

**STANISŁAW
LEWANDOWSKI,**

EASY SERV sp. z o.o. sp. k.

**MARIUSZ
LEWANDOWSKI**

Instytut Maszyn Przepływowych
im. R. Szewalskiego PAN

POTENCJALNE MOŻLIWOŚCI MAGAZYNOWANIA ENERGII W ZBIORNIKACH ELEKTROWNI WODNYCH

***Streszczenie:** W artykule zaprezentowano dyskusję możliwości magazynowania energii w elektrowniach wodnych, jako kierunek rozwoju energetyki wodnej w obliczu zmian uwarunkowań systemów elektroenergetycznych ewoluujących w kierunku systemów rozproszonych. Przedstawiono potencjał dostępnych technologii magazynowych wynikający z ich obecnego poziomu rozwoju z systemem magazynowym opartym na zbiornikach górnych elektrowni wodnych. Analiza stanu sektora energetyki wodnej w Polsce oraz zestawienie jej z wymogami systemów el-en wynikającymi ze światowych trendów rozwojowych pozwoliła na zdefiniowanie szans i barier oraz zakresu działań niezbędnych dla zapewnienia elektrowniom wodnym możliwości świadczenia usług magazynowania energii w tych systemach.*

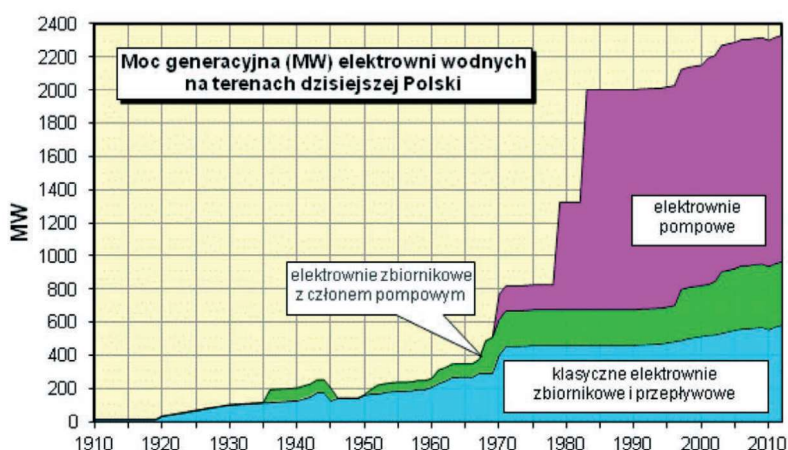
WPROWADZENIE

Magazynowanie energii w zbiornikach wodnych to technologia znana praktycznie od czasu uruchomienia pierwszych siłowni wodnych. Do napędu młynów, traków, kuźni, foluszy właściciele siłowni gromadzili wodę w niewielkich zbiornikach nierzadko przez kilka czy nawet kilkanaście dni, żeby móc wykorzystywać jej energię przez kilkanaście czy tylko kilka godzin. Zbiornikowe elektrownie wodne to nic innego jak efekt rozwoju tej technologii, mówienie więc o potencjalnych możliwościach magazynowania energii w zbiornikach elektrowni wodnych wydaje się być wyważaniem otwartych drzwi. Wydaje się wszakże, że w pogoni za coraz to nowszymi technologiami zapomnieliśmy o tym, co jeszcze dla naszych rodziców było oczywiste. Warto zatem przypomnieć o potencjalnych możliwościach magazynowania energii, mając na uwadze aktualne uwarunkowania energetyczne, środowiskowe i geopolityczne.

ENERGETYKA WODNA W POLSCE

Rozwój energetyki wodnej w Polsce na tle doświadczeń światowych

Stagnacja w rozwoju energetyki wodnej, a w tym w szczególności dużych elektrowni wodnych zbiornikowych w Polsce jest widoczna już od kilkudziesięciu lat. Jak dotychczas nie pracuje się nad rozwiązaniami legislacyjnymi, które umożliwiłyby wyjście z tego marazmu. Okres budowy dużych elektrowni zbiornikowych i szczytowo – pompowych zakończył się po oddaniu do eksploatacji elektrowni Niedzica na Dunajcu w 1997, a w zasadzie już dużo wcześniej było wiadomo, że „złoty okres” rozwoju energetyki wodnej zakończył się po oddaniu do eksploatacji ESP Żarnowiec w 1983 r. Uruchomienie czternaście lat później elektrowni Niedzica było ostatnim - mocno spóźnionym przedłużającą się budową - akcentem tego okresu.

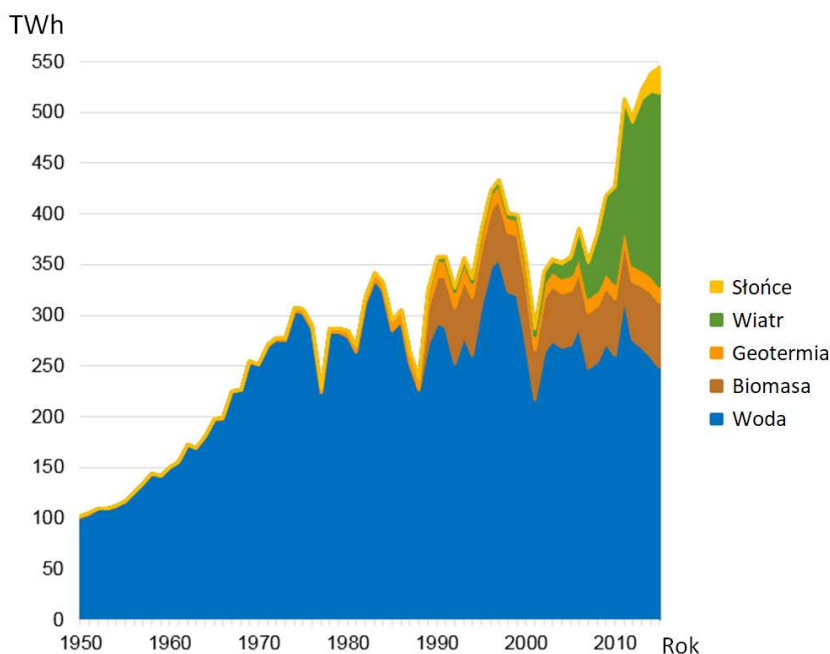


Rys. 1. Rozwój energetyki w Polsce w latach 1910-2010 [1]

Intensywność wykorzystywania możliwości produkcyjnych tych elektrowni była różna na przestrzeni lat, zależna od rozwoju gospodarczego kraju, powiązań międzysystemowych i sytuacji geopolitycznej. Po przyłączeniu w 1999 roku Krajowego Systemu Energetycznego do systemu europejskiego UCTE zainteresowanie pracą regulacyjno – interwencyjną dużych elektrowni wodnych nieprzyłączonych do sieci przesyłowych bardzo mocno osłabło, a zainteresowanie pracą ich członów pompowych spadło niemal do zera.

Operatorowi Systemu Przesyłowego do regulacji mocy wystarczały zdolności produkcyjne dwóch największych elektrowni szczytowo – pompowych ESP Żarnowiec (716 MW) i ESP Porąbka Żar (500 MW). Po kilku latach praktycznego uśpienia ESP Żydowo zaczęto sięgać po moc również tej elektrowni (157 MW).

W Stanach Zjednoczonych, gdzie podobnie jak w Polsce od roku 1970 - z krótkimi okresami ożywienia - trwa nieprzerwanie stagnacja w produkcji energii elektrycznej w elektrowniach wodnych, podjęto działania mające na celu wykorzystanie istniejącego potencjału hydroenergetycznego.



