



Analiza współzależności zagrożeń stosunków wodnych (gospodarki wodnej) i bezpieczeństwa energetycznego w kontekście mocy osiągalnej przepływowych elektrowni wodnych.

Jan Popczyk, Krzysztof Bodzek, Marcin Fice

Historyczna (retrospektywna) analiza rozwoju małych elektrowni wodnych (o mocach od kilkudziesięciu kW do kilku MW) i antycypacja trajektorii transformacyjnej energetyki w horyzoncie 2050 – z uwzględnieniem szeroko rozumianych procesów społecznych – prowadzą do nieuchronnej rewizji bardzo mocno zakorzenionych poglądów dotyczących roli (perspektyw) tych elektrowni. Wręcz należy mówić w tym wypadku o jednym z licznych błędów poznawczych transformacji energetycznej „drugiego znaczenia” (pierwsze, podstawowe znaczenie ma pięć błędów poznawczych nazywanych krytycznymi [1]).

Małe elektrownie wodne zapoczątkowały elektryfikację na obszarach współczesnej Polski w końcu XIX wieku, z bardzo niewielkim tylko opóźnieniem w stosunku do świata (Europa, USA) [2]. Należy podkreślić, że pierwszeństwo małych elektrowni wodnych w elektryfikacji wiązało się nierozdzielnie z endogenicznym modelem rozwojowym gospodarki. Mianowicie, małe elektrownie wodne z jednej strony zapewniały najszybsze wykorzystanie wynalazku, którym były prądnice elektryczne, zwiększały komfort życia (oświetlenie) i wydajność społeczną pracy (napęd elektryczny), wreszcie koszty zewnętrzne małych elektrowni wodnych (ingerencja w środowisko) były niewielkie.

Po uzyskaniu niepodległości w 1918 roku małe elektrownie wodne i autonomiczne systemy wytwórczo-sieciowe były głównym rozwiązaniem technicznym napędzającym w Polsce elektryfikację. To rozwiązanie techniczne, właściwe dla endogenicznego modelu gospodarki, miało odzwierciedlenie w prawno-regulacyjnym modelu użyteczności publicznej i we właściwym dla niej (użyteczności publicznej) modelu „biznesowym” (organizacyjno-zarządczym, ekonomicznym) [2]. Efektem było, przed wybuchem II wojny Światowej, około 6 tys. małych elektrowni wodnych (przy tym większość z nich nie miała jednak statusu elektrowni). Praktycznie przez cały okres międzywojenny Alfons Hoffmann tworzył, i w dużym stopniu skutecznie realizował, długofalową koncepcję regionalnego (pomorskiego) systemu elektroenergetycznego, o mocy wytwórczej elektrowni wodnych 60 MW (moc uwzględniająca kataster sił wodnych Pomorza), połączonych regionalną elektroenergetyczną siecią 60 kV.

Wraz ze zmianą ustrojową po II wojnie światowej i budową wielkoskalowej elektroenergetyki węglowej (w polskim krajowym modelu egzogenicznym funkcjonującym w endogenicznym systemie RWPG), rozpoczęta została likwidacja małych elektrowni wodnych w segmencie wytwórczym w systemie KSE. Kolejna zmiana ustrojowa w 1989 roku, a w niej ustrojowa reforma elektroenergetyki zapoczątkowana w 1990 roku zahamowała likwidację, a nawet spowodowała istotną odbudowę segmentu wytwórczego małych elektrowni wodnych w KSE. Jednak na koniec drugiej dekady XXI wieku z bardzo dużą pewnością trzeba podkreślić, że następuje biegunowe odwrócenie roli małych elektrowni



wodnych w obszarze interakcji „elektroenergetyka i bezpieczeństwo energetyczne – gospodarka wodna”.

Jest to wynik historycznej zmiany uwarunkowań rozwojowych względem tych, które były charakterystyczne dla końca XIX wieku. Niezależnie od tego, że wówczas i obecnie mówiło się i mówi się o małych źródłach wytwórczych energii elektrycznej jako bazowych, to małe elektrownie wodne w obszarze bezpieczeństwa energetycznego nie mają już, i nie będą miały istotnego znaczenia. Mogą mieć jedynie znaczenie niszowe jako rozwiązanie wspomagające gospodarkę wodną. Wynika to z faktu, że małe elektrownie wodne nie są w stanie konkurować z małymi źródłami wytwórczymi w postaci mikroelektrowni biogazowych (o mocach kilkudziesięciu kW) i elektrowni biogazowych (o mocach kilkuset kW), ze źródłami PV (o mocach kilku do kilkudziesięciu kW), z mikroelektrowniami wiatrowymi (o mocach kilku do kilkudziesięciu kW) i elektrowniami wiatrowymi (pojedynczymi źródłami o mocach jednostkowych 3 do 4 MW), wreszcie z elektrycznymi zasobnikami akumulatorowymi. Jeszcze bardziej niekonkurencyjność małych źródeł wodnych będzie się ujawniać wraz z redukcją krytycznych błędów poznawczych, zwłaszcza trzeciego (błąd nieadekwatności źródeł OZE) i piątego (błąd ceny przeciętnej) [1].

1. Wstęp

Elektrownie wodne, szczególnie przepływowe, są ogniwem łączącym dwa sektory gospodarcze. Mianowicie, są to: gospodarka energetyczna i gospodarka wodna. Poprawne i bezpieczne wykorzystanie potencjału rzek i zbiorników wodnych do celów energetycznych oraz regulacja stosunków wodnych może być zrealizowane jedynie w ramach współzależnego funkcjonowania obydwu gospodarek. Efektywność w obu obszarach może być zagwarantowana jedynie poprzez koordynację planów, szczególnie długoterminowych. Wszelkie budowle wodne są bardzo kosztowne, choć udział kosztów budowy infrastruktury energetycznej w kosztach całej inwestycji związanej z dostosowaniem koryta rzeki, to ok. 10-20%, zależnie od wielkości elektrowni.

Analizując współzależności pomiędzy energetyką wodną, w szczególności bezpieczeństwem energetycznym i potencjałem energetycznym, a gospodarką wodną należy mieć na uwadze kilka aspektów. Mianowicie, są to:

- potencjał energetyczny zasobów wodnych, dotyczy możliwości wykorzystania przepływającej wody (strumienia wody) do napędzania turbiny wodnej i w efekcie do produkcji energii elektrycznej. Potencjał energetyczny zasobów wodnych ocenia się najczęściej w postaci ich trzech wartości: teoretycznej, technicznej i ekonomicznej;
- bezpieczeństwo hydrologiczne zasobów wodnych rzek i zbiorników, dotyczy wpływu obiektów budowlanych elektrowni wodnych na kształt koryta rzeki i zmianę przepływu oraz stanu wody w bezpośredniej odległości od obiektu i w całym korycie rzeki lub zbiorniku;
- bezpieczeństwo hydrologiczne obszarów zlewni, dotyczy już całego obszaru oddziaływania obiektu na wszystkie ciekły wodne i zbiorniki w zlewni, szczególnie na stan wody i przepływy. Dotyczy również poziomu wód gruntowych na obszarze zlewni;



- bezpieczeństwo ekologiczne zasobów wodnych rzek i zbiorników, dotyczy w szczególności zmiany kształtu koryta rzeki lub kształtu dna zbiornika na skutek budowy obiektu spiętrzającego, co bezpośrednio wpływa na rozwój organizmów oraz gromadzenie osadów. Dotyczy to również migracji organizmów żywych; budowa elektrowni wodnej skutkuje często powstaniem zbiornika wodnego, a to wiąże się z zalaniem najczęściej terenów zielonych. W początkowym okresie istnienia zbiornika masa organiczna ulega rozkładowi beztlenowemu emitując metan. Następuje okres zmniejszenia emisji, po czym w trakcie eksploatacji zbiornika na jego dnie gromadzą się m.in. osady organiczne, które również ulegają rozkładowi wydzielając metan;
- bezpieczeństwo ekologiczne obszarów zlewni, dotyczy w szczególności zmiany stosunków wodnych wód podziemnych, wpływając m.in. na rolnictwo oraz powstawanie nowych obszarów zalewowych wpływając na lokalną florę i faunę.

Synergie w przypadku gospodarki energetycznej i wodnej można upatrywać w mikro i małych elektrowniach wodnych. Jeśli chodzi o średnie i duże obiekty, to mogą one być usytuowane w biegach głównych dużych rzek, czyli Wisły i Odry wraz z niektórymi dorzeczami. Ten stan jest dobrze rozpoznany i oszacowany jest potencjał energetyczny tych rzek. Pomimo tego oraz biorąc pod uwagę, że nie wybudowano żadnej innej dużej przepływowej elektrowni wodnej oprócz elektrowni we Włocławku (której bezpieczna eksploatacja była projektowana tylko w kaskadzie), świadczy o tym, że problemy techniczne i zagrożenia środowiskowe są niewspółmierne do możliwego uzysku energetycznego. Od uruchomienia elektrowni wodnej we Włocławku (moc 160 MW) postawiono farmy wiatrowe o mocy 6 GW, a w ostatnim roku (2019) moc źródeł fotowoltaicznych przekroczyła 1 GW. Jednakże w kontekście rozproszonej energetyki opartej o źródła OZE z generacją wymuszoną (źródła fotowoltaiczne i wiatrowe) istotne jest zapewnienie zasobów regulacyjnych dla tych źródeł. Chodzi tu w głównej mierze o zasoby regulacyjne kompensujące potrzeby energetyczne odbiorców w chwilach deficytu produkcji energii w źródłach OZE z generacją wymuszoną, przy czym taka kompensacja powinna odbywać się z uwzględnieniem błędu poznawczego 3 [1]. Mikro i małe elektrownie wodne mogłyby być dobrym uzupełnieniem innych zasobów regulacyjno-bilansujących, jakimi są źródła biogazowe oraz magazyny akumulatorowe, ponieważ ich pojemność w trybie magazynowania można szacować w okresach od kilku godzin dla mikro elektrowni (klasy kilkudziesięciu kW) do kilkunastu godzin dla elektrowni przepływowych małych (klasy 1 MW) i kilkudziesięciu godzin dla małych elektrowni na zbiornikach wodnych (klasy 5 MW).

