwości magazynowania energii w polskich elektrowniach szczytowo-pompowych [ZG6-2].

Elektrownia	Moc (GW)	Spad średni (m)	Pojemność użyteczna zbiornika górnego (mln m <sup>3</sup> )	Zmagazynowana energia (GWh)
Żarnowiec	0,72	116,5	13,8	3,6
Porąbka-Żar	0,50	430,5	1,98	2,0
Solina-Myczkowce	0,20	55	240	0,8 (dobowo 4 h)
Niedzica-Sromowce	0,09	43	133	0,5 (dobowo 6h)
Żydowo	0,16	79,3	3,3	0,6
Dychów	0,09	27	3,6	0,3
<b>Razem*</b>	<b>1,76</b>			<b>7,8</b>

\* Tabela nie uwzględnia planowanej w dolinie rzeki Bystrzyca ESP Młoty o mocy 0,75 GW.

#### ❖ SYSTEMY ZASOBNIKOWE W TRANSPORCIE

Zaletą trakcji elektrycznej jest możliwość pracy zarówno silnikowej jak i prądnicowej maszyny elektrycznej wykorzystywanej do napędu pojazdów. Energia ta może być częściowo wykorzystana na pokładzie pociągu (do zasilania urządzeń pomocniczych i realizujących funkcje związane z komfortem jazdy), zaś pozostała jej część jest przekazywana do sieci trakcyjnej.

Hamowanie odzyskowe (rekuperacja) może być stosowane w szeregu układach elektromechanicznych (np. windy, wyciągi), ale jego największe znaczenie jest w trakcji elektrycznej. W elektrycznych pojazdach trakcyjnych może być jednym ze sposobów na zmniejszenie zużycia energii i obniżkę kosztów funkcjonowania transportu. Stosowanie hamowania odzyskowego pozwala na zmniejszenie zużycia energii o 10 do 30% - co przy rocznym zużyciu energii na cele transportu elektrycznego na poziomie 3-4% krajowego zużycia - daje potencjał redukcji krajowego zużycia energii nawet o 1%. Zadowalające efekty uzyska się wtedy, gdy uwzględnione będą rozwiązania techniczne dla całego systemu transportu elektrycznego (pojazd, sterowanie, zasilanie) i problemy formalno-prawne związane z tym zagadnieniem. Odpowiedni rozkład jazdy, przygotowanie trasy, dobór urządzeń zabezpieczających układ zasilający i zasobników energii pozwoli zwiększyć efektywność rekuperacji. Większość energii hamowania będzie tracona na rezystorach hamowania. Tylko jej część może zostać zmagazynowana lub wykorzystana przez inne pojazdy. Wymaga to zastosowania odpowiednich rozwiązań, zazwyczaj kosztownych, ale szybko się zwracających [13].

Możliwość efektywnego wykorzystania odzyskanej energii zależy od [12], [13]:

a) receptywności systemu trakcyjnego, związanej przede wszystkim z możliwością pobierania przesłanej do sieci trakcyjnej energii z hamowania przez inne pociągi. Pozwala to na zwiększenie wykorzystania energii hamowania w samym systemie bez konieczności transferu energii do innych odbiorów. Poziom receptywności zależy od natężenia i cyklu ruchu, odstępów pomiędzy pociągami i spadków napięcia w sieci trakcyjnej,

b) stosowania w pojazdach, podstacjach lub sieci trakcyjnej zasobników (magazynów) energii do przejmowania energii hamowania odzyskowego),

c) zainstalowania w podstacjach trakcyjnych sterowanych prostowników/falowników z możliwością zwrotu energii do sieci zasilającej AC, co pozwala na przesył energii hamowania odzyskowego pociągu do zewnętrznej sieci dystrybucyjnej przy zachowaniu wymiany energii pomiędzy pociągami znajdującymi się na odcinku linii (umożliwia to wykorzystanie praktycznie całej dostępnej energii z hamowania odzyskowego).

Podstawowe rozwiązanie stosowane w systemie zasilania trakcji to pkt a) – wykorzystanie energii oddawanej przez pojazd trakcyjny podczas hamowania (typowy czas trwania kilkanaście - kilkadziesiąt sekund, rzadko powyżej minuty np. podczas zjazdu) wymaga obecności na tym samym odcinku zasilania innego pojazdu pobierającego energię z sieci. Energia rekuperacji zużywana jest wtedy przez inny pojazd trakcyjny będący w fazie postoju, rozruchu lub jazdy.

Pobór energii przez pojazd jest największy w fazie rozruchu a w pozostałych fazach znacznie mniejszy. Brak odbiorów energii wytwarzanej w procesie hamowania

powoduje przesłanie jej do rezystora hamowania w pojeździe trakcyjnym.

Rozwiązaniem alternatywnym jest magazynowanie energii hamowania (pkt b). Można to przeprowadzić za pomocą zasobnika energii zlokalizowanego w pojeździe hamującym odzyskowo, albo w urządzeniach infrastruktury (wymaga to ciągłości połączeń elektrycznych, co nie zawsze jest spełnione przy występowaniu przerw między odbierakiem prądu a siecią trakcyjną).