Rys. 2. Produkcja energii elektrycznej w oze w USA [2]

10 października 2018 r. amerykański senat uchwalił ustawę o infrastrukturze wodnej¹, która ma na celu wsparcie inwestycji hydroenergetycznych. Zapisy zawarte w projekcie ustawy zawierają propozycje usprawnienia procedur administracyjnych mających na celu radykalne skrócenie czasu wydawania niezbędnych zezwoleń na projektowane inwestycje hydroenergetyczne. W

¹ Energy Storage Tax Incentive and Deployment Act.

szczegółności zapisy ustawy nakładają na Federalną Komisję Regulacji Energetyki (FERC²) obowiązek ustanowienia przy-spieszonego procesu wydawania licencji dla instalacji hydroenergetycznych na istniejących stopniach wodnych, zwłaszcza zbiornikach przyzaporowych, które dotychczas nie są wykorzystywane energetycznie. Ocenia się, że na terenie Stanów Zjednoczonych jedynie przy 3% eksploatowanych stopni wodnych zlokalizowane są elektrownie wodne. Dlatego też ma być powołana specjalna interdyscyplinarna komisja, która opracuje aktualną listę niewykorzystanych energetycznie stopni wodnych i wytypuje te, przy których mogą być najszybciej zbudowane elektrownie wodne o możliwie dużej mocy zainstalowanej. Duży nacisk w projekcie ustawy położony jest na wypracowanie mechanizmów, które spowodują przyspieszony rozwój elektrowni szczytowo – pompowych, w tym również w pokopalnianych wyrobiskach a także w korytarzach podziemnych likwidowanych kopalni. W projekcie ustawy znalazły się również zapisy dotyczące wykorzystania energii płynących wód w kanałach, tunelach, akweduktach, rurociągach i innych instalacjach wykorzystywanych do celów nieenergetycznych. W ramach nowego prawa ustanowionego przez amerykański senat mają być promowane różne formy magazynowania energii, w tym także technologia elektrowni zbiornikowych z członem pompowym i elektrowni szczytowo – pompowych. Na podobne rozwiązania oczekują potencjalni inwestorzy również w naszym kraju, ale jak dotąd działania polskich władz idą w zupełnie innym kierunku.

Moc zainstalowana elektrowni a moc naturalna stopnia wodnego

W tabeli nr 1 przedstawiono wykaz elektrowni wodnych w Polsce, których moc zainstalowana jest większa od 5 MW. W kolumnie obok mocy zainstalowanej zestawiono moc naturalną stopni wodnych, przy których te elektrownie są zlokalizowane. Jest ona kilka a nawet kilkanaście razy niższa. Moc naturalna to moc, która może być przetworzona w elektrowni wodnej z określoną sprawnością - z reguły wyższą od 80% - na energię elektryczną, niepodważalnie w tym przypadku „energię zieloną”. Wielkość ta wynika wprost z parametrów hydrologicznych stopnia wodnego, przy którym elektrownie są zlokalizowane, i decyduje o możliwościach produkcyjnych elektrowni. Moc naturalna stopnia wodnego jest wprost proporcjonalna do średniego dopływu wody i dysponowanego spadku, t.j. różnicy poziomów pomiędzy zwierciadłem wody na górnym stanowisku elektrowni (w zbiorniku górnym) a poziomem wody na

² Federal Energy Regulatory Commission.

dolnym stanowisku w warunkach przepływu średniego (w kanale odpływowym lub/i w zbiorniku dolnym).

Tabela 1. Moc zainstalowana i naturalna elektrowni wodnych zaliczanych do „dużych” w ustawie o odnawialnych źródłach energii

L.p.	Nazwa	Rodzaj elektrowni	Budowa / modernizacja	Moc zainstalowana MW	Moc naturalna MW
1	Solina	esp z dopływem	1968 2003	136 200	11,9
2	Włocławek	zbiornikowa	1970	160,2	64,7
3	Niedzica	esp z dopływem	1997	92,8	9,5
4	Dychów	esp z dopływem	1936 / 2004	79,5 91,3	7,4
5	Rożnów	zbiornikowa	1911	50	9,2
6	Koronowo	zbiornikowa	1961	26	6,3
7	Tresna	zbiornikowa	1967	21	3,8
8	Dębe	zbiornikowa	1963	20	16,1
9	Porąbka	zbiornikowa	1953	12,6	3,9
10	Brzeg Dolny Wały Śląskie	przepływowa	1958	9,7	7,9
11	Myczkowce	Zbiornikowa	1962	8,3	4,6
12	Żur	zbiornikowa	1929	8	1,8
13	Czchów	Zbiornikowa wyrównawcza	1951	8	2,8
14	Pilchowice	Zbiornikowa	1912	7,5	6,1
15	Bielkowo	zbiornikowa	1925	7,2	2,4

Niezależnie więc od wielkości mocy zainstalowanej urządzeń wytwórczych – hydrozespołów – elektrowni, produkcja energii w tych elektrowniach zależy tylko od wielkości mocy naturalnej stopnia i oczywiście od sprawności jej przetworzenia w energię elektryczną. Można wyprowadzić wniosek, że każda z tych elektrowni mogłaby mieć moc niewiele wyższą od mocy naturalnej stopnia wodnego, a i tak wyprodukowałyby podobną ilość energii jak obecnie. Lub też, choćby każda z tych elektrowni miała zainstalowaną moc jeszcze dowolną ilość razy wyższą również więcej energii niż obecnie nie wyprodukuje. Ta wyższa od mocy naturalnej moc zainstalowana hydrozespołów elektrowni wodnej jest po to, żeby energię zakumulowaną w przebiegu wodnym zbiorniku wodnym wykorzystać wtedy, gdy jest na nią największe zapotrzebowanie, przeważnie w szczytach energetycznych, przez 3-5 godzin. Tak długo trwa mniej więcej jeden szczyt. W aktualnych uwarunkowaniach sieciowych istotna jest i wielkość

mocy, jaką możemy interwencyjnie wprowadzić do sieci. Interwencje z reguły nie trwają długo, gdyż w sytuacjach kryzysowych podnoszone są do ruchu jednostki wytwórcze o niższych zdolnościach interwencyjnych bądź wyłączane są odbiory w ramach usługi DSM. Stąd im wyższa moc interwencyjna tym cenniejsza dla systemu. Tak więc konsekwentnie, im większe przeinstalowanie mocy elektrowni zbiornikowej, tym większe zdolności interwencyjne i większe pasmo mocy regulacyjnej, ale też krótsze czasy wykorzystania mocy zainstalowanej elektrowni, który zdeterminowany jest wielkością dopływu naturalnego oraz wydolnością członu pompowego, jeżeli elektrownia dysponuje możliwością dopompowywania wody do zbiornika górnego.

Tabela 2. Parametry techniczno - produkcyjne i uwarunkowania hydrologiczne elektrowni wodnych /segment elektrowni zawodowych/

Opis	Jednostka	Elektrownie zawodowe Cały zbiór od 0 do 200 MW	Elektrownie zawodowe zbiór el. zbiornikowych od 0 do 5 MW	Elektrownie zawodowe zbiór el. zbiornikowych powyżej 5 MW
Ilość elektrowni	szt	129	29	12
Moc instalowana	MW	756.159	71.529	606.860
Produkcja średnioroczna	MW/h	1 559 366	200 866	1 050 828
Średnioroczny czas wykorzystania mocy zainstalowanej - T_{pi}	godz/rok	3 748	2 963	2 040
T_{pi} - maksymalny		7 849	4 701	3 767
T_{pi} - minimalny		825	1 080	825
Wskaźnik przeinstalowania mocy - W_{pi}	-	1.68	2.05	4.90
W_{pi} - maksymalny		16.87	3.90	16.87
W_{pi} - minimalny		0.66	1.06	1.49

Pomimo wytężonych działań środowiska energetyki wodnej i wyjaśniania zasady funkcjonowania elektrowni szczytowych i szczytowo-pompowych na różnych forach, największe w kraju elektrownie zbiornikowe i elektrownie zbiornikowe z członem pompowym o mocy zainstalowanej wyższej od 5 MW od stycznia 2016 utraciły możliwość pozyskiwania dodatkowych przychodów z tytułu produkcji tzw. zielonej energii. Autorzy ustawy oze, decydenci i członkowie nadzwyczajnej sejmowej komisji ds. energetyki i surowców energetycznych nie chcieli w żaden sposób zrozumieć, że moc zainstalowana tych elektrowni ma znaczenie przede wszystkim w aspekcie udziału w produkcji energii szczytowej. W takim celu elektrownie te zostały zbudowane i dla takich celów powstały nierozdzielnie związane z nimi przeelektrowniane zbiorniki wodne.

Dla elektrowni wykorzystującej spiętrzoną w zbiorniku wodę praca w sposób ciągły, przewalowy wiąże się przede wszystkim z pracą z obniżoną mocą, często w punkcie charakterystyki energetycznej odległym od punktu, w którym hydrozespoły uzyskują sprawność maksymalną. Praca urządzeń z obniżoną sprawnością to nie tylko mniejsze osiągi produkcyjne z tego samego potencjału hydroenergetycznego, lecz także - a może przede wszystkim - przyspieszone pogarszanie się stanu technicznego w wyniku destrukcyjnego oddziaływania pogorszonego stanu dynamicznego, który charakteryzuje się powiększonymi drganiami elementów hydrozespołu, powiększoną pulsacją ciśnień w układzie przepływowym turbin, a także zwiększoną intensywnością zjawisk kawitacyjnych. To wszystko rzutuje na długość przebiegów międzyremontowych i wprost na koszty utrzymania elektrowni. Ograniczenie warstwy użytkowej w zbiornikach przebiegowych w wyniku administracyjnych decyzji stwarza nowe warunki hydrologiczne, dla których urządzenia elektrowni nie zostały projektowo dostosowane i tym samym podważa sens ich użytkowania. Poza tym wskutek narzuconych obostrzeń prawnych następuje ograniczenie bądź całkowita eliminacja zdolności magazynowania energii, co dla współczesnej energetyki staje się priorytetowe.