W przypadku dużych elektrowni wodnych przepływowych pracujących w reżimie regulacyjnym (regulacja mocy w elektrowniach wodnych cechuje się dużą dynamiką i zapewnia znacznie większy zakres mocy regulacyjnej w porównaniu do elektrowni cieplnych) efekty zmian hydrologicznych są znaczące. Chodzi głównie o duże amplitudy zmian przepływów, które bezpośrednio wpływają na stan wody przed i za elektrownią. Zbyt duże wahania są niekorzystne dla lokalnego środowiska naturalnego, migracji ryb i innych organizmów żywych. Stąd w przypadku dużych elektrowni zachodzi konieczność stabilizowania parametrów hydrologicznych przez budowę zbiorników przed i za elektrownią.



a także przepławek. Takie zabiegi w perspektywie długookresowej mogą być korzystne dla stabilizacji poziomów wód powierzchniowych jak i podziemnych. [3]

Również mikro i małe elektrownie wodne mogą wywierać negatywny wpływ na środowisko. Z jednej strony mikro i małe przepływowe elektrownie wodne wykorzystują naturalny (ale jednak zmodyfikowany, dostosowanych do wymagań technicznych) przepływ wody, z drugiej natomiast modyfikacja koryta może wpłynąć niekorzystnie na np. migrację ryb i innych organizmów, a także na znaczące zmiany w kształcie koryta rzeki oraz lokalne stosunki wodne. Retencję, a szczególnie małą retencję, należy analizować w dwóch aspektach. Mianowicie, jej wpływ na działalność gospodarczą (w głównej mierze na rolnictwo i leśnictwo) oraz odwrotnie, wpływ działalności gospodarczej człowieka na retencję. Są to procesy nierozłączne, posiadające sprzężenia zwrotne. Z jednej strony wpływ człowieka (przemysłu w ogólności) zaburza naturalną retencję, z drugiej natomiast możliwe jest jej kształtowanie. Zorganizowany i kontrolowany obieg wody, w miejscach gdzie jest to konieczne, wpływa korzystnie na np. nawadnianie obszarów rolnych i zapobiega powodziom. Naturalne i wymuszone przemiany w otoczeniu człowieka zawsze zachodziły i będą zachodzić z zasadniczą rolą obiegu wody. Retencja jest jednym z elementów i znanych środków kontroli obiegu wody. Niemniej jednak równowaga w obiegu wody może być łatwo zachwiana. Niekorzystne procesy mogą występować z udziałem wielu sektorów gospodarki. Jednak największy wpływ będzie miał sektor energetyczny, wydobywczy, chemiczny i budowlany. Są to zagrożenia związane z zanieczyszczeniem chemicznym wód powierzchniowych i gruntowych, a także zmiany mechaniczne i hydrologiczne (np. obniżenie poziomu wód gruntowych i powierzchniowych) oraz ubytek wody wskutek parowania i trudność z odprowadzeniem wody do gruntu. Zagadnienie retencji jest bardzo szerokie i nie odnosi się tylko do gromadzenia wód powierzchniowych i ich gospodarowania w sposób uregulowany. W dużej części w skład retencji wchodzi wody gruntowe, szczególnie na obszarach leśnych. Tak jak w przypadku wód powierzchniowych pojemność zbiorników wodnych (naturalnych i sztucznych) oraz koryt rzek jest znana, tak w przypadku pojemności retencji obszarów zalesionych nie jest znana. Przy czym już wiadomo, że pojemność ta jest coraz mniej wykorzystywana z uwagi na obniżenie poziomu wód powierzchniowych i gruntowych. [4]

W ekspertyzie brano pod uwagę powiązanie gospodarki wodnej z generacją energii w elektrowniach wodnych przepływowych w aspekcie energetycznym oraz środowiskowym, ograniczając się do mikro i małych elektrowni, których wpływ na środowisko jest trudny do rozstrzygnięcia. Ekspertyza ma na celu również próbę wskazania powodów, dlaczego energetyka wodna w Polsce nie rozwija się tak jak inne źródła OZE, pomimo, że historycznie ich potencjał w wytwarzaniu energii elektrycznej został zauważony później.

2. Przepływowe elektrownie wodne. Podstawowe zależności hydroenergetyczne.

Elektrownie wodne przepływowe, budowane na rzekach lub zbiornikach wodnych, można traktować jako źródła regulacyjno-bilansujące. Dynamika regulacji takich elektrowni jest na



tyle duża, że można je wykorzystywać co najmniej w usłudze regulacji wtórnej (minutowej). Mogą też pełnić rolę zasobników energii.

Energia przenoszona przez strumień wody opisuje równanie Bernoulliego:

$$e_w = \frac{v^2}{2} + g \cdot h + \frac{p}{\rho} \quad (1)$$

gdzie:

$\frac{v^2}{2}$ – energia kinetyczna strumienia wody: v – prędkość przepływu wody;

$g \cdot h$ – energia potencjalna strumienia wody: g – przyspieszenie ziemskie, h – wysokość spadu;

$\frac{p}{\rho}$ – energia ciśnienia: p – ciśnienie w przekroju strumienia wody, ρ – gęstość płynu (równanie ogólne dotyczy wszystkich typów płynów).

Z równania (1) można wnioskować, które składowe wielkości fizycznych i geometrycznych mają wpływ na moc generowaną przez turbinę wodną. Są to: prędkość strumienia wody (dla elektrowni wodnych podaje się przełyk elektrowni, czyli przepływ objętości wody w czasie) oraz wysokość spadu wody. [5]

Moc (instalowana) elektrowni wodnej jest definiowana zależnością:

$$P_i = 9,81 \cdot \eta_t \cdot \eta_g \cdot Q_i \cdot H_n \quad (2)$$

gdzie:

η_t – sprawność turbiny przy nominalnym spadzie i przełyku;

η_g – sprawność generatora w warunkach znamionowych pracy turbiny;

Q_i – przełyk (instalowany) [m^3/s];

H_n – spad znamionowy [m].

Równanie (2) stosuje się praktycznie do wstępnego doboru mocy elektrowni wodnej, wykorzystując do tego celu również charakterystykę przepływu rocznego rzeki lub średnie stany wody w zbiorniku. [6] [7] Równanie to można wykorzystać również do oszacowania innych charakterystycznych wartości mocy, jak np. moc średnia dobową, moc szczytową, moc osiągalną, moc gwarantowaną. Aby uzyskać wynik należy do obliczeń zastosować odpowiednie wartości dla zmiennych spadu i przełyku, i adekwatnych do punktu pracy sprawność turbiny i generatora.

Przykładowo, średnia moc jaką może wytworzyć elektrownia w ciągu doby w określonych warunkach spadu i przepływu pracując z ustalonych schematem opisuje się równaniem:

$$\dot{P}_{dob} = 9,81 \cdot \eta_t \cdot \eta_g \cdot Q_{dob} \cdot H_{dob} \quad (3)$$

gdzie:

η_t – sprawność turbiny w warunkach określonych pracy turbiny;

η_g – sprawność generatora w warunkach określonych pracy turbiny;

Q_{dob} – przełyk średni dobowy;



H_{dob} – spad średni dobowy.

Bardzo istotnym z punktu widzenia osiągalnej mocy elektrowni wodnej jest wartość parametru spad. Spad jest to parametr geometryczny elektrowni wodnej, w niewielkim stopniu zależny od przepływu wody w elektrowni zbiornikowej, a w przypadku elektrowni rzecznej spad zależny jest od przepływu. Dla rzek w Polsce parametr spad nie osiąga dużych wartości, do kilkunastu metrów, ale najczęściej jest to kilka metrów. W celu poprawy (zwiększenia) tego parametru stosuje się spiętrzenia (jazy) w korycie rzeki. Spiętrzenie nie tylko umożliwia uzyskanie większej wartości mocy, ale również skutkuje uzyskaniem zbiornika buforowego poprawiającego własności regulacyjne mocy elektrowni oraz parametrów hydrologicznych rzeki i małej retencji.

Spad brutto elektrowni wodnej jest to różnica rzędnych zwierciadła wody na początku (przed turbiną) i na końcu (za turbiną) rzeki wykorzystywanego energetycznie przez elektrownię. Dla mikroelektrowni przyjazowych odcinek ten jest krótki, do kilku metrów. Dla elektrowni derywacyjnych może osiągnąć długości rzędu setek metrów, a nawet kilometrów. Ważniejszym parametrem jest jednakże spad netto elektrowni, który obejmuje również efekt strat spad na krzywej spiętrzenia i na kanale doprowadzającym wodę. Zwierciadło wody górnej (GW) jest to, w zależności od typu elektrowni przepływowej:

- dla elektrowni przyjazowej – zwierciadło wody przy jazie,
- dla elektrowni na kanale – zwierciadło wody przy budynku elektrowni,
- dla elektrowni derywacyjnej z rurociągiem ciśnieniowym – zwierciadło wody na wlocie do rurociągu.

Zwierciadło wody dolnej (DW) jest bezpośrednio za wylotem wody z rury ssącej.

Spad elektrowni wodnej jest zależny od wielu czynników:

- sposób eksploatacji elektrowni,
- rodzaj jazu (ruchomy, stały),
- zmiany zachodzące w łóżysku rzeki poniżej elektrowni,
- warunki hydrologiczne.