Trzeba mieć na uwadze, że zasilany z sieci DC tabor z zasobnikami (magazynami) energii ma zwiększoną masę, zmniejszoną liczbę miejsc pasażerskich, zwiększoną cenę zakupu oraz koszty eksploatacyjne. Dlatego alternatywę stanowią zasobniki instalowane w podstacjach trakcyjnych. Warianty rozwiązań (p. a i b) pozwalają na wykorzystanie energii hamowania odzyskowego wewnątrz systemu trakcyjnego, co eliminuje kwestię transferu energii do zasilającego systemu elektroenergetycznego.

Ograniczeniem są wysokie koszty urządzeń, ich sprawność oraz moce hamowania. Stąd zainteresowanie innym rozwiązaniem, jakim są falowniki instalowane w podstacjach prostownikowych pozwalające na zwrot energii z systemu trakcyjnego DC do zasilającej sieci elektroenergetycznej AC (pkt. c). Z kolei w tym przypadku mogą wystąpić trudności formalno-prawne opisane w [13].

Każde z rozwiązań zwiększających stopień wykorzystania energii hamowania odzyskowego wymaga instalowania dodatkowych kosztownych urządzeń w pojeździe trakcyjnym lub systemie zasilania. Urządzenia te powinny cechować się dużą mocą i energią jednostkową, małymi stratami, dużą trwałością, jak najniższymi cenami oraz odpornością na zmienne warunki atmosferyczne, drgania, wibracje i uszkodzenia mechaniczne.

Aktualnie dostępne systemy zasobnikowe realizowane seryjnie są kosztowne i nie osiągają wymaganych parametrów napędowych. System ENVILINE oparty o zasobniki superkondensatorowe firmy ABB to koszt około 1-2 mln zł/MW dla napięcia systemowego DC 750 V. Maksymalna moc 1,5 MW i prąd 2 kA przy napięciu na poziomie 750 V. Możliwe jest tworzenie na specjalne zamówienie systemów o większych mocach i napięciu 1500 V. Pojemność łączna zestawu sięga 16,7 kWh (60 MJ zestawu 10 zasobników seryjnych). Stacjonarny zestaw superkondensatorowy zainstalowano na II linii Metra Warszawskiego, czy też w podstacji trolejbusowej w Gdyni, a mobilne na szeregu nowych tramwajów.

Systemy zasobnikowe wykorzystujące wirujące masy (np. KESS) mogą osiągać podobne parametry (do 15 kWh przy mocy do 2 MW, zestaw 10 modułów pracujących równolegle) dla napięcia sieci poniżej 1 kV. Systemy zasobnikowe zapewniają: wzmocnienie układu zasilania, wzrost dostępnej mocy szczytowej, poprawę jakości napięcia oraz efektywności energetycznej.

Systemy akumulatorów chemicznych małej mocy jako zasobniki dla odzyskiwanej energii z hamowania stosowane są bardzo powszechnie w taborze hybrydowym takim jak samochody, autobusy, trolejbusy, tramwaje. Ograniczeniem jest pojemność zasobnika i związany z tym zasięg.

Rozwijane są koncepcje systemów typu smart-grid, przewidujące wykorzystanie zasobników samochodów elektrycznych [14] do zasilania elektroenergetycznej sieci lokalnej w warunkach jej znacznego obciążenia (ang. *Vehicle-to-Home: V2H* oraz *Vehicle-to-Grid: V2G*). Gwałtowny wzrost liczby użytkowanych samochodów hybrydowych i elektrycznych w świecie wskazuje na celowość rozwijania tej koncepcji.

## Gospodarka wodorowa i ogniwa paliwowe

### ❖ WODÓR JAKO NOŚNIK ENERGII

Wodór jako nośnik energii charakteryzuje się najwyższą spośród paliw energią właściwą 33 Wh/g oraz wartością opałową na poziomie 120 MJ/kg, a jego spalanie jest neutralne dla środowiska, co przemawia na korzyść stosowania tego gazu jako paliwa. Obecnie wodór jest wykorzystywany głównie jako składnik paliw raketowych, w ogniwach paliwowych, w przemyśle chemicznym do syntezy metanolu i amoniaku. Dotychczas nie było procesu, który pozwoliłby go tanio pozyskiwać. Jednakże wraz z rozwojem technologii produkcji wodoru poszerza się również wachlarz możliwości zastosowania go w przemyśle, transporcie oraz energetyce. Gospodarkę wodorową (ang. *Hydrogen economy*) rozpatruje się jako cztery powiązane ze sobą etapy: produkcja, transport, magazynowanie oraz zastosowania.

### ❖ PRODUKCJA WODORU

Istnieje duża różnorodność metod pozyskiwania wodoru, które ogólnie można podzielić na trzy zasadnicze grupy technologii: *termiczne*, *elektrochemiczne*, *biologiczne*.

**Technologie termiczne** wymagają stosowania wysokich temperatur. Jeśli ciepło potrzebne do takich reakcji byłoby uzyskiwane ze spalania surowców kopalnych (gaz ziemny, węgiel, biomasa), produkcja wodoru zwiększałaby emisję dwutlenku węgla, przyczyniając się do zanieczyszczenia atmosfery. Obiecującym rozwiązaniem jest rozkład termiczny wody przy wykorzystaniu energii wysoko-temperaturowego reaktora jądrowego HTRG.