ELEKTROWNIE WODNE JAKO MAGAZYNY ENERGII

Ewolucja systemów el-en

Zmiany zachodzące w systemach elektroenergetycznych zwłaszcza w sektorze wytwarzania w krajach Unii Europejskiej i nie tylko, w których dominującą rolę zaczynają odgrywać odnawialne źródła energii, wymagają nowego podejścia do zagadnień utrzymania ciągłości dostaw energii elektrycznej dla odbiorców, co przekłada się wprost na bezpieczeństwo zasilania. Im system bardziej nasycony niespokojnymi źródłami energii, tym większa potrzeba wdrożenia odpowiednich mechanizmów, które wykluczą bądź przynajmniej zminimalizują niebezpieczeństwo nagłej utraty energii pozyskiwanej z przyłączonego do sieci energetycznej źródła zasilania. Jednym z najprostszych, lecz niestety nie najtańszych sposobów utrzymania ciągłości dostawy energii, jest utrzymywanie odpowiednio dużej mocy rezerwowej, którą zapewnią jednostki wytwórcze pozostające w stanie gorącej rezerwy mocy. Sposób dobry, aczkolwiek doraźny, jeżeli przyjmiemy za oczywisty fakt, że w krajowej strukturze wytwarzania jednostki rezerwowe mają stanowić bloki węglowe, które wcześniej czy później zostaną wycofane całkowicie z eksploatacji. Poza tym wytwórcze jednostki rezerwowe nie zapewnią absorpcji nadwyżek energii w przypadkach jej

nadpodaży ze źródeł odnawialnych. Można i należy dostosowywać popyt na energię do jej podaży poprzez rozwój inteligentnych sieci, lecz sposób rozwiązania tego problemu będzie odgrywać istotną rolę zwłaszcza w sektorze gospodarstw domowych. Żeby zapewnić jednocześnie odbiór nadwyżek energii, które można wprowadzić powtórnie do sieci w czasie jej niedoboru, konieczne jest wdrożenie technologii magazynowania energii.

Zbiornik wodny elektrowni stanowi swoisty magazyn energii, który wykorzystywany jest zależnie od potrzeb systemu elektroenergetycznego. Korzystanie z tego magazynu wiąże się ze zmianą poziomu wody w zbiorniku w zakresie tzw. warstwy użytkowej/energetycznej ustalonej w decyzjach wodnoprawnych. Praca elektrowni z ograniczoną warstwą użytkową lub z jej całkowitą eliminacją skutkuje pracą elektrowni z obciążeniem zmieniającym się w rytm zmian wielkości dopływu naturalnego i wymusza pracę elektrowni w diametralnie innym systemie niż ten, do którego została zaprojektowana. Jedyne, co zostaje osiągnięte poprzez likwidację czy też diametralne ograniczenie warstwy użytkowej, to preferowane przez ekologów utrzymywanie stałego poziomu wody w zbiorniku wodnym, co jest rzekomo zgodne z warunkami naturalnymi panującymi w rzekach.

Ograniczenie lub całkowita eliminacja możliwości magazynowania energii w zbiorniku górnym elektrowni, a tym samym brak możliwości aktywnej gry energią na Towarowej Giełdzie Energii, oznacza w praktyce realną możliwość całkowitej uraty rentowności tych elektrowni, zwłaszcza jeśli dodać do tego wyłączenie ich z możliwości udziału w systemie aukcyjnym sprzedaży energii.

Obecny poziom rozwoju technologii magazynowania

Aktualnie dominującą w światowej energetyce technologią jest magazynowanie energii w zbiornikach wodnych elektrowni szczytowo – pompowych i elektrowni zbiornikowych. Ponad 98% wszystkich instalacji magazynowania energii w światowej energetyce to przyelektrowniane zbiorniki wodne. Elektrownia wodna zbiornikowa, dysponując określoną warstwą użytkową w zbiorniku wodnym, może tę warstwę wykorzystywać zarówno do ograniczenia produkcji zmniejszając przeływ elektrowni w czasie, gdy w systemie mamy nadmiar energii, co skutkuje obniżeniem generowanej mocy oraz akumulacją nadwyżek dopływającej wody w warstwie użytkowej zbiornika, jak i do uruchomienia dodatkowych mocy produkcyjnych w przypadku zwiększonego zapotrzebowania na energię w systemie, zwiększając przeływ elektrowni i wykorzystując zakumulowaną w zbiorniku wodę, co skutkuje zwiększeniem

generowanej mocy. Szybkość reagowania na zmiany parametrów pracy systemu elektroenergetycznego predestynuje zbiornikowe elektrownie wodne szczególnie do współpracy z niestabilnymi/niespokojnymi źródłami energii takimi jak siłownie wiatrowe czy elektrownie słoneczne. Można istotnie zwiększyć możliwości magazynowania energii poprzez dobudowanie członu pompowego wszędzie tam, gdzie możliwe jest usytuowanie dolnego zbiornika np. poprzez podpiętrzenie ciekłu poniżej elektrowni.

Projekt zamiany klasycznej elektrowni zbiornikowej w elektrownię zbiornikową z członem pompowym jest rozpatrywany dla elektrowni wodnej o mocy 2080 MW zlokalizowanej na rzece Kolorado przy zaporze Hoovera. W związku z dużą głębokością rzeki poniżej zapory woda przez pompy pobierana byłaby bezpośrednio z koryta rzeki, co znacząco zmniejszy nakłady inwestycyjne, które i tak mają przekroczyć 3 mld USD. Według ekspertów koszt jednej kilowatogodziny pozyskiwanej z tej elektrowni szczytowo – pompowej wynosiłby 15 centów USD, co w porównaniu do kosztu magazynowania energii w magazynach z akumulatorami Li-Ion stanowi nieco ponad 50%. Projekt ma realne szanse realizacji, gdyż w związku z długotrwałą suszą poziom wody w zbiorniku górnym (jezioro Mead) obniżył się na tyle, że elektrownia wykorzystuje jedynie 20% swojej mocy zainstalowanej pracując bez akumulacji, czyli praktycznie przepuszczając przez turbiny tyle wody, ile aktualnie dopływa do zbiornika. Sytuacja analogiczna, jak w wielu polskich elektrowniach zbiornikowych, tylko u nas przyczyna nie wynika z sytuacji hydrologicznej, a z nakazów administracyjnych. Jak widać w Stanach Zjednoczonych reakcja właściciela elektrowni, aby stworzyć możliwość magazynowania energii jest szybka i radykalna. Nie mamy danych, ile lat trwałoby pozyskiwanie decyzji administracyjnych, gdybyśmy chcieli doposażyć elektrownię zbiornikową w człon pompowy, o ile w ogóle udałoby się uzyskać pozytywną decyzję.

Każda technologia magazynowania energii ma swoje gorsze i lepsze strony. Jest oczywiste, że elektrownie wodne zbiornikowe z lub bez członu pompowego nie mogą konkurować szybkością reagowania na wymuszenia systemowe z akumulatorowymi magazynami Li-Ion czy kołami zamachowymi, których czasy reakcji są bardzo krótkie (milisekundy). Nie mogą też konkurować mobilnością, gdyż kontenery z bateriami akumulatorów można instalować w praktycznie dowolnych miejscach. Znane są również problemy z uzyskaniem dogodnej lokalizacji zbiorników wodnych, długim czasem pozyskiwania decyzji administracyjnych i długim czasem budowy. Także koszty budowy obiektów hydroenergetycznych są stosunkowo wysokie zważywszy na małą

gęstość magazynowania energii³. Niepodważalny jest również fakt ingerencji w środowisko naturalne budowy dużych sztucznych akwenów, lecz, obiektywnie oceniając, niepodważalny jest również fakt ich pozytywnego wpływu na środowisko, gospodarkę wodną a także na rozwój gospodarczy regionu, w którym takie obiekty powstają.