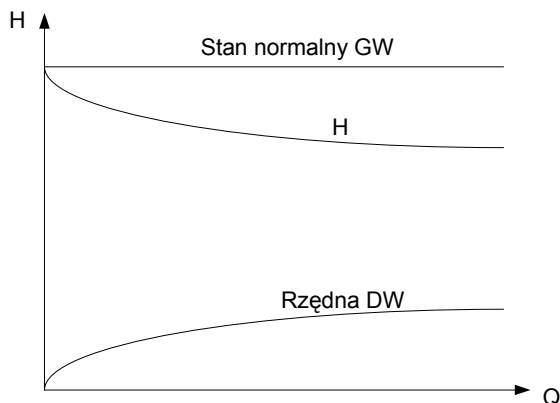
Jeśli elektrownia pracuje przy stałej rzędnej GW wartość spadu zależy od rzędnej DW. Jeżeli dolną wodą elektrowni jest rzeka wówczas spad jest funkcją przepływu (im większy przepływ tym wyżej podniesie się poziom DW), $H=f(Q)$ (rys. 1). Zależność ta nie będzie ulegała zmianom przy swobodnym odpływie wody. W przypadku utrudnionego odpływu (lód, zarośla) zależność ta będzie zmienna i zależna od utrudnień w odpływie wody. Jeśli dolna woda jest spiętrzona przez dodatkowy jaz (np. kolejnej elektrowni wodnej) to DW zależy również od spiętrzenia jazu dolnego.

Przy stałej rzędnej GW największy spad jest przy przepływie najmniejszym, a spad najmniejszy jest przy przepływie największym. Ilość wody przepływającej przez elektrownię wpływa na stan wody dolnej. Czym większy jest przepływ tym wyższy stan DW.

Jeśli DW nie jest spiętrzana przez jaz to w rzece może wystąpić zjawisko erozji co spowoduje zwiększenie spadu, ale również kawitację na turbinie i możliwość dostania się powietrza do rury ssącej i zerwania słupa wody. Dlatego dobrze jest regulować DW przez jaz



lub przez kolejną elektrownię wodną. Taka sytuacja wystąpiła w elektrowni Włocławek, gdzie koryto rzeki za elektrownią uległo silnemu wypłukaniu tuż przy zaporze.



Rys. 1. Przykładowa charakterystyka wysokości spadku H w funkcji przepływu Q . (opracowanie własne na podstawie [7])

W elektrowniach zbiornikowych spadek zazwyczaj zależy od górnej wody czyli od ilości wody w zbiorniku. Wartość chwilowa rzędnej w czasie pracy elektrowni zależy od programu pracy oraz warunków hydrologicznych. Program pracy może być uzależniony od napełniania i opróżniania zbiornika lub też od utrzymywania stałej rzędnej GW. Jeśli zaistnieje stan wielkiej wody (czyli stan np. powodzi) i woda przelewa się przez jaz wówczas także zmniejsza się spadek ponieważ przepływająca woda nie wytwarzająca energii elektrycznej podnosi rzędną DW.

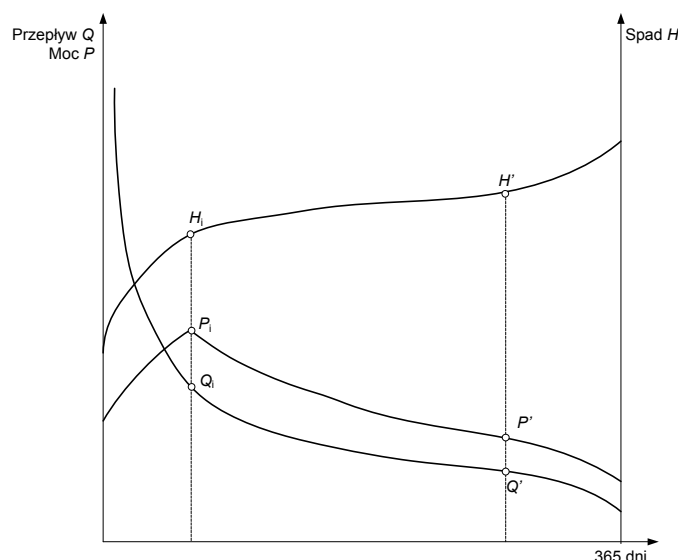
Elektrownia przepływowa wykorzystuje dopływ naturalny chwilowy i rozwija moc zależną od przełyku instalowanego i spadku chwilowego. Elektrownie przepływowe zazwyczaj nie posiadają zbiornika lecz jedynie stopień wodny pozwalający spiętrzyć wodę przed elektrownią i uzyskać odpowiedni spadek. Do spiętrzania wody najczęściej stosuje się jazy lub częściowo bezpośrednio budynki elektrowni. W drugim przypadku woda bezpośrednio napiera na budynek elektrowni. W elektrowniach przepływowych bez gromadzenia wody moc elektrowni nie może być większa niż pozwoli na to chwilowa wartość przepływu wody. Jeżeli natomiast elektrownia przepływowa bez zbiornika buforowego pracuje z mocą mniejszą niż wynika to z chwilowego przepływu to nadmiar wody musi być wypuszczany przez upusty jałowe. Jednakże możliwe jest również rozbudowanie koryta rzeki w bezpiecznym obszarze i uzyskanie niewielkiego zbiornika buforowego przez spiętrzenie wody. Stąd wniosek, że elektrownie przepływowe budowane na rzekach również mają możliwość regulacyjną mocy bez ubytku wody.

Wartość mocy dyspozycyjnej elektrowni przepływowej jest zawarta w przedziale pomiędzy mocą osiąganą przy dopływie równym przełykowi elektrowni i mocą przy najmniejszym dopływie. Zdarza się, że moc elektrowni przy bardzo dużym dopływie jest bardzo mała. Dzieje się tak ze względu na zmniejszenie spadku, np. podczas podwyższonych stanów wód (powódź, wielka woda).



Moc zapewniona elektrowni to moc jaką elektrownia osiąga w 95% dni w roku. Moc zapewniona zależy od charakteru rzeki (górska 5%-10% mocy zainstalowanej, nizinna 20%-30% mocy zainstalowanej, rzeki jeziorowe 40%-50% mocy zainstalowanej) oraz od stosunku przepływu zainstalowanego do średniego przepływu Q_i/Q_{sr} . W bilansie mocy systemu energetycznego można uwzględnić jedynie moc zapewnioną elektrowni.

Produkcja dobową elektrowni jest zależna od przepływu średniego dobowego. Największą produkcję dobową energii otrzymuje się utrzymując na stałym poziomie rzędną górnej wody. Urządzenia automatyki elektrowni powinny umożliwić regulację otwarcia przepływu turbiny w zależności do poziomu GW. Na rys. 2 pokazano uniwersalne charakterystyki uzyskiwanej mocy w zależności od spadów i przepływu w elektrowni wodnej.



Rys. 2. Wykres roczny pracy elektrowni przepływowej. H – krzywa spadów uporządkowanych, Q – krzywa przepływów uporządkowanych odpowiadająca spadowi, P – krzywa roczna mocy.
(opracowanie własne na podstawie [7])

Elektrownie przepływowe opierające produkcję energii na przepływie naturalnym, ze względu na charakterystykę mogą pracować jedynie w podstawie wykresu mocy. Elektrownie wodne przepływowe zbudowane na zbiornikach lub posiadające bufor wody uzyskany przez spiętrzenie, posiadające najczęściej możliwość okresowego regulowania przepływu, można podzielić na:

- elektrownie o wyrównaniu krótkookresowym - można magazynować przepływy w okresach dobowych czy tygodniowych,
- elektrownie o wyrównaniu długookresowym - można magazynować przepływy w okresach miesięcznych czy wieloletnich.

Oba typy elektrowni mogą pracować dostosowując produkcję energii do potrzeb systemu elektroenergetycznego, czyli jako elektrownie szczytowe, podszczytowe (należą także do grupy elektrowni w których obieg wody jest naturalny) czy też szczytowo-pompowe. Oczywiście to



nie wyklucza ich pracy jako elektrownie podstawowe. Regulacja przepływu nie jest wykorzystywana tylko do celów regulacji mocy elektrycznej, ale również do regulacji lokalnych stosunków wodnych w rzekach dopływowych i odpływowych oraz wód podziemnych w otaczającym terenie.

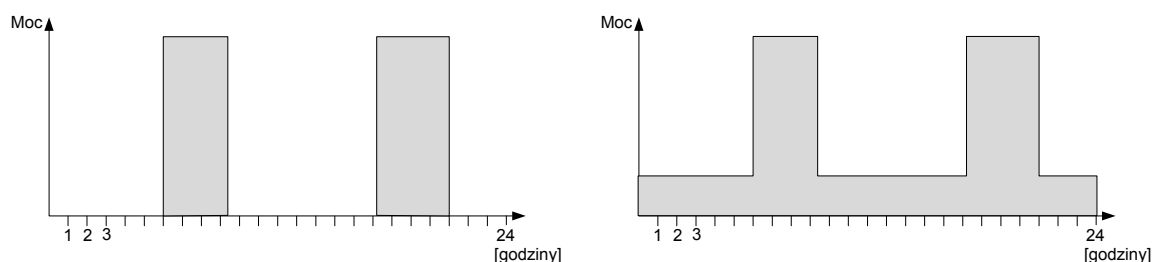
W elektrowniach przy zbiornikach i posiadające bufory wodne istnieje możliwość regulacji mocy poprzez regulowanie przepływu. W wyniku regulowania przepływu odpływy chwilowe Q_o nie są równe dopływowi do zbiornika Q_d , który występuje w tym samym czasie. Jeżeli $Q_o < Q_d$ wówczas następuje napełnianie zbiornika, jeśli $Q_o > Q_d$ to następuje opróżnianie zbiornika. Warunkiem możliwej regulacji przepływu jest dostateczna objętość zbiornika, w którym gromadzi się woda z dopływu.

Cykl regulowania przepływu jest to czas całkowitego opróżnienia objętości użytecznej zbiornika (wody wykorzystanej do produkcji energii elektrycznej) i ponownego napełnienia. Elektrownie tego typu zazwyczaj zaopatrują system w energię elektryczną jako elektrownie podszczytowe i szczytowe, co oczywiście nie oznacza, że nie pracują też jako elektrownie podstawowe. Przy pracy ciągłej ze stałą mocą przepływ jest utrzymywany w taki sposób, aby stan GW był na stałym poziomie.