**Technologie elektrochemiczne** bazują na procesie elektrolizy wody (rozkładzie na  $H_2$  oraz  $O$ ) i zapewniają uzyskanie wodoru o wysokiej czystości rzędu 99,9%. Najbardziej atrakcyjne są elektrolizery zasilane energią elektryczną generowaną ze źródeł odnawialnych OZE, gdyż w odróżnieniu od elektrolizerów zasilanych ze spalania surowców kopalnych, nie emitują dwutlenku węgla. Fotoliza lub fotoelektroliza jest metodą, w której produkcja wodoru zachodzi w ogniwie fotoelektrochemicznym (ang. *photoelectrolysis cell, PEC*), w którym energia słoneczna jest przetwarzana na elektryczną, zużywaną do elektrolizy wody. Problemem przy produkcji wodoru przez PEC jest niska efektywność wykorzystania energii słonecznej (3-5%) oraz mała trwałość elementów z uwagi na ich korozyjność.

**Technologie biologiczne** wykorzystują procesy, w których swobodny wodór powstaje bezpośrednio lub jako produkt uboczny fotosyntezy lub fermentacji. W pierwszym przypadku wodór jest produktem zielonej algi (glonów), w drugim zaś mikroorganizmów. Jednym z przykładów takiego mikroorganizmu może być glon *Chlamydomonas reinwardtii* (powszechnie występujący w glebie i wodach słonych), który po usunięciu siarczanów z pożywki wytwarza wodór w efekcie działania enzymu hydrogenaza i osiąga wydajność rzędu 4 ml/h wodoru z litra kultury tych alg. Mimo iż uzyskuje się niewielkie ilości wodoru to technologie biologiczne są ciągle rozwijane, gdyż sam proces jest bezodpadowy i przyjazny dla środowiska.

Obecnie reforming parowy gazu ziemnego, tj. reakcja metanu i pary wodnej w wysokiej temperaturze w obecności katalizatora (ang. *steam methane reforming - SMR*), jest źródłem ok. 48% światowej produkcji wodoru. Jest to jak dotąd najbardziej ekonomiczny sposób pozyskiwania wodoru. Wadą tej metody jest duże stężenie wydzielanego dwutlenku węgla, dlatego jednostki SMR powinny być uzupełniane technologią wychwytywania i składowania dwutlenku węgla (ang. *carbon capture and storage - CCS*), która może zredukować emisję  $CO_2$  o około 80%.

Tabela 4. Parametry wybranych technologii produkcji wodoru [15]

TECHNOLOGIA	MOC	SPRAWNOŚĆ	KOSZT INWESTYCJI*	CZAS ŻYCIA	STAN ROZWOJU
Reforming parowy metanu, na dużą skalę	150-300 MW	70-85%	400 - 600 USD/kW	30 lat	Instalacje przemysłowe
Reforming parowy metanu, na małą skalę	0.15-15 MW	~51%	3 000 - 5 000 USD/kW	15 lat	Instalacje demonstracyjne
Elektrolizer zasadowy alkaliczny	Do 150 MW	65-82% (HHV)	850 - 1 500 USD/kW	60 - 90 tys. godz.	Instalacje przemysłowe
Elektrolizer z membraną polimerową (PEM)	150 kW do 1 MW	65-78% (HHV)	1 500 - 3 800 USD/kW	20 - 60 tys. godz.	Od niedawna na rynku
Elektrolizer tlenkowy (SO)	Skala laboratoryjna	85-90% (HHV)	-	~1 tys. godz.	Badania laboratoryjne

\* Koszty inwestycji w odniesieniu do energii wyjściowej.

Skróty: PEM - proton exchange membrane; SO - solid oxide; HHV - higher heating value.

Koszty wodoru, przy produkcji na dużą skalę przemysłową rzędu od 100 do 250 tys. Nm<sup>3</sup>/h, zależą głównie od cen gazu ziemnego, które wynoszą obecnie od 0,9 USD za kg w Stanach Zjednoczonych, 2,2 USD za kg w Europie i 3,2 USD za kg w Japonii. W przypadku produkcji na małą skalę koszty wytwarzania są znacznie wyższe, tego samego rzędu co wodór wytwarzany metodą elektrolizy (Tabela 4).

Wszystkie gazy bogate w wodór można wykorzystać w celu wytworzenia czystego wodoru za pomocą reformingu. Wodór można także wytwarzać z innych zasobów kopalnych po ich zgazowaniu, np. z węgla (18% produkcji) ropy naftowej (30% produkcji), a także z biomasy lub organicznych materiałów odpadowych.

**Gazyfikacja węgla** charakteryzuje się sprawnością technologii na poziomie ok. 65%, natomiast w systemach z wychwytem i magazynowaniem dwutlenku węgla CCS sprawność jest mniejsza o ok. 3 ÷ 5%. Koszty produkcji wodoru z gazyfikowanego węgla (częściowo rekompensowane niższą ceną węgla niż gazu ziemnego) są wyższe w porównaniu z reformingiem parowym gazu ziemnego. Wynika to z bardziej zaawansowanej technologii i wyższych nakładów inwestycyjnych.