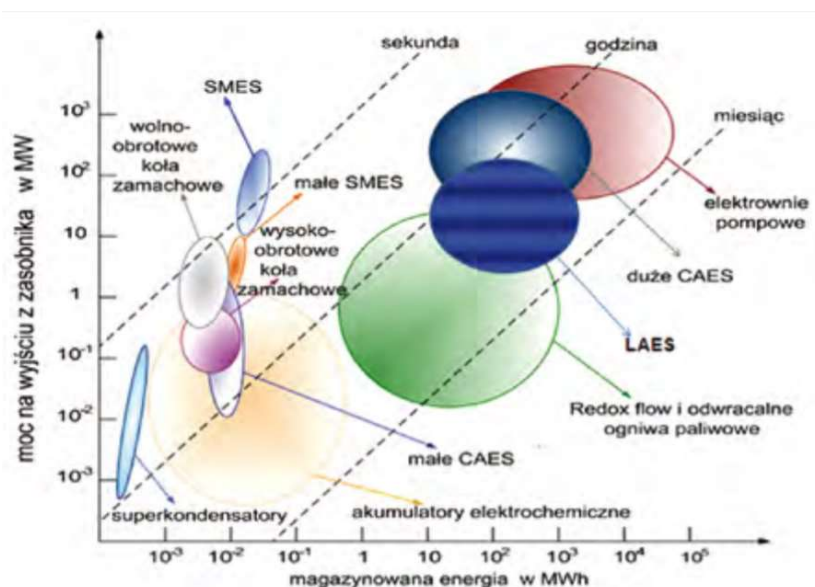
Tabela 3. Porównanie różnych technik magazynowania energii [3]

PSH – magazynowanie energii z wykorzystaniem elektrowni pompowej,
CAES – magazynowanie energii w sprężonym powietrzu
FES – magazynowanie energii z wykorzystaniem koła zamachowego,
LAES, CES – magazynowanie energii elektrycznej w ciekłym powietrzu.
SMES – systemy magazynowania energii magnetycznej w układach nadprzewodzących,
SC – magazynowanie energii w superkondensatorach

Technologia		Sprawność [%]	Moc nominalna [MW]	Czas rozładowania*	Czas eksploatacji [rok]	Dojrzałość techniczna	Koszt energii, [USD/kWh]
PSH		70–87	100–5000	1–24+ h	30–60	komercjalizacja	5–100
CAES		70–89	50–300	1–24+ h	20–40	komercjalizacja	2–120
LAES, CES		40–90	10–200	1–12+ h	20–40+	wczesna komercja- lizacja	260–530
FES		80–95	0,4–20	1–15 m	15–20	demonstracja/wczesna komercjalizacja	1000–14 000
H ₂ i og. paliwowe		20–85	0–50	s–24+ h	5–20	demonstracja	6–725
Baterie	płynne	65–85	0.03–3	s–10 h	5–30+	badania/wczesna demonstracja	150–1000
	Li-Ion	75–90	1–100	0,15–1 h	5–15	demonstracja	600–3800
	metal-powietrze	~75	0,01–50	s–5 h	100–10 000 cykli	badania/wczesna demonstracja	10–340
	NaS	75–90	0,05–34	s–8 h	5–15	komercjalizacja	300–500
	niklowe	60–90	0–40	s–h	10–20	wczesna komercjalizacja	800–1500
	kw.-Pb	63–90	0–40	s–10 h	5–20	komercjalizacja	200–400
SMES		90–97	0,1–10	ms–s	20–30	wczesna komercjalizacja	1000–10 000
SC		<75–98	0–10	ms–1 h	8–20+	wczesna demonstracja	300–20 000

³ Gęstość magazynowania energii w elektrowniach szczytowo pompowych wynosi poniżej 30 Wh/kg, natomiast gęstość magazynowania energii w magazynach akumulatorowych Li-Ion osiąga wartość 280 Wh/kg, a – jak na razie - prototypowych magazynów z bateriami przepływowymi nawet 550 Wh/kg.

Lewandowski, S., Lewandowski, M.: Potencjalne możliwości magazynowania energii w zbiornikach elektrowni wodnych



Rys. 3. Moc uzyskiwana z zasobników w zależności od zdolności i technologii magazynowania energii [4]

CAES – magazynowanie energii w sprężonym powietrzu

SMES – systemy magazynowania energii magnetycznej w układach nadprzewodzących,

LAES – magazynowanie energii elektrycznej w ciekłym powietrzu.

Podkreślić należy też stosunkowo szybką adaptację przez naturę dobrze zaprojektowanych obiektów hydroenergetycznych, które już w pierwszych latach użytkowania stają się wizytówką regionu, a po latach powstają wokół nich obszary chronionej przyrody. Również pod względem czasu życia obiektów hydroenergetycznych⁴ a także w ilości cykli rozładowań/załadowań magazynu⁵ i wielkości jednostkowych nakładów inwestycyjnych, elektrownie wodne zbiornikowe są jak dotychczas poza wszelką konkurencją.

⁴ Pracuje jeszcze pierwsza na świecie elektrownia szczytowo – pompowa Rocky River uruchomiona w 1929 r. w Stanach Zjednoczonych, ale także do dzisiaj pracuje w Polsce uruchomiona kilka lat później na terenie ówczesnych Niemiec elektrownia zbiornikowa z członem pompowym Dychów, której zadaniem było zapewnienie dostaw energii szczytowej dla Berlina)

⁵ Na przestrzeni 50 lat życia elektrownia szczytowo – pompowa wykonuje średnio 35 000 cykli załadowań/rozładowań.

Magazynowanie szansą dla rozwoju energetyki wodnej

Energetyka wodna poza tym, że prezentuje dojrzałą technologię wytwarzania energii, dysponuje także szeroką gamą technicznych rozwiązań, które mogą zostać wdrożone możliwe szybko pod warunkiem stworzenia odpowiednich warunków do rozwoju tego segmentu energetyki odnawialnej. Stosując nowoczesne rozwiązania techniczne można istotnie zwiększyć elastyczność pracy elektrowni wykorzystując możliwość pracy w rezerwie wirującej z jednoczesną kompensacją mocy biernej, co jest szczególnie ważne przy utrzymywaniu wymaganego poziomu napięcia zwłaszcza długich linii energetycznych. W elektrowniach z członem pompowym istnieje możliwość pracy w sprzężeniu hydraulicznym, którego realizacja umożliwia bardzo szybkie zmiany obciążenia elektrowni od maksymalnego poboru mocy z sieci do maksymalnej generacji bez straty czasu na rozruchy i odstawienia jednostek wytwórczych. Praca elektrowni w tym systemie zapewnia ciągłą regulację mocy w paśmie od mocy ujemnych (pobór nadwyżek energii z systemu) do mocy dodatnich (generacja – dostawa energii do systemu w okresach zwiększonego zapotrzebowania).

W naszych krajowych analizach, w których rozpatrywane są różne warianty magazynowania energii w tym również w zbiornikach elektrowni wodnych, zapomina się o tym, że większość aktualnie eksploatowanych elektrowni zbiornikowych dysponuje dużymi sztucznymi i naturalnymi zbiornikami energii, które wystarczy jedynie przystosować do magazynowania energii poprzez odpowiednie zabezpieczenie skarp odwodnych, odbudowanie pojemności użytkowej poprzez np. bagrowanie. W niektórych przypadkach powiększenie pojemności użytkowej wymaga podwyższenia obwałowań i korony zapór⁶. Konieczne jest także zapewnienie przepływów biologicznych w ciekach poniżej zbiornika⁷, co często wiąże się z potrzebą udrożnienia starego koryta rzeki. W Polsce znajduje się 360 podpiętrzonych jezior o łącznej pojemności prawie 270 mln m³ i ponad 4 000 sztucznych zbiorników wodnych o pojemności ok 200 mln m³. W segmencie wodnej energetyki zawodowej eksploatowanych jest niewiele ponad 40 zbiorników wodnych, przy których są zlokalizowane elektrownie wodne. Żeby jednak w pełni wykorzystać techniczne możliwości magazynowania energii w użytkowanych przez energetykę zbiornikach wodnych konieczne jest w wielu elektrowniach zbiornikowych

⁶ Stosowane w praktyce na niektórych obiektach np. w Niemczech

⁷ W praktyce często można przepływ biologiczny wykorzystać energetycznie instalując odpowiednio dobraną turbinę wodną.

formalne przywrócenie projektowych pojemności użytkowych. Jest to zadanie niezwykle trudne do przeprowadzenia z uwagi na zastraszanie urzędników przez nośne medialnie protesty organizacji ekologicznych. Wydaje się, że przywrócenie projektowych zdolności akumulacji w zbiornikach wodnych, które związane są z przywróceniem możliwości cyklicznych wahań poziomu wody, wymaga interwencji na szczeblu rządowym lub parlamentarnym, jak to ma miejsce w Stanach Zjednoczonych.