W przypadku pracy szczytowej zależność pomiędzy przelikiem szczytowym Q_s , przepływem Q , czasem trwania pracy szczytowej t i czasem trwania cyklu τ :

$$\frac{Q}{Q_s} = \frac{t}{\tau} \quad (4)$$

Elektrownia ze zbiornikiem z regulacją dobową może oddawać moc w granicach mocy zainstalowanej, który zależy od mocy rozwijanej i dopływu do zbiornika (będzie pracować tak długo z określoną mocą, jak dużo jest wody w zbiorniku i jak szybko tą wodę w przerwie można zgromadzić z dopływu, czyli czas pracy szczytowej jest zależny od ilości dopływu i ilości wody w zbiorniku oraz mocy rozwijanej). Elektrownia taka może pracować szczytowo (rys. 3, po lewej) i oddawać energię w szczytach zapotrzebowania, a następnie mieć przerwę lub pracować z małą mocą gromadząc wodę przed następnym szczytem (rys. 3, po prawej).

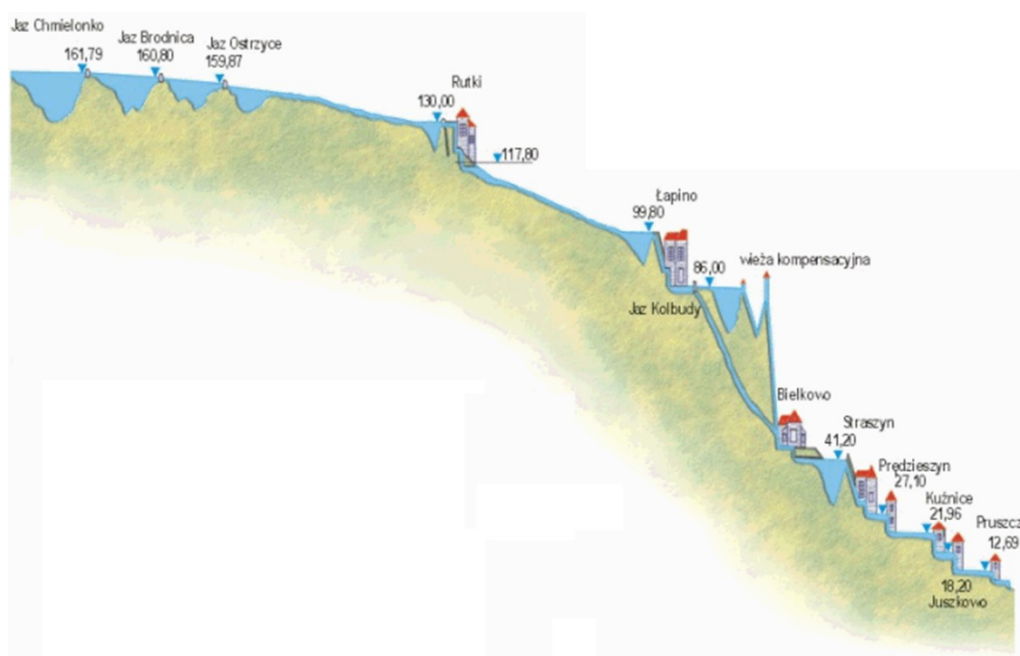


Rys. 3. Przykłady pracy szczytowej elektrowni wodnej z możliwością okresowej regulacji przepływu (opracowanie własne)



W tym przypadku na odpływie z elektrowni musi znajdować się zbiornik wyrównawczy, aby w czasie dużego zrzutu wody nie spowodować powodzi, a w czasie postoju (brak odpływu wody, gromadzenie wody) nie spowodować wysuszenia koryta rzeki. Jeśli zbiornika wyrównawczego nie ma to na odpływie musi być zachowany przepływ aby koryto rzeki poniżej elektrowni nie wyschło. Wówczas elektrownia w czasie poza szczytem może pracować podszczytowo, z mniejszą mocą zapewniającą przepływ wody gospodarczy (minimalny dla utrzymania minimalnego stanu wody w korycie rzeki dla innych celów niż produkcja energii elektrycznej) oraz możliwość napełnienia zbiornika górnego.

Korzystnym rozwiązaniem w aspekcie efektywnego wykorzystania potencjału rzeki jest budowa kaskady elektrowni wodnych. Elektrownie wodne przepływowe znajdujące się w kaskadzie to szereg elektrowni jazowych położonych na rzece w takich odległościach, że cofka elektrowni położonej niżej stanowi dolną wodę elektrowni leżącej wyżej. Elektrownie najwyższa i najniższa powinny mieć zbiorniki o regulacji dobowej. Elektrownie pośrednie (przewałowe) nie muszą mieć wcale zbiorników, wówczas będą pracowały jako elektrownie przepływowe (rys. 4).



Rys. 4. Elektrownie wodne na rzece Radunia, przykład kaskady luźnej.

Jeżeli na całej długości kaskady rzeka nie przyjmuje żadnych dopływów i przełyki zainstalowane są wszystkie takie same to wszystkie elektrownie przewałowe będą uzależnione od elektrowni ze zbiornikiem regulującym. Elektrownia regulująca może pracować jako elektrownia o zmiennej regulacji dobowej, a pozostałe są wówczas zależne od elektrowni pierwszej.

Dla kaskady zwartej wody zbiorników poszczególnych elektrowni sięgają elektrowni poprzedniej, jest zachowana ciągłość wody, taka kaskada może pracować jako szczytowa (tzw.

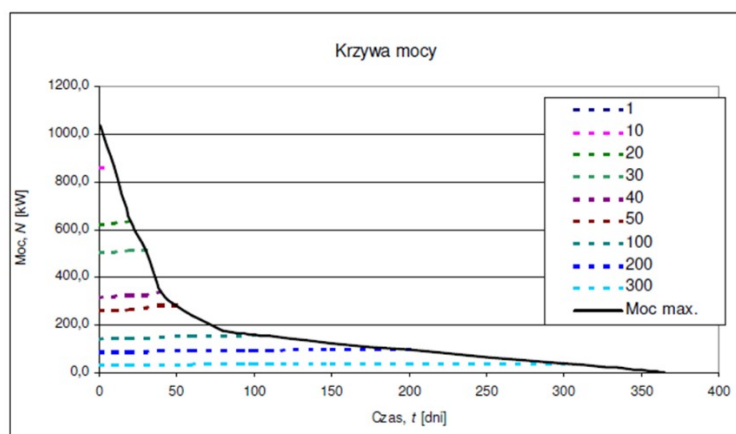
praca przewalowa). Dla elektrowni luźnej zatrzymanie elektrowni spowoduje wysuszenie koryta rzeki, czyli kaskady luźne pracują jako przepływowe.

3. Potencjał energetyczny wód powierzchniowych w Polsce

Potencjał energetyczny wód powierzchniowych w Polsce jest niewielki w stosunku do zapotrzebowania energetycznego kraju. Efektywne wykorzystanie energetyczne potencjału wód pozwoliłoby na zaspokojenie potrzeb energetycznych w ilości mniejszej niż 10%. Nie to jest jednak najważniejsze, a zaliczenie elektrowni wodnych do źródeł regulacyjnych wspomagających źródła OZE z generacją wymuszoną. Jednocześnie spiętrzające obiekty wodne usytuowane na małych rzekach poprawiają małą retencję magazynując zasoby wodne i zabezpieczając przed dużymi okresowymi wahaniami przepływów. Łącząc te fakty z koniecznością zachowania równowagi środowiskowej spełniając wymagania formalne przy budowie i eksploatacji elektrowni wodnej, może okazać się, że całościowy bilans zysków i strat jest niekorzystny.

3.1. Krajowy potencjał energetyczny

Spad i przepływ to podstawowe parametry określające potencjał energetyczny rzeki w przekroju elektrowni. Prognozowanie zmian tych parametrów bazuje na danych statystycznych z wieloletnich pomiarów i obserwacji ponieważ dla prognoz długookresowych nie są dokładnie poznane prawa rządzące zmiennością parametrów hydrologicznych. Mając takie dane możliwe jest oszacowanie, a nawet bardzo dokładne obliczenie wielkości elektrowni (przełyku i mocy elektrowni). Na rys. 5 pokazano przykładowy (i uniwersalny) wykres krzywej mocy. Dla każdego założonego przełyku elektrowni i stałego spadku można otrzymać jedną gałąź krzywej mocy. Pole zawarte pod odpowiednimi krzywymi mocy stanowią wartość produkcji energii elektrycznej uzyskanej w ciągu roku reprezentatywnego.



Rys. 5. Przykładowy wykres krzywej mocy z naniesionymi gałęziami mocy zmiennego przełyku elektrowni (opracowanie własne na podstawie [7])



Pokazana na rys. 5 charakterystyka dotyczy określonej rzeki w określonej lokalizacji. Znając równanie na moc zasobów wodnych (2) i znając parametry rzek w Polsce, można oszacować potencjał energetyczny całłościowy. Pierwsze prace nad opracowanie katastru wodnego w odniesieniu do potencjału energetycznego rozpoczęto jeszcze przed II Wojną Światową. Natomiast najbardziej rozbudowany dokument powstał w 1956 r. i został uzupełniany do 1961 r. przez prof. A. Hoffmana. Potencjał został oszacowany dla dwóch głównych rzek w kraju, czyli Wisły i Odry wraz z dorzeczami oraz rzekami pomorza. Potencjał energetyczny został podzielony na trzy wartości: teoretyczny, techniczny i ekonomiczny. Dane z katastru podają potencjał energetyczny dla przepływów średnich wieloletnich. Inne wartości obejmują przepływy trwające 95% roku i 50% roku. Potencjał energetyczne wynosi:

- teoretyczny: ok. 23 TWh;
- techniczny: ok. 12 TWh;
- ekonomiczny: ok. 5 TWh. Potencjał ekonomiczny będzie się zmieniał ze względu na zmiany kosztów wytwarzania energii elektrycznej w innych źródłach. Przy czym wzrost kosztów wytwarzania w źródłach konwencjonalnych niekoniecznie musi wpłynąć na opłacalność budowy elektrowni wodnych. Jest tak, ponieważ świadomość wykorzystywania środowiska naturalnego i modele je opisujące wpływają na ciągły wzrost kosztów za korzystanie ze środowiska (jego degradację);
- moc przepływu średniego wieloletniego ok. 2700 MW;
- techniczna moc elektrowni wodnych: ok. 4000 MW, przy założeniu rocznego czasu wykorzystania mocy zainstalowanej 3300 godz.