Do **elektrolizycznej produkcji wodoru** obecnie na świecie wykorzystuje się około 8 GW mocy (4% produkcji). Typy elektrolizerów różnią się rodzajem elektrolitu i nośnika ładunku. Mogą być podzielone na: elektrolizery alkaliczne, elektrolizery z membraną polimerową (ang. *proton exchange membrane* – PEM) oraz elektrolizery tlenkowe (ang. *solid oxide* - SO). Wszystkie one mają budowę modułową i składają się ze stosu, zawierającego do 100 komórek. Stosy mogą być montowane równolegle przy użyciu tej samej infrastruktury.

### Szacunkowy potencjał produkcji wodoru w Polsce



Rys. 1. Możliwości produkcji wodoru w Polsce (100% = 37 mln ton/rok)

Taka konstrukcja umożliwia dopasowanie zdolności produkcyjnych wodoru do potrzeb, jednak ogranicza korzyści z efektu skali, bo nawet duże elektrolizery zawierają komórki i stosy o identycznej średnicy.

Elektrolizery alkaliczne mają obecnie większą wydajność niż elektrolizery z elektrolitem stałym, za to PEM mają znacznie wyższy potencjał rozwojowy, ważny dla przyszłej redukcji kosztów. Koszt wodoru zależy głównie od kosztów energii elektrycznej i kosztów inwestycyjnych elektrolizera.

**Produkcja wodoru w Polsce** ma największy potencjał rozwojowy w grupie technologii na bazie paliw kopalnych, w tym głównie węgla kamiennego i brunatnego (rys. 1). Wiąże się to przede wszystkim z zasobami węgla, szacowanymi na około 30 000 mln ton węgla kamiennego i ponad 40 000 mln ton węgla brunatnego. Przy założeniu zawartości 75% węgla pierwiastkowego w węglu kamiennym i 60% w brunatnym, a także przyjęciu 63% sprawności procesu gazyfikacji, maksymalna szacowana ilość wodoru do uzyskania wynosi ok. 4 900 mln ton, co odpowiada ok. 50-krotnej obecnej produkcji rocznej wodoru na świecie (ca 100 mln ton). Znacznie mniejszą ilość wodoru można wyprodukować z polskiego gazu ziemnego, którego udokumentowane złoża wynoszą ok. 98 mld m<sup>3</sup>.

Poza krajowym wydobyciem gazu istotnym źródłem metanu w Polsce jest jego uwalnianie się w kopalniach węgla, a jego zasoby przemysłowe są szacowane na 5,6 mld m<sup>3</sup> [17]. Przy założeniu zawartości 90% metanu w gazie ziemnym i przyjęciu 83% sprawności procesu reformingu parą wodną, maksymalna ilość wodoru do uzyskania wynosi 3 500 mln ton, co odpowiada ok. 3,5% obecnej światowej produkcji wodoru.

#### ❖ MAGAZYNOWANIE I TRANSPORT WODORU

**Magazynowanie wodoru** realizuje się, zależnie od sposobu i warunków jego przechowywania, następującymi metodami: w postaci sprężonej w zbiornikach, w postaci ciekłej w zbiornikach metalowych i kompozytowych, w postaci stałej związanej w wodorkach umieszczonych w pojemnikach lub adsorpcyjnie w nanorurkach węglowych, a także w postaci odwracalnych połączeń chemicznych o dużej zawartości wodoru [18]. W postaci sprężonej gazowy wodór magazynuje się zwiększając jego gęstość energii. Przykładowo podwajając ciśnienie w zbiorniku uzyskuje się w przybliżeniu podwojenie ilości zgromadzonej w nim energii. W temperaturze pokojowej, w przypadku magazynowania podziemnego, stosuje się ciśnienia w zakresie 2 ÷ 18 MPa, w transporcie samochodowym ciężkim 35 ÷ 50 MPa, w pojazdach osobowych (ang. *Fuel Cell Electric Vehicles* - FCEV) w zakresie do 70 MPa, natomiast dla zastosowań stacjonarnych nawet do 80 MPa.

W postaci ciekłej wodór skroplony przechowywany jest w niskiej temperaturze, poniżej temperatury krytycznej (-240,18°C) zazwyczaj około -250°C (20°K). Zapewnia to znacznie wyższą gęstość energii aniżeli magazynowanie w postaci gazowej (ciekły wodór 0,07 kg/l, a wodór gazowy sprężony do 70 MPa 0,03 kg/l, tj. ponad połowę mniej), jednakże jest bardziej energochłonne. Do skroplenia sprężonego wodoru potrzebna jest mniejsza ilość energii.

**Transport i dystrybucja.** Wodór jako nośnik energii wymaga, poza technologiami produkcji i magazynowania, również odpowiedniej infrastruktury do jego bezpiecznego transportu i dystrybucji. W postaci sprężonej wodór można przesyłać gazociągami o ciśnieniu roboczym  $1 \div 2$  MPa (w Europie istnieje ok. 1600 km, a w USA ok. 700 km takich gazociągów) lub za pomocą transportu kołowego. Rozważa się również wykorzystanie istniejących gazociągów do przesyłania mieszanki gazu ziemnego i wodoru. W postaci płynnej wodór (schłodzony do temperatury ok. -250°C) jest zazwyczaj transportowany przy użyciu ciężarówek, w specjalnych zbiornikach kriogenicznych. Stworzenie sieci stacji umożliwiających dystrybucję wodoru dla potrzeb użytkownika końcowego (np. dla sektora motoryzacyjnego) jest przedmiotem szerokich badań i studiów wymagających uwzględnienia szeregu czynników, m.in. rozmieszczenia geograficznego zasobów do produkcji wodoru, istniejącej struktury wytwarzania wodoru oraz transportu i dystrybucji, przewidywanego popytu na wodór i odległości między miejscem produkcji wodoru a odbiorcą.