Raport opracowany przez Sandia National Laboratories na zlecenie rządu Stanów Zjednoczonych diagnozuje i omawia główne bariery uniemożliwiające bądź utrudniające rozwój systemów magazynowania energii w USA. Wyróżniono w nim pięć grup barier dla rozwoju technologii magazynowania energii, są to:

- 1) uwarunkowania prawne,
- 2) bariery związane z funkcjonowaniem rynku energii,
- 3) bariery funkcjonujące po stronie potencjalnych inwestorów,
- 4) ograniczenia dostępnych technologii gromadzenia energii
- 5) ograniczenia wynikające ze splotu powyższych uwarunkowań.

W amerykańskim raporcie podkreślono, że istnienie przestarzałych regulacji prawnych i zasad działania rynków energii elektrycznej, nieuwzględniających szczególnych możliwości tkwiących w sektorze magazynowania energii, który może być wykorzystany zarówno do produkcji jak i przy przesyłce oraz dystrybucji energii elektrycznej, zwiększa pole niepewności inwestorów i zniechęca do inwestowania w technologie magazynowania energii.

Diagnoza sporządzona dla USA jak ułał pasuje do prezentacji stanu polskiej energetyki wodnej.

Oczywiście w wielu przypadkach konieczny i z pewnością możliwy jest kompromis, który uwzględni szczególne wymagania hydrologiczne, takie jak tworzenie rezerwy powodziowej czy utrzymywanie poziomu wody w zbiorniku niezbędnego do alimentacji cieków podczas suszy hydrologicznej. Powinny też zostać uwzględnione szczególne wymagania środowiskowe poprzez wprowadzenie granicznych prędkości zmian poziomu wody w zbiorniku, ograniczenia wahań poziomu wody w okresach ochronnych, czy krótkookresowej stabilizacji poziomu wody w zbiorniku. Korzystne byłoby dynamiczne sterowanie tymi ograniczeniami, tak aby optymalnie wykorzystywać krótkookresowe zmiany uwarunkowań środowiskowych i hydrologicznych na stopniach wodnych dla maksymalizacji wykorzystania potencjału hydroenergetycznego stopni wodnych oraz świadczenia usługi

magazynowania energii. W wielu krajach, po okresie dużej uległości władz centralnych i samorządowych w stosunku do wymogów stawianych przez środowiska ekologiczne i pseudoekologiczne, przywraca się możliwości zmiany poziomów piętrzenia w zbiornikach górnych z uwzględnieniem uwarunkowań środowiskowych (zwłaszcza uwarunkowań sezonowych związanych ze zmianami pór roku) oraz z uwzględnieniem potrzeb ludności lokalnej i innych użytkowników spiętrzonej wody w zbiornikach przelektrownianych. Decydenci odpowiedzialni za bezpieczeństwo energetyczne swoich krajów nie przyjmują już bezkrytycznie demagogicznych wymogów ugrupowań pseudoekologicznych, w uzasadnieniu których najczęściej używane” są zwroty ze słowem wytrych „może”: „może zagrażać, może mieć ujemny wpływ, może mieć destrukcyjne oddziaływanie na środowisko” itp. Właściciele elektrowni wodnych, aby utrzymać rentowność swojej działalności, byli zmuszani do wydatkowania niekiedy bardzo dużych środków finansowych na dowodzenie, że wymogi i zarzuty stawiane przez niektóre środowiska ekologiczne nie miały żadnych racjonalnych podstaw, wręcz przeciwnie, były z gruntu fałszywe. Również nasz kraj powinien się wpisać w ten międzynarodowy nurt mający na celu przywrócenie normalności w prowadzeniu gospodarowania zasobami wodnymi, zwłaszcza teraz, gdy objawy i skutki globalnego ocieplenia są widoczne i coraz bardziej dotkliwe.

Nałożenie jedynie na Operatora Sieci Przesyłowej obowiązku utrzymywania właściwego poziomu częstotliwości w systemie energetycznym, który w połączonych systemach energetycznych sprowadza się do zapewnienia właściwego zbilansowania krajowego systemu, kieruje uwagę dyspozytorów jedynie na elektrownie szczytowo - pompowe przyłączone do sieci przesyłowych. Nadal obserwuje się brak zainteresowania operatorów sieci dystrybucyjnych możliwościami magazynowania energii w zbiornikach elektrowni wodnych. Stosunkowo duże zbiornikowe elektrownie wodne dysponujące członami pompowymi, takie jak Solina czy Dychów, wykorzystywane są do pracy w okresach szczytowego zapotrzebowania na moc. Człony pompowe tych elektrowni nie są praktycznie w ogóle wykorzystywane z uwagi na obowiązujące zasady rozliczeń za przesyłanie energii w sieciach dystrybucyjnych. Ewenementem jest wykorzystywanie elektrowni szczytowo – pompowej Niedzica, wyposażonej w wysokosprawne pompoturbiny z wirnikami Deriaza i dysponującej dużą pojemnością magazynową w zbiorniku górnym, jedynie do pracy generacyjnej. Zmianę w postrzeganiu możliwości regulacyjnych i magazynowych zbiornikowych elektrowni wodnych upatruje się po nałożeniu na Operatorów Sieci Dystrybucyjnych obowiązku bilansowania mocy.

Technologie przechowywania energii w zbiornikach elektrowni wodnych mogą przyczyniać się do poprawy jakości usług oferowanych przez sieci elektroenergetyczne poprzez zwiększenie niezawodności zaopatrzenia w energię elektryczną i integrację odnawialnych źródeł energii, których udział w koszyku produkcji energii elektrycznej ciągle wzrasta.

Zdolność magazynowania energii to nie tylko sposób na pozyskiwanie korzyści z tytułu świadczenia takiej usługi, to także stabilizacja zapotrzebowania na energię w systemach lokalnych poprzez:

- obniżanie obciążenia elektrowni zbiornikowych w okresach, w których występuje nadwyżka produkowanej energii elektrycznej we własnych instalacjach oze (elektrownie wiatrowe i fotowoltaiczne). Nadwyżka energii surowej (dopływ wody) jest magazynowana w zbiornikach elektrowni wodnych,
- wykorzystywanie zakumulowanej energii w zbiornikach elektrowni wodnych do pokrycia deficytu energii dostarczanej odbiorcom finalnym w okresach zmniejszonej generacji w niespokojnych instalacjach oze czy też zwiększonego zapotrzebowania na energię u odbiorców finalnych,
- wykorzystywanie zespołów pompowych elektrowni zbiornikowych do odbioru nadwyżek produkowanej energii elektrycznej we własnych instalacjach oze, do magazynowania energii w zbiornikach elektrowni wodnych,
- wykorzystanie zespołów pompowych elektrowni zbiornikowych do odbioru nadwyżek energii elektrycznej produkowanej w ciepłych elektrowniach systemowych,
- wykorzystywanie magazynów energii do pokrycia zapotrzebowania na energię w okresach braku zasilania zewnętrznego (lokalny lub systemowy black-out),
- pracę na wydzielony system,
- świadczenie usługi odbudowy napięcia w systemie po black – out’cie.

Potencjał magazynowy polskiej energetyki wodnej

Bez uregulowań prawnych w zakresie świadczenia usługi magazynowania energii nie powstanie mechanizm wymuszający zabieganie właścicieli elektrowni wodnych o utrzymanie pojemności energetycznych w zbiornikach przelewnianych nie mówiąc już o potrzebie ich powiększania. Uruchomienie dwutowarowego Rynku Energii poprzez wdrożenie Rynku Mocy w pewnym stopniu uruchomi mechanizmy skierowane na posiadanie zdolności

akumulacyjnych energii w zbiornikach wodnych, nie wydaje się jednak, żeby ewentualne dodatkowe przychody z tytułu udziału w Rynku Mocy mogły wygenerować istotne sygnały mające wpływ na decyzje podejmowane przez potencjalnych inwestorów.

Elektrownie zbiornikowe w Polsce dysponują teoretycznie znacznymi możliwościami magazynowania energii, które nie są lub nie mogą być właściwie wykorzystywane. W zbiornikach elektrowni wodnych o mocy zainstalowanej powyżej 5 MW można zmagazynować energię w ilości ponad 80 GWh.

Dysponując wypełnionymi magazynami energii w tych elektrowniach, co oznacza utrzymywanie poziomu wody na maksymalnie dopuszczalnym poziomie, i przy założeniu dysponowania pełną warstwą energetyczną w zbiorniku górnym, elektrownie te mogą teoretycznie nawet przez ponad pięć dob pracować z mocą 380 MW.

We wstępnie zinwentaryzowanych zbiornikach elektrowni wodnych o mocy zainstalowanej do 5 MW można zmagazynować energię w ilości prawie 5 GWh.