Jak widać, potencjał energetyczny polskich rzek jest stosunkowo mały. Przy czym potencjał zlewni Wisły wynosi ok. 70% całego potencjału krajowego, a zlewni Odry ok. 20%. Dla małych rzek dotychczas nie były prowadzone prace kompleksowe nad oceną ich potencjału energetycznego. Jak podają różne źródła, potencjał ten można szacować na 1 do nawet 5 TWh (5 TWh to potencjał techniczny, ekonomiczny nie przekroczy 2,5 TWh), przy czym dla mikro elektrowni wodnych (z mocą nie przekraczającą 100 kW) potencjał ten wynosi ok. 0,5 TWh. [6] Szacuje się również, że do dyspozycji jest ok. 6 tys. lokalizacji, w których mikro i małe elektrownie mogłyby powstać. Przyjmując roczny czas wykorzystania mocy zainstalowanej na poziomie 3300 godz. przeciętna moc takiej elektrowni wynosi 100 kW. [9] Duża rozbieżność w danych dotyczących potencjału energetycznego mikro i małych elektrowni wodnych świadczy o niedostatecznym rozpoznaniu tego obszaru. Bazuje najprawdopodobniej na liczbie lokalizacji, w których istnieje jeszcze infrastruktura techniczna (szczególnie budynki i pozostałości po obiektach spiętrzających).

Stosunkowo niewielki potencjał nie oznacza całkowitego braku racjonalności rozwoju mikro i małej energetyki wodnej. Są dwa aspekty, które wskazują, że budowa mikro i małych elektrowni wodnych jest zasadna:

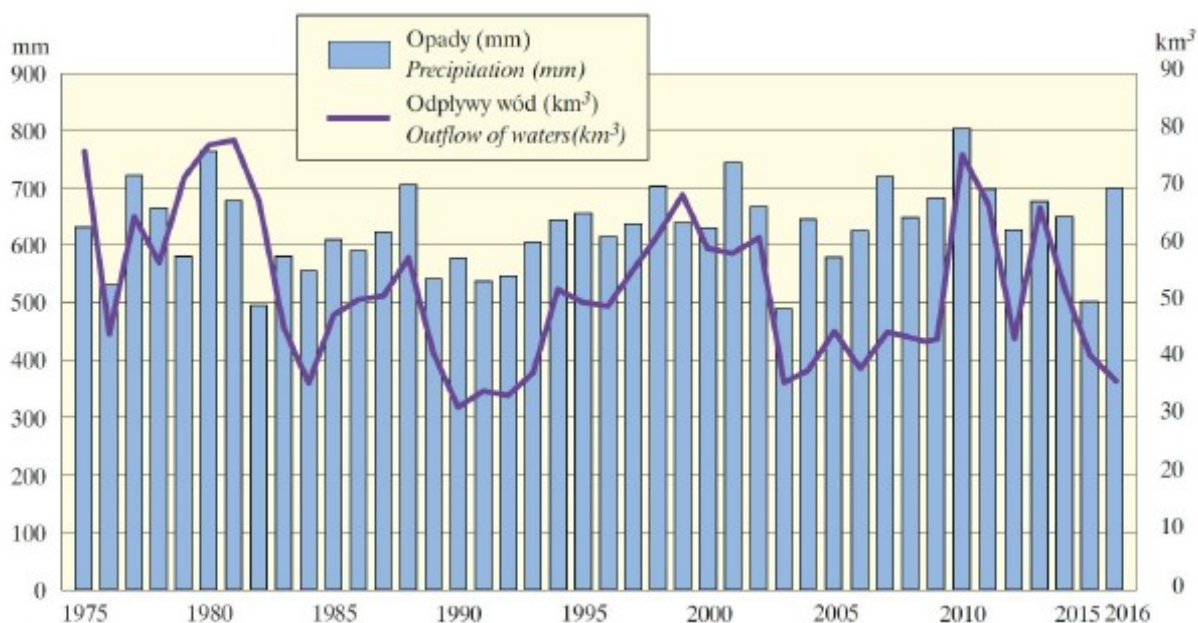
- budowa źródeł regulacyjno-bilansujących dla innych źródeł OZE z generacją wymuszoną (źródła fotowoltaiczne i wiatrowe),



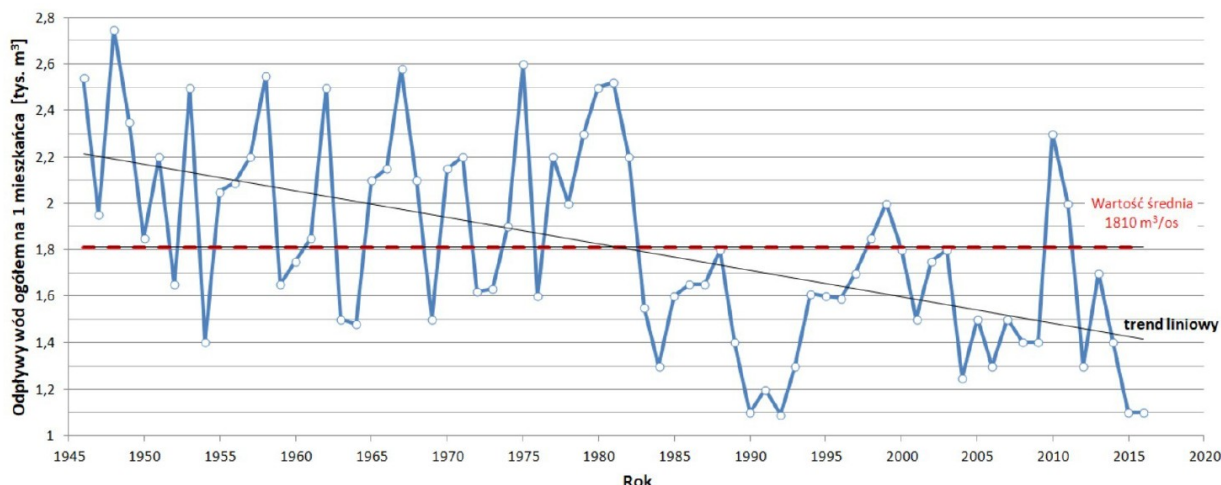
- poprawa małej retencji, czyli budowa obiektów hydrotechnicznych wyposażonych w zespoły hydroenergetyczne.

Szczególnie drugi aspekt jest istotny w kontekście gospodarowania zasobami wodnymi. Koszt budowy spiętrzenia w korycie rzeki jest nawet 5-krotnie większy niż budowa infrastruktury energetycznej dla elektrowni wodnej w tej samej lokalizacji, to wydaje się rozsądnym wykorzystanie faktu budowy takich obiektów wyposażonych w elektrownię wodną. Stan taki należy rozpatrywać nie tylko w aspekcie technicznym, ale szczególnie środowiskowym i ekonomicznym, ponieważ budowa elektrowni wodnej, niezależnie czy jest to wykorzystanie istniejącej i nieczynnej infrastruktury budowlanej, czy budowa nowego obiektu, koszty są ponoszone przez inwestora w elektrownię, a korzyści wynikające z funkcjonowania takiej infrastruktury czerpie również zarządca wód śródlądowych.

Zasoby wodne w Polsce *per capita* wykazują niepokojący trend zmniejszający (rys. 7), przy czym średnie opady i odpływy roczne wahają się w podobnych granicach z niewielkim trendem malejącym (rys. 6). Jednakże w kontekście wykorzystania wód powierzchniowych do celów energetycznych ważny jest stabilny przepływ wody. Pomimo utrzymywania się dostępu do wody w skali globalnej (w skali kraju) to zmianie uległa amplituda krótkookresowa (sezonowa, a nawet dobowa) przepływów w rzekach. Jest to spowodowane gwałtownością występowania opadów skoncentrowanych na niewielkich obszarach. Dodatkowo należy zaznaczyć, że system melioracyjny jest niedostatecznie drożny, a to już skutkuje wezbraniemi wody i trudnościami z jej odbiorem, co dalej wpływa na duże zmiany w przepływie wody.



Rys. 6. Opad i odpływ w Polsce (źródło: J. Suchożebrski [8], wg danych GUS)



Rys. 7. Zasoby wodne *per capita* w Polsce jako średni odpływ roczny (źródło: J. Suchożebrski [8], wg danych GUS)

3.2. Wykorzystanie dostępnych danych do oceny potencjału energetycznego rzek

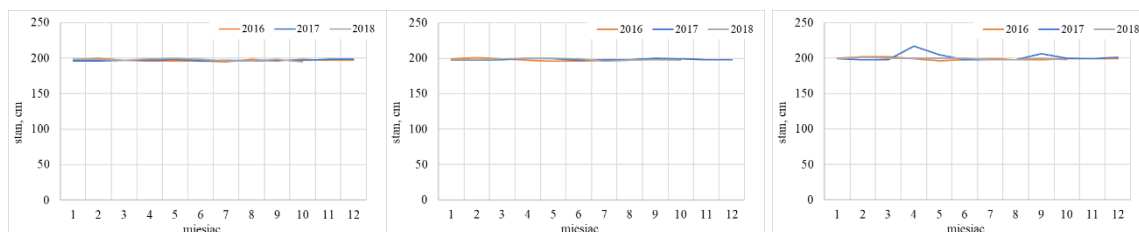
Potencjał wykorzystania energii wodnej uzależniony jest od przepływu dla elektrowni pracujących z maksymalną chwilową wydajnością zależną od strumienia wody. Może się wydawać, że w trybie regulacyjnym ograniczanie produkcji energii wpłynie niekorzystnie na opłacalność inwestycji, albo inaczej, na koszt generowanej energii ze względu na niższy stopień wykorzystania mocy zainstalowanej spowodowany dużymi wahaniami przepływu i spadów w okolicach elektrowni. Jednakże wyposażenie elektrowni w obiekt spiętrzający pozwala, szczególnie dla rzecznych elektrowni przepływowych, zmniejszać amplitudy przepływu i wykorzystywać spiętrzenie jako bufor energii. Zatem aby ocenić potencjał energetyczny wód powierzchniowych, szczególnie w przypadku mikro i małych elektrowni wodnych należy oceniać każdą lokalizację oddzielnie.