Ocenia się, że z ekonomicznego punktu widzenia, pomimo wysokich nakładów inwestycyjnych, docelowo będzie optymalny transport gazociągami wodoru z produkcji scentralizowanej.

#### ❖ OGNIWA PALIWOWE

Przyszłościową technologią wytwarzania energii mogą być ogniwa paliwowe, które stanowią typowe źródło generowania czystej energii elektrycznej u odbiorców. Ocenia się, że będą one stosowane przede wszystkim w budynkach przemysłowych, hotelach, szpitalach i obiektach użyteczności publicznej. Poza tym ogniwa paliwowe stanowią jednocześnie źródła ciepła, które mogą być wykorzystywane podobnie, jak ma to miejsce w gospodarce skojarzonej [18], [19]. Ogniwo paliwowe to nieemitujący hałasu i czysty generator energii o wysokiej sprawności, przydatny do wytwarzania energii w miejscu odbioru [19]. Charakterystyka urządzenia stwarza przedsiębiorstwu energetycznemu możliwość nowego rodzaju działania.

Energia pochodząca z ogniw paliwowych umożliwia zaspokojenie potrzeb na czystą energię bez rozbudowy linii przesyłowej i rozdzielczej [18]. Ogólny schemat blokowy układu energetycznego ogniwa paliwowego przedstawiono na rys. 2.

Paliwem zasilającym ogniwo paliwowe jest gaz ziemny. Wzbogacony w powietrze, tworzy on pod wpływem ciepła mieszaninę gazową bogatą w wodór. Procesy chemiczne w celkach paliwowych wytwarzają energię elektryczną, ciepło, wodę i niewielką ilość CO<sub>2</sub>.

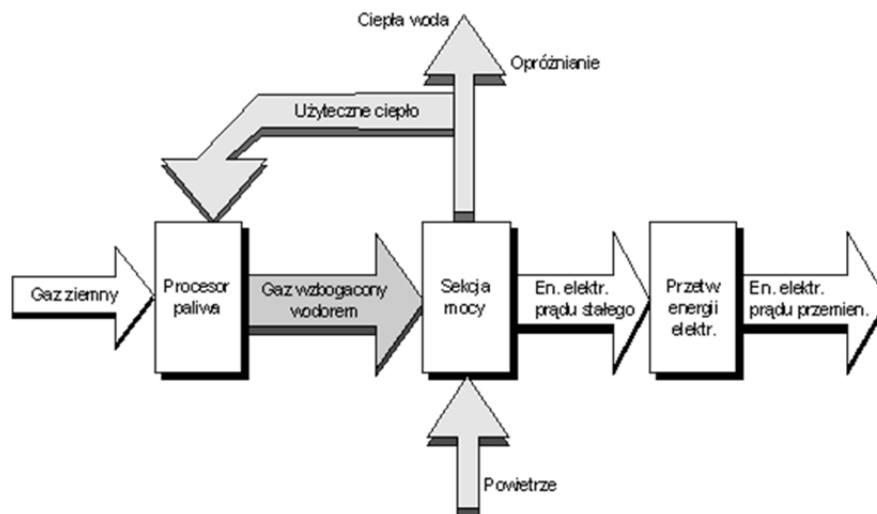
Najczęściej spotykane ogniwa paliwowe, to układy z kwasem fosforowym. Zawierają one wszystkie składniki niezbędne do przekształcania gazu ziemnego w energię elektryczną oraz ciepło. Parametry wytwarzanego ciepła są wystarczające do wykorzystania komunalnego w postaci ciepłej wody lub ciepła do ogrzewania pomieszczeń.

Obecnie szersze zastosowanie znajdują następujące typy ogniw paliwowych: kwasowe PAFC (ang. *Phosphoric-Acid Fuel Cell*), węglanowe MCFC (ang. *Molten-Carbonate Fuel Cell*), ze stałym utleniaczem SOFC (ang. *Solid Oxide Fuel Cell*), alkaliczne AFC (ang. *Alkaline Fuel Cell*), z membraną polimerową PEMFC (ang. *Polymer Electrolyte Membrane Fuel Cell*). Ogniwa te różnią się sprawnością i temperaturą przebiegu reakcji elektrochemicznej.

Najwyższą sprawność, dochodzącą do 60% można uzyskać stosując ogniwa MCFC, a najwyższą temperaturę czynnika (około 950 ÷ 1000°C) dają ogniwa SOFC. Mogą więc być stosowane w cyklach kombinowanych z turbiną parową lub w gospodarce skojarzonej, wymagającej wysokich parametrów odbieranego ciepła.

Układy wytwarzania energii oparte na ogniwach paliwowych są dynamicznie rozwijającą się gałęzią energetyki. Rozwój ogniw paliwowych, jak każdej nowej technologii, wymaga wysokich nakładów i konieczności finansowania badań naukowych.