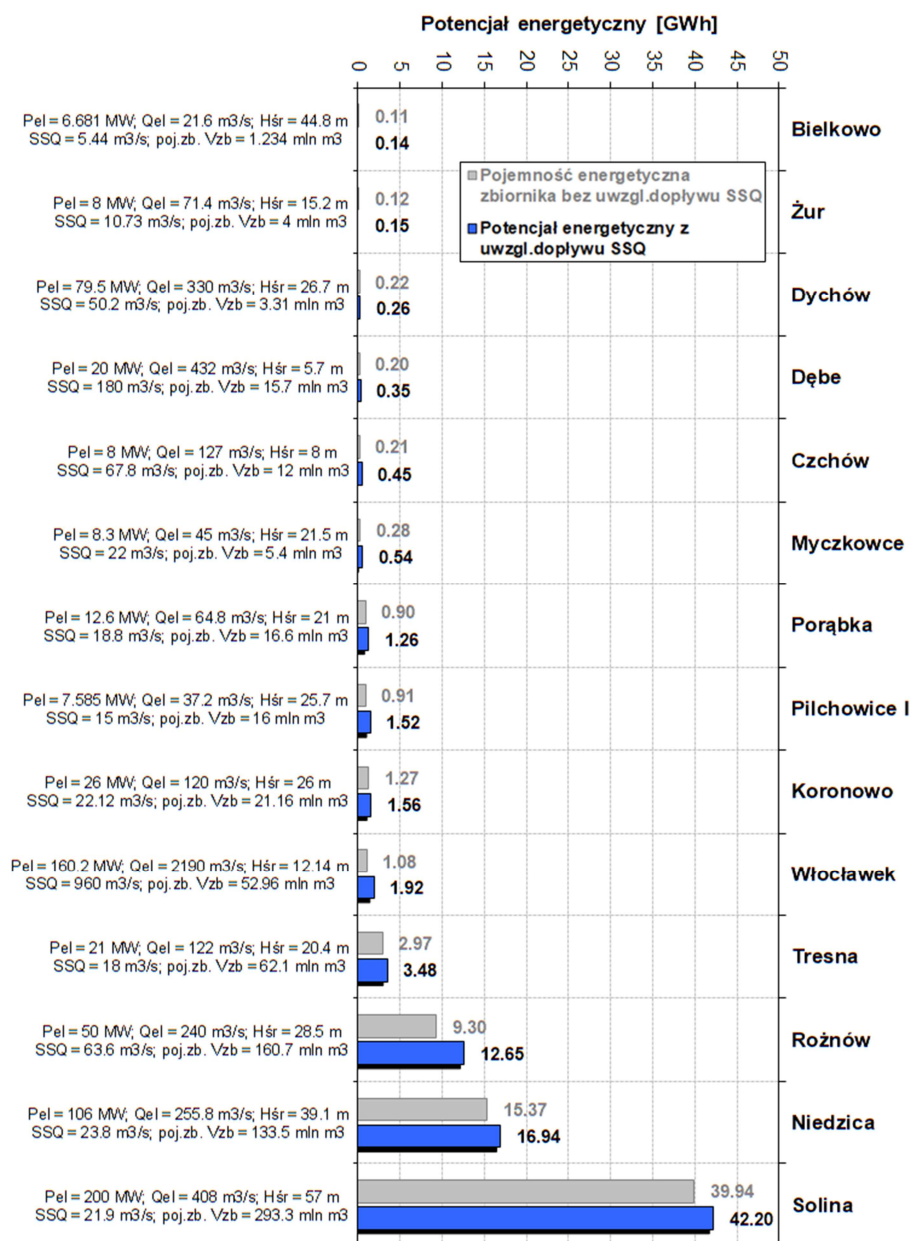
Dysponując wypełnionymi magazynami energii w tych elektrowniach, elektrownie te mogą teoretycznie nawet przez ponad dobę pracować z mocą 40 MW.

Są to jednak szacunki maksymalnych możliwości magazynowania energii liczone dla stanu, w którym jest osiągnięty maksymalny dopuszczalny poziom wody w zbiorniku górnym. Mogą one być obarczone dużym błędem wynikającym z:

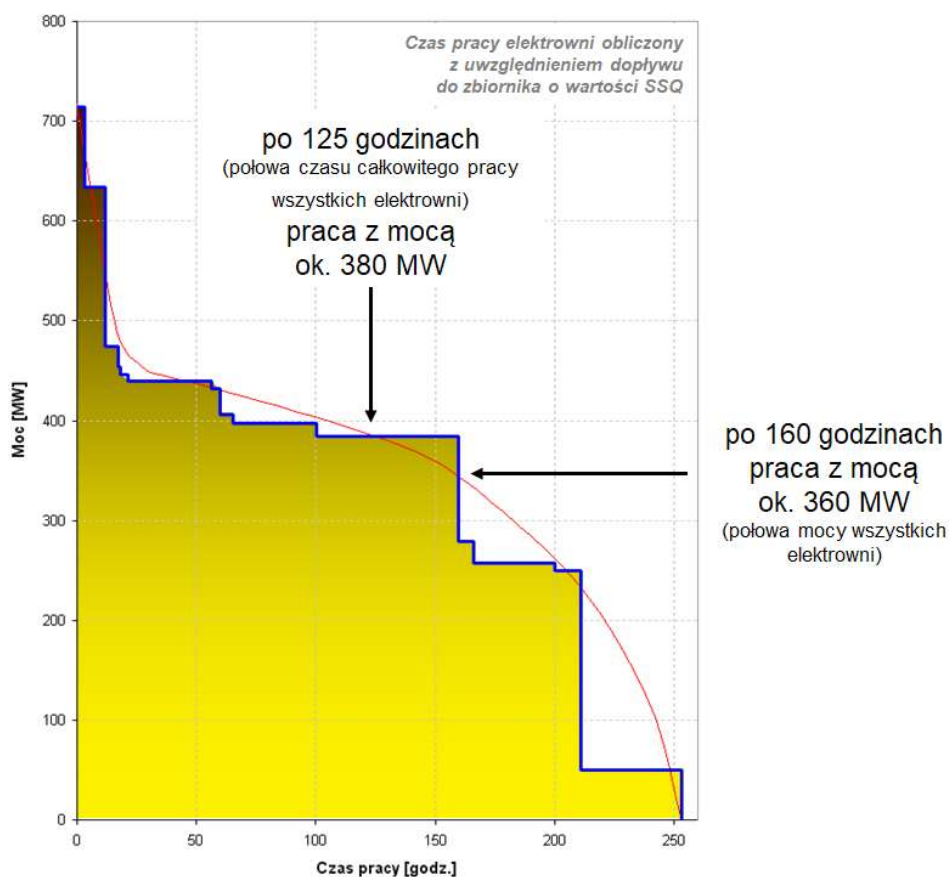
- wyznaczenia pojemności energetycznej w oparciu o pierwotnie obowiązujące pozwolenia wodnoprawne,
- nieuwzględniania obowiązku tworzenia rezerwy powodziowej w określonych w pozwoleniach wodnoprawnych okresach.

Generalnie należy przyjąć, że oszacowane możliwości magazynowania energii są przewymiarowane. Faktyczna wielkość tego przewymiarowania zależy od wielu czynników, na które w większości mają wpływ aktualne regulacje prawne w obszarze ochrony środowiska, gospodarki wodnej, prawa budowlanego, fiskalnego, energetycznego oraz ustawy o odnawialnych źródłach energii.

Lewandowski, S., Lewandowski, M.: Potencjalne możliwości magazynowania energii w zbiornikach elektrowni wodnych