W Polsce dostępne są dane z pomiarów i obserwacji realizowanych przez Instytut Meteorologii i Gospodarki Wodnej, które są udostępniane w formie przetworzonej przez różne instytucje, m.in. przez portal internetowy www.metamodel.pl oraz Krajowy Instytut Meteorologii. Na podstawie danych hydrologicznych opracowano wykresy przedstawiające stany i przepływy wody w wybranych rzekach w celu oszacowania zmian potencjału energetycznego, czyli wpływu parametrów hydrologicznych rzeki na dyspozycyjność mocy elektrowni przepływowej. Ze względu na brak danych szczegółowych dotyczących lokalizacji i braku możliwości oceny wysokości spadów, moc oszacowano w wartościach względnych.

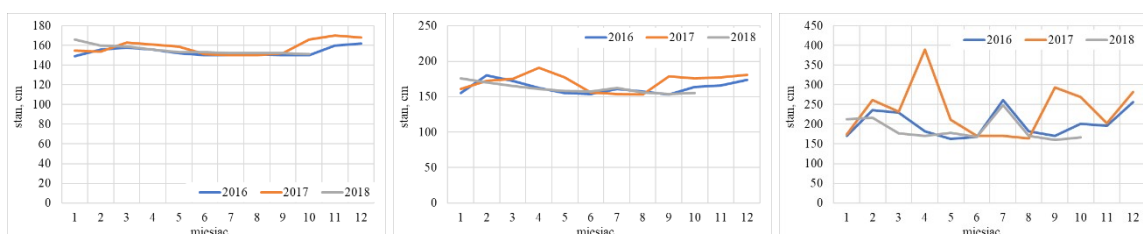
Na podstawie uśrednionych danych pomiarów miesięcznych można oszacować sezonowe zmiany przepływu wody w określonych przekrojach rzeki, w których zainstalowano urządzenia pomiarowe. Na tej podstawie można ocenić różnice charakterystyk rzek płynących w nieodległych od siebie rejonach. Porównanie przeprowadzono dla dwóch rzek płynących w woj. śląskim: Biała Przemsza i Czarna Przemsza. Na obu rzekach znajdują się mikro elektrownie wodne o mocy ok. 40 kW. Na Białej Przemszy elektrownia usytuowana jest



w miejscowości Okradzionów (w kolejnym rozdziale przedstawiona zostanie dokładna charakterystyka tej elektrowni), a na rzece Czarna Przemsza w miejscowości Siewierz znajdują się dwie mikro elektrownie wodne. Na rys. 8 i 9 zestawiono wykresy stanów wody dla rzek Biała Przemsza i Czarna Przemsza, odpowiednio. Zestawienia te obejmują stany miesięczne minimalne, średnie i maksymalne w latach 2016-18.

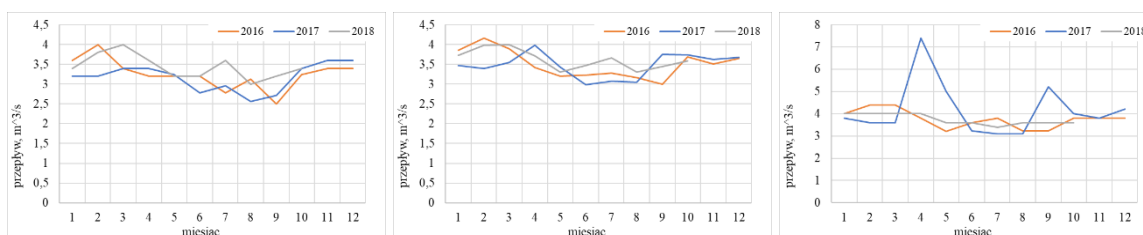


Rys. 8. Miesięczne stany wody rzeki Biała Przemsza w miejscowości Sławków. Od lewej: stany minimalne, stany średnie, stany maksymalne.

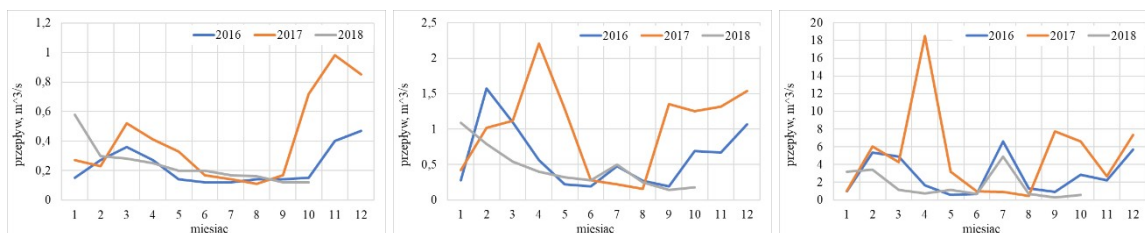


Rys. 9. Miesięczne stany wody rzeki Czarna Przemsza w Siewierzu. Od lewej: stany minimalne, stany średnie, stany maksymalne.

Choć obydwie rzeki mają podobną charakterystykę, obie płyną przez Wyżynę Krakowsko-Częstochowską, długości rzek są bardzo podobne i wynoszą ok. 63 km, a ich zlewnie sąsiadują ze sobą (częściowo się pokrywają) to jednak wykresy stanów obu rzek pokazują, że rzeka Biała Przemsza nie wykazuje sezonowych zmian stanów, nawet dla zarejestrowanych najwyższych stanów. Rzeka Czarna Przemsza wykazuje duże amplitudy zmian stanów wody, a wartości maksymalne zmieniają się nawet dwukrotnie.

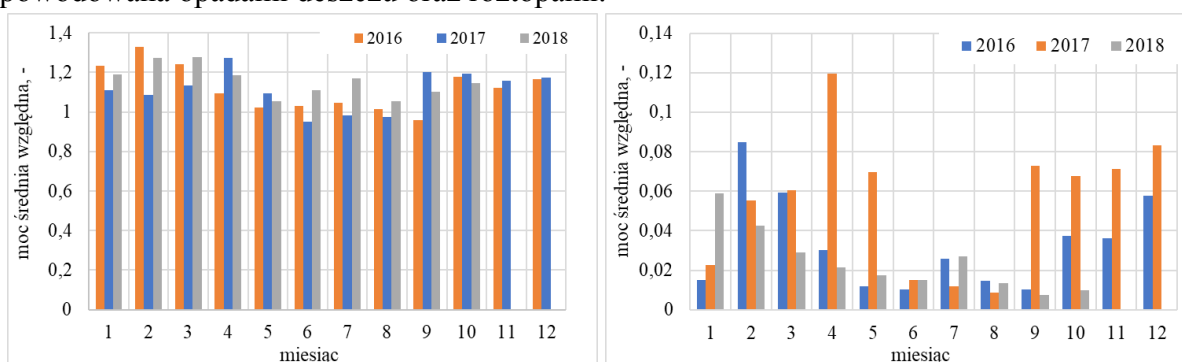


Rys. 10. Miesięczne przepływy rzeki Biała Przemsza w miejscowości Sławków. Od lewej: przepływy minimalne, przepływy średnie, przepływy maksymalne.



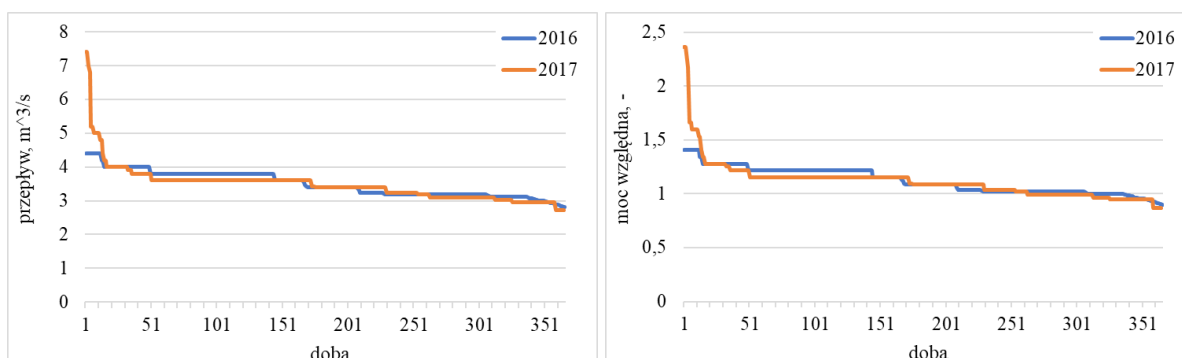
Rys. 11. Miesięczne przepływy rzeki Czarna Przemsza w Siewierzu. Od lewej: przepływy minimalne, przepływy średnie, przepływy maksymalne.

Również w przypadku wykresów przepływów miesięcznych Biała Przemsza wykazuje znacznie mniejsze amplitudy zmian, co jest szczególnie widoczne na wykresach wartości miesięcznych maksymalnych (rys. 10 i 11). Wartości maksymalne przepływów na Czarnej Przemszy są większe od średnich nawet 10-krotnie, a w przypadku Białej Przemszy ok. 2-krotnie, szczególnie widoczne dla kwietnia 2017 r. Prawdopodobnie zmiana ta była spowodowana opadami deszczu oraz roztopami.