Ogniwa paliwowe jeszcze długo nie będą mogły skutecznie konkurować na rynku ze znacznie tańszymi technologiami wytwarzania energii elektrycznej, opartymi głównie na spalaniu węgla, aczkolwiek elektrownie wykorzystujące ogniwa paliwowe zapowiadają się bardzo obiecująco, szczególnie w układach skojarzonych, zasilających niewielkie grupy odbiorców [19], a także w transporcie. Główną barierą dla rozwoju tej technologii jest brak nowego, innego niż paliwa kopalne, taniego źródła energii pierwotnej do produkcji wodoru jako jej nośnika.



Rys. 2. Schemat ogólny układu energetycznego ogniwa paliwowego [18]

W transporcie istotne są zwłaszcza zalety ogniw paliwowych jako źródła energii na pokładzie pojazdu FCV (ang. *Fuel Cell Vehicle*): wysoka sprawność (65% dla ogniwa paliwowego – bez uwzględnienia sprawności technologii wytwarzania wodoru – w porównaniu z 35% dla silnika spalinowego), brak drgań i hałasu, brak spalania paliwa w czasie postoju. Ograniczeniem jest wysoka cena i brak infrastruktury do tankowania paliwa.

Wśród przykładów **aplikacji w transporcie** można wymienić:

- autobus hybrydowy NOVA RTS (USA) wyposażony w ogniwa paliwowe typu PAMC o mocy 100 kW umieszczone z tyłu pojazdu, wykorzystujące metanol jako źródło wodoru, ale także w akumulator Ni-Cd jako zasobnik energii o zasięgu ok. 350 mil,
- samochody firmy Hyundai typu *ix3 Fuel Cell*, w ramach rozwijanego od 2014 r. projektu HyFIVE and HyTEC, będących częścią Wspólnego Przedsięwzięcia na Rzecz Ogniw Paliwowych i Wodorowych (ang. *Fuel Cells and Hydrogen Joint Undertaking: FCH JU*), dostarczono do Europy 250 sztuk tych pojazdów. Podobne pojazdy oferuje już seryjnie firma Toyota (model *Mirai*, zasięg 500÷700 km), a przygotowuje także Honda.
- inne małe pojazdy drogowe, przemysłowe i specjalne.

#### ❖ UWAGI KOŃCOWE

##### **W zakresie magazynów energii:**

- Zasobniki (magazyny) energii są nieodłącznym elementem nowoczesnych systemów energetyki rozproszonej oraz optymalnego wykorzystania techniczno-ekonomicznego OZE, dlatego ich rozwój i instalacja w Polsce jest wraz z rozbudową OZE nieunikniona.
- Zależnie od celu i doboru parametrów, zasobniki energii mogą zapewniać takie ważne funkcje jak: wsparcie dla OZE, wsparcie dla odbiorcy końcowego, wsparcie dla podsektora wytwórczego, w tym zwiększenie rezerwy systemowej („gorącej rezerwy”) oraz wsparcie dla podsektora przesyłu i dystrybucji energii elektrycznej.
- Najbardziej dojrzałe technologicznie i najtańsze w eksploatacji jako zasobniki wielkosystemowe, są elektrownie szczytowo-pompowe ESP. Możliwości ich budowy są ograniczone przez warunki geograficzne oraz wysokie koszty inwestycyjne. Zasobników pneumatycznych, użytkowo podobnych do ESP, obecnie nie ma w polskich planach rozwojowych.
- Duży potencjał rozwojowy zasobników elektrochemicznych umożliwia szybki postęp w poprawie ich parametrów technicznych oraz redukcji kosztów inwestycyjnych i eksploatacyjnych (zwłaszcza baterii przepływowych (Renox) oraz litowo-jonowych).
- W transporcie szynowym DC, jako zasobniki sieciowe i pojazdy dominują zasobniki elektrochemiczne oraz superkondensatory.
- Rozwój zastosowań zasobników energii elektrycznej w systemie elektroenergetycznym wymaga unormowań prawnych. Unormowania te powinny tworzyć ramy prawne korzystne dla stosowania magazynów energii elektrycznej przez wytwórców, w szczególności wykorzystujących OZE, przez operatorów systemów elektroenergetycznych oraz przez odbiorców. Obecnie jedyne odniesienia w polskim prawie dotyczące magazynowania energii elektrycznej, a są to tylko podstawowe definicje, znalazły się w ustawie o OZE z dnia 20 lutego 2015 r. (*Dz.U. z dn. 3.04.2015 r. poz. 478 art. 2*). Przykładem strategicznego podejścia prawnego do magazynowania energii elektrycznej jest Ustawa tzw. *Assembly Bill 2514* podjęta w Kalifornii w 2010 r. Ma ona zapewnić magazyny energii dla systemu elektroenergetycznego dla: integracji źródeł generacji rozproszonej, ograniczenia budowy źródeł o wysokiej emisji, ograniczenia

szczytowego zapotrzebowania oraz wykorzystania źródeł wysokoemisyjnych w jego okresie, ograniczenia strat sieciowych, a także dla zapewnienia usług systemowych.