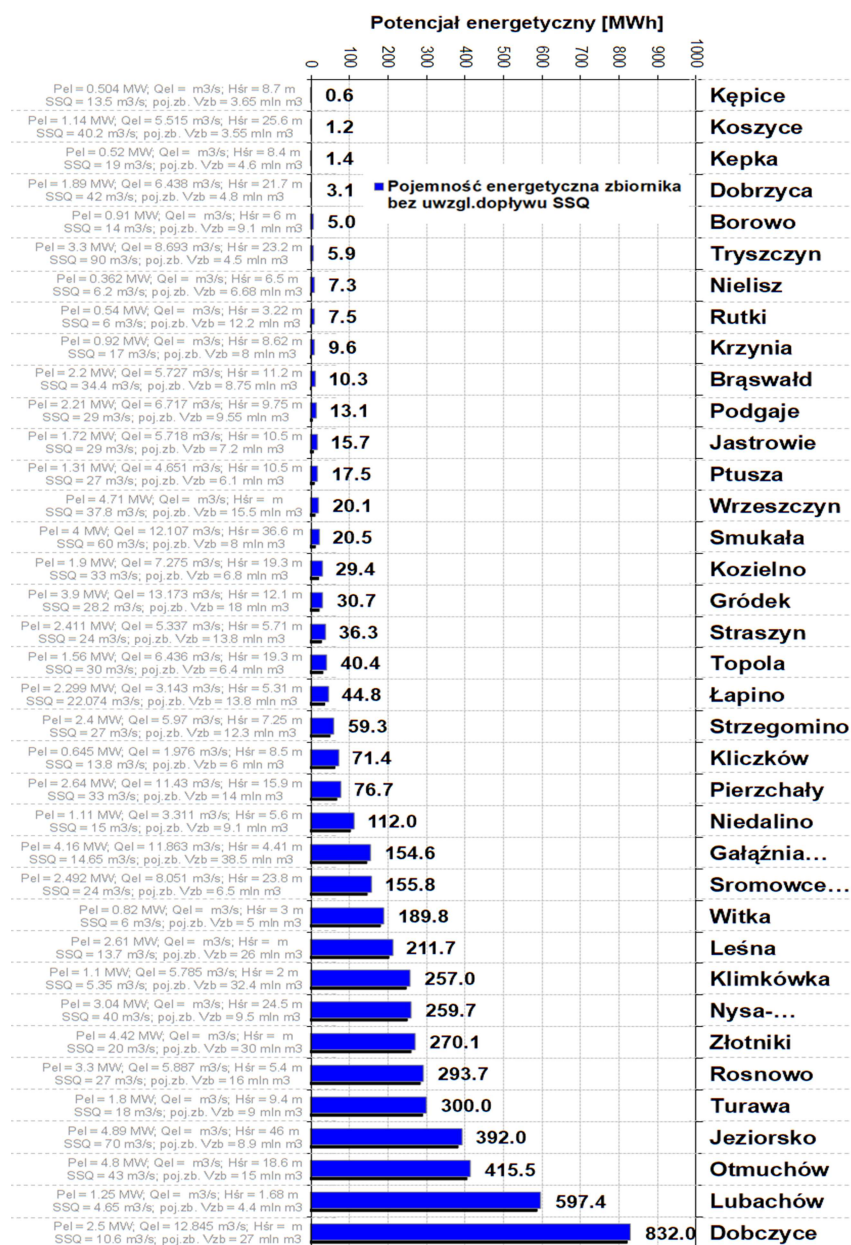


Rys. 4 Możliwości akumulacyjne elektrowni wodnych o mocy zainstalowanej powyżej 5 MW

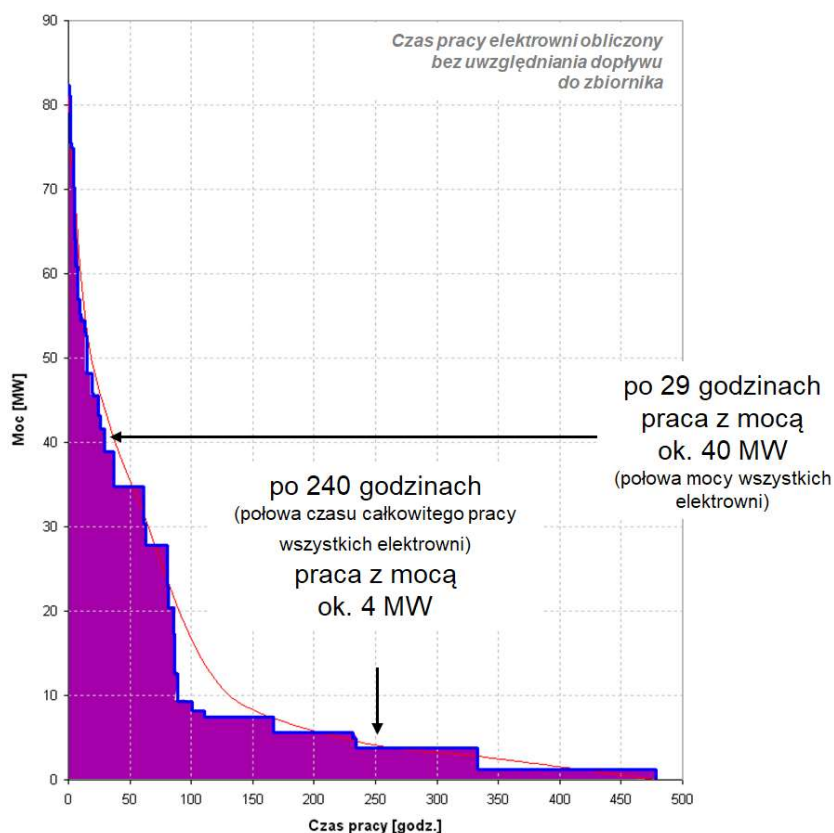


Rys 5 Czas pracy dużych elektrowni wodnych w funkcji obciążenia mocą czynną z wykorzystaniem zdolności magazynowych zbiornika wodnego.

Lewandowski, S., Lewandowski, M.: Potencjalne możliwości magazynowania energii w zbiornikach elektrowni wodnych



Rys. 6 Możliwości akumulacyjne elektrowni wodnych o mocy zainstalowanej poniżej 5 MW



Rys. 7 Czas pracy małych elektrowni wodnych w funkcji obciążenia mocą czynną z wykorzystaniem zdolności magazynowych zbiornika wodnego.

Pomimo pewnych niedokładności w oszacowaniu możliwości magazynowych należy zadać pytanie: czy stać nas na dalsze ignorowanie tych zasobów magazynowania w postaci przelektrownianych zbiorników wodnych? Program Przechowywania Energii realizowany przez Departament Energii w USA wyznaczył już w lutym 2011 roku pięcioletnie cele redukcji kosztów kapitałowych inwestycji skierowanych na magazynowanie energii na poziomie 250 \$/kWh. Oznacza to, że wybudowanie magazynów energii o pojemności 90 GWh, które potencjalnie posiadamy i tylko trzeba je reaktywować, kosztowałoby w warunkach USA ok. 22,5 mld\$ (czyli prawie 90 mld PLN).

Czy są w Polsce możliwości rozwoju energetyki wodnej z elektrowniami zbiornikowymi? Oczywiście tak, potrzebna jest tylko przychylność władz

państwowych i regionalnych zarówno do budowy, jak i do reaktywacji istniejących „uśpionych” zasobów. Nie mając dostępu do rzetelnych i precyzyjnych danych na temat potencjalnych możliwości magazynowania energii w przyelektrownianych zbiornikach wodnych, trudno dokładnie ocenić, jakie efekty mogłyby przynieść ich reaktywacja. Informacje, jakie posiadamy o naszych obiektach, zwłaszcza tych mniejszych, które pozwoliłyby ocenić możliwości świadczenia usługi magazynowania energii, są często szczątkowe, enigmatyczne – a najczęściej nieprecyzyjne.

Na konferencji REE 2018 została przedstawiona koncepcja budowy zespołu elektrowni szczytowo – pompowych opartego o naturalne zbiorniki wodne trzech jezior oddalonych od siebie o maksimum 1.300 m z różnicą poziomów 50 i 30 m. Przewidziane urządzenia wytwórcze o mocy generacyjnej 5,7 MW i silnikowej (pompowej) 4,8 MW stwarzały możliwość świadczenia przez zespół całego wachlarza usług regulacyjnych, w tym również pracy interwencyjnej. Moc hydrozespołów została dobrana tak, aby nie dopuścić podczas realizowanych czterogodzinnych cykli pracy do dużych wahań poziomów wody w naturalnych zbiornikach wodnych.