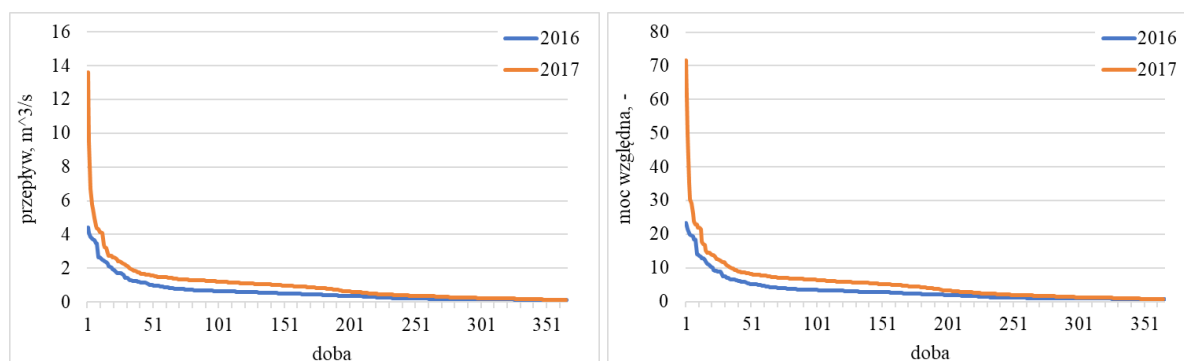
Rys. 12. Miesięczne średnie wartości mocy w odniesieniu do gwarantowanego przez 90% dni w roku przepływu i tej samej wartości wysokości spadu.

Mając dane średnich i maksymalnych przepływów oszacowano zmiany mocy średniej miesięcznej w stosunku do spodziewanej wartości przy przepływie gwarantowanym dla 90% dni w roku (rys. 12). Dla Białej Przemszy przepływ gwarantowany przez 90% dni w roku wynosi $3,13 \text{ m}^3/\text{s}$, a dla Czarnej Przemszy $0,19 \text{ m}^3/\text{s}$. Obliczenia wykonano przyjmując tę samą wartość wysokości spadu. Tak jak na poprzednich wykresach znaczne różnice mocy wykazuje rzeka Czarna Przemsza.





Rys. 13. Wykres uporządkowany dobowych przepływów (po lewej) oraz mocy względnej (po prawej) dla rzeki Białej Przemszy w miejscowości Sławków.



Rys. 14. Wykres uporządkowany dobowych przepływów (po lewej) oraz mocy względnej (po prawej) dla rzeki Czarnej Przemszy w miejscowości Siewierz.

Na rys. 13 i 14 zestawiono wykresy uporządkowane przepływu i mocy względnej (w odniesieniu do przepływu gwarantowanego przez 90% roku) dla rzek Biała Przemsza i Czarna Przemsza, odpowiednio. Wykresy uporządkowane pokazują obraz i charakterystykę rzeki. Na podstawie takich wykresów można dobrać moc elektrowni w określonej lokalizacji, dla przyjętych parametrów spadu i przepływu znamionowego, a pole pod wykresem mocy będzie wskazywać roczną generację energii elektrycznej. Czym większa amplituda zmian przepływu (i w konsekwencji mocy) tym trudniej maksymalizować uzysk energetyczny ze względu na konieczność przewymiarowania elektrowni przepływowej, która nie będzie pracować w optymalnym punkcie pracy turbiny. Dopasowanie mocy turbiny do przepływów gwarantowanych w długich okresach roku (np. przepływu gwarantowanego przez 90% dni w roku) skutkować będzie koniecznością upuszczania jałowego części wody, która będzie większa niż przelęg elektrowni. Drugą możliwością jest podniesienie stanu wody przez spiętrzenie i uzyskanie zbiornika buforowego. Wówczas wykres przepływów zostanie wypłaszczony, czyli najmniejsze przepływy zwiększą się, a największe – zmniejszą. Jest to rozwiązanie najlepsze w przypadku krótkotrwałych okresów wezbrań, tak jak ma to miejsce na rzece Czarna Przemsza.

4. Elektrownie wodne w Polsce

Energetyka wodna w Polsce rozpoczęła swój rozwój niewiele później od światowego, czyli w okresie elektryfikacji. Należy nadmienić, że energia elektryczna była wówczas dostarczana przez sieci lokalne nie tworząc jednolitego systemu elektroenergetycznego, a systemy wyspowe były skoncentrowane wokół ośrodków przemysłowych i rolnych. Ówczesna energetyka wodna to głównie rozbudowa istniejących siłowni przemysłowych. Wykorzystanie istniejącego koła wodnego do napędu prądnicy, które napędzało bezpośrednio maszyn (np.



tartaczne) nie nastroczało trudności. Stąd przed upowszechnieniem maszyny parowej energia elektryczna była wytwarzana w elektrowniach wodnych usytuowanych na małych i średnich rzekach. [10] Sytuacja polityczna oraz okres I Wojny Światowej nie sprzyjał inwestycjom w zakresie energetyki wodnej. Przy czym należy nadmienić, że tuż przed I Wojną Światową funkcjonowało na terenach Polski (wg linii granicznej z 1919 r.) ok. 9 tys. siłowni wodnych o mocy mechanicznej całkowitej ok. 90 MW. Rozpoczęta w 1924 r. wielka inwentaryzacja siłowni wodnych wykazała, że w Polsce jest ich ok. 6,5 tys., a osiągnięta moc to prawie 170 MW. W tym było 253 elektrownie wodne o mocy sumarycznej ok. 21 MW (w 1930 r. moc wszystkich elektrowni wynosiła ok. 1,5 GW).

Przed I Wojną Światową oraz po wojnie trwały prace projektowe elektrowni wodnych uwzględniające wykorzystanie budowli wodnych i zbiorników jako elementów zabezpieczających przed powodzią i poprawiających retencję. Pod uwagę starano się brać całą problematykę gospodarki wodnej, łącznie z żegluga śródlądową i rekreacją. W zakresie projektowania elektrowni oraz oceny sił wodnych (i tworzenia pierwszych katastrof wodnych) udział brali: G. Narutowicz, prof. A. Hoffmann, prof. K. Pomianowski, O. Nadolski. Początkiem XX w. powstały projekty siedmiu zbiornikowych i derywacyjnych elektrowni wodnych na terenach Galicji. W większości przypadków elektrownie wodne powstawały przy zaporach i zbiornikach retencyjnych pełniących rolę przeciwpowodziowych. Przykładem jest projekt elektrowni w Jazowsku na Dunajcu o mocy nominalnej 11,3 MW i minimalnej 5,9 MW. Koszt budowy samej elektrowni był szacowany na ok. 9 mln. koron austro-węgierskich (odnosząc ówczesną siłę nabywczą korony do dzisiejszego PLN, koszt budowy tej elektrowni wyniósłby ok. 400 mln PLN). [13] Przyjmując roczny czas wykorzystania mocy zainstalowanej na poziomie 3300 godz. to koszt jednostkowy za energię wyniósłby ok. 400 – 500 PLN/MWh. Jest to oczywiście grube szacowanie, ale wskazujące, że koszt jednostkowy nie odbiegałby od dzisiejszych standardów. Obecnie koszt budowy mikro elektrowni wodnej wynosi ok. 5 tys. PLN/kW mając do dyspozycji infrastrukturę budowlaną, np. nieczynny młyn.

W Polsce funkcjonuje obecnie prawie 800 elektrowni wodnych, a moc zainstalowana to ok. 1000 MW. Tylko 10 z nich to elektrownie o mocy większej niż 10 MW. Przy czym małe i mikro elektrownie (o mocy poniżej 5 MW) stanowią moc ok. 300 MW i roczną generację ok. 900 GWh. Jest to ok. 20% potencjału technicznego dla mikro i małych elektrowni wodnych. Wszystkie elektrownie wodne przepływowe generują rocznie ok. 2 000 GWh.

Elektrownie wodne systemowe, w szczególności szczytowo-pompowe i zbiornikowe biorą udział w usłudze pracy interwencyjnej jako źródła szczytowe. Mikro i małe elektrownie traktowane są jako źródła podstawowe, niemniej jednak mogłyby z powodzeniem również pracować w reżimie regulacyjnym.

Poniżej przedstawiono parametry wybranych elektrowni przepływowych w Polsce, będących w użytkowaniu przez grupy energetyczne jak i przez niezależnych inwestorów:

1. Elektrownia we Włocławku. Rok budowy (uruchomienia): 1969. Moc generatorów: 6 x 26,7 MW, moc instalowana elektrowni: 160,2 MW, roczna produkcja energii: ok. 740 GWh. Spad: 8 m (zapora). Zarządca (właściciel): Energa Wytwarzanie S.A. [14]



Elektrownia wodna we Włocławku, największa elektrownia przepływowa w Polsce, była planowana jako pierwsza w kaskadzie elektrowni budowanych na Wiśle, których nie zbudowano. Brak dodatkowych stopni jest podstawową przyczyną problemów technicznych funkcjonowania tej elektrowni. Mianowicie, jest to przede wszystkim erozja koryta rzeki, podmywając bezpośrednio zapórę przy elektrowni. Dyskusyjny jest również efekt ekologiczny elektrowni. Chodzi głównie o emisję metanu przez zgromadzone przez lata i fermentujące osady organiczne na dnie zbiornika. Wymienione wyżej niekorzystne efekty funkcjonowania dużej elektrowni przepływowej ze zbiornikiem są jej nierozłączną cechą, tak jak to, że elektrownia wodna stanowi zapórę dla organizmów żywych oraz żeglugi. Natomiast dodatkowo niekorzystny efekt ekologiczny może wystąpić w przypadku niepoprawnie wykonanych przepławek dla ryb, tak jak to ma miejsce w elektrowni Włocławek. Niemniej jednak zbiorniki wodne przy elektrowniach przepływowych mogą być korzystne dla obszarów o niskich rocznych opadach atmosferycznych.