##### **W zakresie gospodarki wodorowej i zastosowań wodoru:**

- Problemem jest ekonomiczna produkcja wodoru. W Polsce (wobec braku elektrowni jądrowych) najbardziej uzasadnione są: reforming parowy gazu ziemnego (ew. gazu LPG lub nafty) oraz gazyfikacja węgla lub biomasy (18% światowej produkcji wodoru) w generatorach gazu. Sprawność tych technologii leży w granicach 70÷75% (tabela 4).
- Należy rozwijać także technologie elektrolizy. Elektrolizery alkaiczne pracują obecnie ze sprawnością 40÷60% dostarczając wodór o czystości 99,9%. Prowadzone badania rozwojowe dotyczą poprawy sprawności i wydłużenia czasu eksploatacji, co przełoży się na redukcję kosztów (obecnie 800÷1500 USD/kW).
- Technologie wodorowe mają największy potencjał rozwojowy w zakresie ogniw paliwowych dużej mocy (> 1MW).
- Ogniwa paliwowe typu PAFC, MCFC i SOFC mają największy potencjał rozwojowy dla kogeneracji (produkcji energii elektrycznej i ciepła). Ich zalety to bardzo wysoka sprawność i mała emisja szkodliwych substancji, w tym CO<sub>2</sub>. Wysoka temperatura pracy tych ogniw (dla MCFC i SOFC odpowiednio 650°C i ok. 1000°C) daje możliwość pracy w kogeneracji ze sprawnością rzędu 75÷90%.
- Ogniwa paliwowe typu PAMFC znajdują zastosowania w pojazdach elektrycznych.
- Należy rozwijać systemy dystrybucji wodoru, gdyż samochody zasilane wodorem są już produkowane seryjnie (np. Toyota *Mirai*, leasing za ok. 1,2 tys. Euro). Instytut Transportu Samochodowego przygotował projekt lokalizacji do 2030 r. 30 stacji tankowania.
- W odniesieniu do gospodarki wodorowej potrzebne są, podobnie jak dla zasobników energii elektrycznej, unormowania prawne i standaryzacja.
- Do tego wszystkiego potrzebna jest tania energia do produkcji wodoru, umożliwiająca uzyskanie energetycznej stopy zwrotu EROEI >> 1 i rentowności tej technologii [1].

##### **Autorzy:**

dr hab. inż. Marek Bartosik prof. nadzw. Politechniki Łódzkiej Katedra Aparatów Elektrycznych, [marek.bartosik@p.lodz.pl](mailto:marek.bartosik@p.lodz.pl)  
prof. dr hab. inż. Waldemar Kamrat, Politechnika Gdańska, Katedra Elektroenergetyki, [wkamrat@pg.gda.pl](mailto:wkamrat@pg.gda.pl)  
prof. zw. dr hab. inż. Marian Kaźmierkowski, Politechnika Warszawska, Instytut Sterowania i Elektroniki Przemysłowej, [mpkisep@gmail.com](mailto:mpkisep@gmail.com)  
mgr Włodzimierz Lewandowski, Polska Grupa Energetyczna S.A., [wlodzimierz.lewandowski@gkpgge.pl](mailto:wlodzimierz.lewandowski@gkpgge.pl)  
prof. zw. dr hab. inż. Maciej Pawlik, Politechnika Łódzka, Instytut Elektroenergetyki, [maciej.pawlik@p.lodz.pl](mailto:maciej.pawlik@p.lodz.pl)  
prof. dr hab. Tadeusz Peryt, Państwowy Instytut Geologiczny, [tadeusz.peryt@pgi.gov.pl](mailto:tadeusz.peryt@pgi.gov.pl)  
prof. dr hab. inż. Tadeusz Skoczowski, Politechnika Warszawska, Instytut Techniki Ciepłej, [tskocz@itc.pw.edu.pl](mailto:tskocz@itc.pw.edu.pl)  
dr inż., Andrzej Strupczewski prof. Narodowego Centrum Badań Jądrowych, [Andrzej.Strupczewski@ncbj.gov.pl](mailto:Andrzej.Strupczewski@ncbj.gov.pl)  
prof. dr hab. inż. Adam Szeląg, Politechnika Warszawska, Instytut Elektroenergetyki, [aszelaq@wp.pl](mailto:aszelaq@wp.pl)

**W kolejnej publikacji** z serii prezentującej problematykę Raportu „Energia Elektryczna Dla Pokoleń”:

6. Nauka, edukacja, przemysł: synergiczna współpraca dla innowacyjności elektryki.



## ZAŁĄCZNIKI (dostępne: [www.sep.com.pl](http://www.sep.com.pl))

- ZG[3/1] Lewandowski W., Pawlik M., Skoczkowski T., Strupczewski A. Szela A.: Technologie wykorzystujące OZE.
- ZG[6/2] Strupczewski A.: Analiza i ocena kosztów energii elektrycznej z różnych źródeł energii w Polsce.

## DOKUMENTY ŹRÓDŁOWE (dostępne: [www.sep.com.pl](http://www.sep.com.pl))

- DZ[2] EU energy in figures. Statistical pocketbook. EUROPEAN COMMISSION, 2014.
- DZ[9] Master Plan dla transportu kolejowego w Polsce do 2030 r. Ministerstwo Infrastruktury, Warszawa, 2008.
- DZ[10] Strategia rozwoju transportu do 2020 roku (z perspektywą do 2030 roku). Ministerstwo Transportu, Budownictwa i Gospodarki Morskiej, Warszawa, 2013.