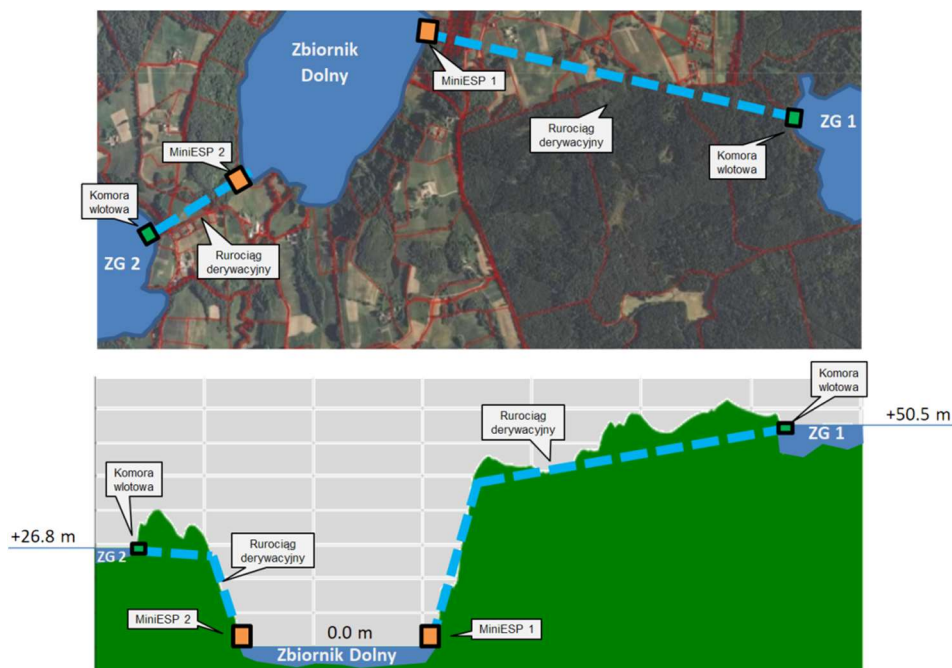
Podobnych lokalizacji można znaleźć na terenie naszego kraju więcej, konieczne jest jednak stworzenie mechanizmów, które zainteresują potencjalnych inwestorów tego typu inwestycjami. Projekty mini elektrowni szczytowo - pompowych zaczynają pojawiać się w różnych krajach w miarę rozwoju energetyki rozproszonej, tworzenia Kłastrów Energii i organizacją lokalnych obszarów bilansowania.

Żeby sporządzić wiarygodny Biznes Plan, trzeba wiedzieć, czym się dysponuje. Dlatego też należy przystąpić do opracowania koncepcji i projektów rozwiązań technicznych, technologicznych, formalno – prawnych i organizacyjnych celem przystosowania hydrowęzłów energetycznych do wykorzystania zmagazynowanej energii w zbiornikach górnych elektrowni wodnych.

Obserwując tendencje, jakie występują na rozwiniętych rynkach energii w wielu krajach można z wysokim prawdopodobieństwem stwierdzić, że w aktualnych systemowych i gospodarczych uwarunkowaniach **nie istnieje niepewność w zakresie wdrożenia usługi systemowej na zreformowanym rynku energii elektrycznej, która będzie wymagać posiadania możliwości magazynowania energii, istnieje jedynie problem terminu, w jakim ta usługa zostanie wprowadzona.** Dobrze byłoby, abyśmy byli do tego przygotowani. W przeciwnym razie będziemy zmuszeni do korzystania ze zdolności magazynowych poza naszymi granicami. Zdaniem Jürgena Stotza –

Lewandowski, S., Lewandowski, M.: Potencjalne możliwości magazynowania energii w zbiornikach elektrowni wodnych

przewodniczącego Niemieckiego Komitetu Światowej Rady Energetycznej – rolę zasobnika energii dla niemieckiego systemu energetycznego mogłyby odgrywać elektrownie szczytowo-pompowe i zbiorniki wodne położone poza granicami Niemiec, przede wszystkim w Norwegii i Szwecji oraz w Austrii.



Rys 7 Lokalizacja zespołu mini elektrowni szczytowo – pompowych „Trzy Jeziora” [5].

Trzeba przygotować się na długą i niełatwą drogę dojścia do uzyskania właściwego, niedyskryminującego żadnej ze stron projektu reaktywacji zdolności magazynowych przelektrownianych zbiorników wodnych, a także inicjowania rozwoju energetyki wodnej wykorzystującej zbiorniki wodne sztuczne i naturalne.

WNIOSKI

1. Udział niestabilnych źródeł energii w europejskim bilansie energetycznym będzie systematycznie z dużą intensywnością rosnąć.

2. W przewidywalnej przyszłości światowa energetyka wodna utrzyma swoją pozycję dominującego stabilizatora sieci elektroenergetycznej. Należy oczekiwać dalszego rozwoju elektrowni pompowych i rosnącego wykorzystania zbiorników istniejących elektrowni wodnych - również w ramach międzynarodowego rynku usług systemowych.
3. Ograniczona liczba dobrych lokalizacji dla elektrowni pompowych, duży stopień wykorzystania potencjału hydroenergetycznego w niektórych krajach członkowskich i ograniczenia środowiskowe obowiązujące dziś w całej Unii Europejskiej spowodują zapewne stopniowy wzrost znaczenia niekonwencjonalnych magazynów energii hydraulicznej.
4. Znaczenie magazynów energii elektrochemicznej i elektrycznej (ogniwa, kondensatory itp.) będzie również rosło, ale pozostanie ograniczone głównie do sieci lokalnych. Istotną przeszkodą może okazać się ograniczona trwałość i troska o środowisko naturalne oraz wysoka cena zarówno produkcji, jak i utylizacji tego typu magazynów. Dziś dużym ograniczeniem w upowszechnieniu stosowania tych technologii jest stosunkowo wysoki koszt. W wielu przypadkach dobrym rozwiązaniem alternatywnym mogą być zespoły małych elektrowni wodnych w tym mini elektrowni szczytowo - pompowych.
5. Wykorzystanie potencjału magazynowego zbiorników istniejących elektrowni wodnych oraz kaskad zwartych jest optymalnym sposobem zapewnienia mocy regulacyjnej i interwencyjnej dla systemu elektroenergetycznego. Ponowne uwolnienie tego potencjału w Polsce wymaga jednak rewizji rygorystycznych pozwoleń wodnoprawnych.
6. Uwzględnienie w dynamicznym rynku energii elektrycznej usługi magazynowania energii z możliwością wykorzystania pojemności zbiorników wodnych elektrowni wodnych to wyzwanie, które podejmowane jest niemal we wszystkich uprzemysłowionych krajach. Nie zapominając o argumentach wskazujących na pozytywne efekty dla gospodarki wodnej i stabilizacji parametrów pracy systemu elektroenergetycznego w ujęciu krajowym i regionalnym (energetyka rozproszona) a także dla szeroko pojętego rozwoju gospodarczego kraju, należy zauważyć, że przywrócenie rentowności nadmiernie obciążonym wszelkimi daninami fiskalnymi i parafiskalnymi elektrowniom zbiornikowym, poprzez możliwość pozyskania dodatkowych przychodów z tytułu świadczenia usługi magazynowania energii, to otwarcie możliwości na zahamowanie regresu w energetyce wodnej i być może uzyskanie dodatkowych impulsów do rozwoju tego segmentu odnawialnych źródeł energii. Środowisko energetyki - nie tylko wodnej - oraz gospodarki wodnej swoją aktywnością powinno wyprzedzać

działania decydentów i włączyć się w proces postępujących przemian gospodarczych poprzez wypracowywanie rozwiązań, które uwzględnią i docenią potrzebę budowy wielozadaniowych stopni wodnych.

7. Bezpieczny rozwój niestabilnych źródeł energii w Polsce po roku 2020 wymaga uruchomienia od dawna już planowanych inwestycji elektrowni zbiornikowych i szczytowo - pompowych. Alternatywnym rozwiązaniem pozostaje import usług systemowych.

Literatura:

- [1] Steller, J.: Energetyka wodna i jej rozwój. Acta Energetica 3/16(2013).
- [2] U.S. Energy Information Administration, Monthly Energy Review, March 2018, preliminary data for 2017.
- [3] Taylor, P., Bolton, R., Stone, D., Zhang, X., Martin, Ch. i Upham, P. 2012. Pathways for Energy Storage in the UK. Centre for Low Carbon Futures, s. 21
- [4] Wojciechowski, H.: Technologie wytwarzania oraz magazynowania energii elektrycznej i ciepła w aspekcie bezpieczeństwa elektroenergetycznego kraju. Zadanie nr 5. PBZ-MEiN-1/2/2006. Wrocław, 2008.
- [5] Adamkowski, A., Lewandowski, M., Lewandowski, S.: hydroenergetyczne zespoły zasobnikowo – regulacyjne, jako rozproszone magazyny energii elektrycznej. Konferencja Rynek Energii Elektrycznej 2018.

POTENTIAL ENERGY STORAGE POSSIBILITIES IN UPPER WATER RESERVOIRS OF HYDROPOWER PLANTS

Abstract: The article presents a discussion on the possibilities of energy storage in hydroelectric power plants, being the way for development of hydropower sector within electric power systems evolving towards distributed systems. The authors present the comparison of the potential of available storage technologies resulting from their current level of development with a storage system based on usage of the upper reservoirs of hydropower plants. Analysis of the current state of the Polish hydropower sector and its comparison with the requirements of modern electric power systems developed according to the global trends allowed to define opportunities and barriers as well as the scope of activities necessary to provide hydropower plants with the possibility of providing energy storage services in these systems.

Słowa kluczowe: Energetyka wodna, magazynowanie energii, elektrownie zbiornikowe, elektrownie szczytowo-pompowe.