## LITERATURA

- [1] Bartosik M., Kamrat W., Kaźmierkowski M., Lewandowski W., Pawlik M., Peryt T., Skoczkowski T., Strupczewski A., Szela A. Bezpieczeństwo elektroenergetyczne dla pokoleń. *Przegląd Elektrotechniczny*, ISSN 0033-2097, R. 92 NR 8/2016, p. 268-282.
- [2] Bartosik M., Kamrat W., Kaźmierkowski M., Lewandowski W., Pawlik M., Peryt T., Skoczkowski T., Strupczewski A., Szela A. . Polityka i porządek prawny w polskiej energetyce na tle polityki Unii Europejskiej. *Przegląd Elektrotechniczny*, ISSN 0033-2097, R. 92 NR 9/2016.
- [3] M. Szczechowicz: Analiza możliwości wykorzystania technologii magazynowania energii na potrzeby bilansowania pracy źródeł odnawialnych w KSP. Opracowanie własne, *PSE Operator SA*, 2014.
- [4] H. Majchrzak: „Magazynowanie energii jako remedium na problemy z OZE”, *Czysta Energia* 8/2014.
- [5] Praca zbiorowa: Electricity Storage, Leading the Energy Transition Factbook, *SBC Energy Institute*, Sept. 2013.
- [6] G. Benysek, M. P. Kazmierkowski, J. Popczyk, and R. Strzelecki, „Power electronic systems as crucial part of Smart Grid infrastructure – a survey”, *Bull. Pol. Ac.: Tech.*, vol. 59, no. 4, 2011, pp. 445-473.
- [7] Technology Roadmap IEA, Energy Storage, *IEA*, 2014 <https://www.iea.org/publications/freepublications/publication/TechnologyRoadmapEnergyStorage.pdf>
- [8] I. Pavel: The cost of storage - how to calculate the levelized cost of stored energy (LCOE) and applications to renewable energy generation. *8th International Conference and Exhibition on Renewable Energy Storage, IRES 2013*, <http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S1876610214001751>
- [9] Statystyka elektroenergetyki polskiej, *Agencja Rynku Energii (ARE SA)*, 2013.
- [10] <http://ziemianarozdrozu.pl/encyklopedia/163/fluktuacje-i-magazynowanie-energii-z-korektami-autorow-pracy>
- [11] Germany's Green Energy Supply Transformation Has Already Failed. (<http://www.eike-klima-energie.eu/newscache/germanys-green-energy-supply-transformation-has-already-failed/>)
- [12] Technology Road Map, Energy Storage. *International Agency*, (Ed. Maria van der Hoeven), 2014.
- [13] Analiza możliwości wdrożenia systemu rekuperacji energii hamowania elektrycznych pojazdów trakcyjnych. *Zakład Trakcji Elektrycznej, Politechnika Warszawska*, 2014 (praca dla PKP Energetyka S.A.).
- [14] G. Benysek, M. Jarnut, B. Kubik – Stan obecny infrastruktury ładowania pojazdów elektrycznych w Polsce. [http://www.cire.pl/pliki/2/Stan\\_obecny\\_infrastruktury\\_ladowania\\_pojazdow\\_elektrycznych\\_0.pdf](http://www.cire.pl/pliki/2/Stan_obecny_infrastruktury_ladowania_pojazdow_elektrycznych_0.pdf)
- [15] Technology Roadmap Hydrogen and Fuel Cells, *IEA*, 2015, <https://www.iea.org/publications/freepublications/publication/TechnologyRoadmapHydrogenandFuelCells.pdf>
- [16] M. Kocharński i inni: Techniczne i ekonomiczne perspektywy produkcji i magazynowania wodoru w Polsce. *Acta Innovations*, ISSN 2300–5599, nr 8, 2013.
- [17] M. Kaliski, M. Wojciechowski, A. Szurlej: "Analiza skuteczności wprowadzonego systemu wsparcia wytwarzania energii elektrycznej z metanu," *Polityka Energetyczna*, nr 15 (4), 2012, str. 57-69.
- [18] W. Kamrat: Metody oceny efektywności inwestowania w elektroenergetyce. *Wyd. Politechniki Gdańskiej*, 2004.
- [19] J. Paska, M. Kłos: Ogniwa paliwowe przyszłością wytwarzania energii elektrycznej i ciepła?. *Przegląd Elektrotechniczny*, ISSN 0033-2097, R. 86 NR 8/2010, str. 93-99.
- [20] J. Paska, M. Kłos, P. Antos, G. Błaższczak: Koncepcja zasobnika energii elektrycznej o zdolności magazynowania 50 MWh, *Acta Energetica*, 2/11, 2012, str. 32-37.

**WIRTUALNA CZYTEL尼亚**  
NA PORTALU INFORMACJI TECHNICZNEJ  
[www.sigma-not.pl](http://www.sigma-not.pl)

WYGODNY DOSTĘP  
DO POLSKIEJ  
PRASY FACHOWEJ  
W KAŻDEJ CHWILI

więcej informacji:  
22 840 30 86, [prenumerata@sigma-not.pl](mailto:prenumerata@sigma-not.pl)  
22 827 43 65, [reklama@sigma-not.pl](mailto:reklama@sigma-not.pl)

WYDAWNICTWO SIGMA-NOT