2. Elektrownia wodna Rożnów, rzeka Dunajec/jezioro Rożnowskie. Rok budowy (uruchomienia): 1923. Moc generatorów: 4 x 12,5 MW, napędzane turbinami Kaplana; moc instalowana: 50 MW; spad: 29 m (zapora). Zarządca (właściciel): Tauron Ekoenergia. [15] W skład elektrowni Rożnów wchodzi również elektrownie przepływowe: Czchów (8,4 MW), Dąbie (4,3 MW), Przewóz (4,3 MW), Olcza (360 kW), Kuźnice (280 kW).

3. Elektrownia wodna Gródek, rzeka Wda. Rok budowy (uruchomienia): 1923. Moc generatorów: 2 x 1,72 MVA, 1x1,85 MVA; napędzane turbinami Francisa. Spad: 18 m (zapora i kanał derywacyjny). [10] [16]

4. Elektrownia wodna Żur, rzeka Wda. Rok budowy (uruchomienia): 1929. Moc generatorów: 2 x 4,4 MVA; napędzane turbinami Kaplana. Spad: 15 m (zapora i kanał derywacyjny). [16]

5. Przykład mikro elektrowni wodnej

Wykorzystanie rzek w Polsce w kontekście budowy elektrowni wodnych wiąże się z dużymi nakładami finansowymi na obiekty i budowle wodne. Przy czym należy zaznaczyć, że koszt samej elektrowni (turbina wraz z generatorem, kanał doprowadzający wodę i infrastruktura techniczna przyłącza) to ok. 20% całej inwestycji. Wynika z tego, że najlepiej wykorzystać istniejące budowle wodne (budowle spiętrzające wodę, nieczynne młyny) aby koszty inwestycji ograniczyć do niezbędnego minimum. Ważne jest też to, że istniejące miejsca spiętrzania wody zostały wybrane ze względu na walory hydrologiczne takiego miejsca. Oczywiście nie oznacza to, że nie ma innych korzystnych miejsc do budowy elektrowni wodnych. Wręcz przeciwnie, zmieniająca się gospodarka wodna, ale przede wszystkim rolnictwo oraz inny przemysł lokujący się poza obszarami miejskimi stwarza potencjał lokalnego wykorzystania energii elektrycznej oraz poprawy małe retencji.

Analizowany przykład dotyczy małej (mikro) elektrowni wodnej zlokalizowanej na rzece Biała Przemsza w miejscowości Okradzionów (Dąbrowa Górnicza). Zaadoptowano istniejący młyn, który był napędzany przy pomocy dwóch turbin Francisa wykorzystujących istniejące spięzrenie na rzece Biała Przemsza. W istniejącej komorze turbinowej zdemontowano turbiny



Francisa, w miejsce których zamontowano 3 turbogeneratory śmigłowe (turbiny Kaplana) o mocy zainstalowanej 15 kW każda. Zastosowano generatory asynchroniczne dedykowane do małych mocy znamionowych, który jest tańszy, prostszy w obsłudze i w budowie od generatora synchronicznego, ale wymaga baterii kondensatorów do kompensacji mocy biernej. Na rys. 16 pokazano zespół turbinowy oraz budynek turbinowni, a na rys. 17 stały stopień spiętrzający wraz z przepławką dla migracji organizmów żywych. Stopień i przepławka zostały wybudowane w celu przystosowania istniejących urządzeń piętrzących do obecnych wymagań środowiskowych

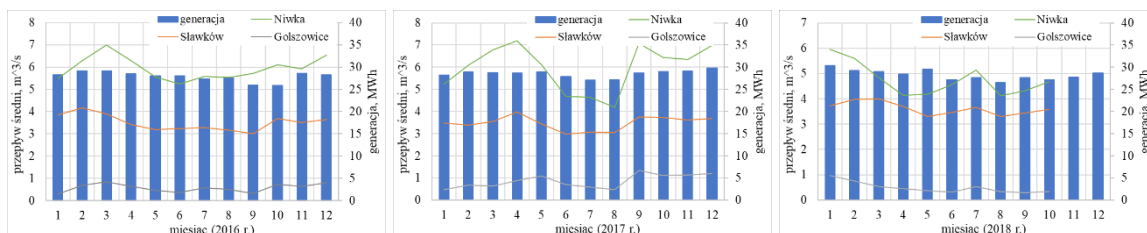


Rys. 16. Zespół turbinowy MEW w Okradzionowie (fot. po lewej) i budynek turbinowni (fot. po prawej). (autor fot.: P. Skwara)

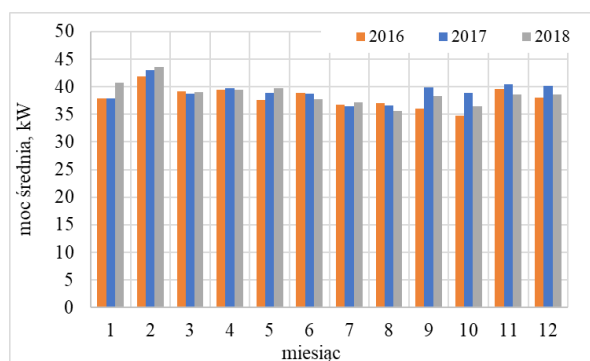


Rys. 17. Stały stopień spiętrzający oraz przepławka. (autor fot.: P. Skwara)

W rozdz. 3 pokazano analizę parametrów hydrologicznych dla rzeki Białej Przemszy. Mając dane rzeczywistej generacji zestawiono je z przepływami zarejestrowanymi w trzech przekrojach tej rzeki: Golszowice (górny bieg rzeki), Sławków (Środkowy bieg rzeki, tuż poniżej elektrowni wodnej), Niwka (końcowy bieg rzeki, tuż przed ujściem do rzeki Przemsza). Na rys. 19 pokazano zestawienia średnich przepływów miesięcznych w trzech punktach oraz rzeczywistą miesięczną generację.



Rys. 18. Zestawienie przepływów oraz generacji miesięcznej w elektrowni wodnej w Okradzionowie (rz. Biała Przemsza), od lewej dla lat: 2016, 2017, 2018.



Rys. 19. Zestawienie średniej miesięcznej mocy generowanej przez elektrownię wodną w Okradzionowie (rz. Biała Przemsza)

Porównując do wykresów z rys. 12 (oszacowana względna miesięczna moc średnia) wartości generacji z rys. 18 i 19 są podobne. Stąd wniosek, że jeśli elektrownia wodna będzie wykorzystywać pełny potencjał przepływu to metoda szacowania jest wystarczająca. Na rys. 18 zestawiono średnie miesięczne moce generowane przez elektrownię. Dane o przepływach dla 2018 r. są przygotowane do października, ponieważ dane hydrologiczne obejmują rok hydrologiczny, który rozpoczyna się w listopadzie poprzedniego roku kalendarzowego i trwa do października bieżącego roku kalendarzowego.

Analizując cały proces budowy elektrowni wodnej wraz z modernizacją istniejących obiektów budowlanych na koszt sumaryczny składają się:

- turbozespoły wraz z automatyką: 180 tys. PLN,
- układ pomiarowo rozliczeniowy: 15 tys. PLN,
- remont jazu: 5 tys. PLN,
- budowa stopnia stałego i przepławki: 20 tys. PLN,
- prace montażowe: 10 tys. PLN,
- prace elektroinstalacyjne: 10 tys. PLN,

Razem około 240 tys. PLN, czyli ok. 5 tys. PLN/kW mocy zainstalowanej.

Projekt mikro elektrowni wodnej to duże wyzwanie techniczne jak i finansowe. Dokumentacja przedprojektowa składa się z wyników i opracowań z badań i analiz:

- pomiary geodezyjne – przekroje poprzeczne i wzdłużne koryta rzeki;
- sondowanie dna rzeki – echosonda;
- określenie przepływów charakterystycznych – operat hydrologiczny;



- badania geologiczne – odwierty i ich analiza;
- analiza wpływu budowy MEW na infrastrukturę i środowisko;
- inwentaryzacja przyrodnicza;
- raport oddziaływania inwestycji na środowisko naturalne;
- zwolnienie z zakazu budowy na terenach objętych zagrożeniem powodziowym (opcjonalnie).

Natomiast dokumentacja projektowa w zakresie budowlanym zawiera m.in.:

- decyzja środowiskowa;
- warunki zabudowy i zagospodarowania terenu;
- operat wodnoprawny;
- pozwolenie wodnoprawne na budowę urządzenia hydrotechnicznego;
- projekt budowlany;
- pozwolenie na budowę;
- projekt wykonawczy;
- pozwolenie wodnoprawne na piętrzenie wód;
- odbiór techniczny inwestycji;

a zakresie zakładu energetycznego:

- warunki przyłączenia do sieci OSD;
- przydział mocy – wielkość uzależniona od mocy elektrowni;
- projekt budowlano-wykonawczy instalacji przesyłowej;
- umowa przyłączeniowa z OSD;
- umowa sprzedaży energii elektrycznej (sprzedawca zobowiązany);
- instrukcja szczegółowa współpracy ruchowej (OSD);
- odbiór techniczny instalacji.

Przedstawiona instalacja o mocy zainstalowanej 45 kW została uruchomiona 15 stycznia 2007 r. i od chwili uruchomienia wytwarza energię elektryczną w ilościach ok. 300 MWh rocznie. Od chwili powstania instalacja była wspierana jedynym istniejącym ówczesnie mechanizmem świadectw pochodzenia energii elektrycznej. Od 1 stycznia 2017 po wygraniu pierwszej przeprowadzonej przez Urząd Regulacji Energetyki aukcji na sprzedaż energii elektrycznej, elektrownia przeszła na aukcyjny system wsparcia. Całkowity czas wsparcia dla instalacji OZE wynosi 15 lat od dnia, w którym po raz pierwszy energia została wyprodukowana w związku z tymi systemami.

6. Podsumowanie

Niewielkie zasoby wodne w Polsce powinny skłaniać do jej najlepszego gospodarowania. Gospodarowanie wodą to nie tylko dbałość o kwestie ekologiczne ale również poprawa efektywności wykorzystania zasobów i niwelowanie strat niekontrolowanego odpływu przez jej gromadzenie. Zapobieganie zaostarzaniu się deficytów można realizować poprzez poprawę retencji, szczególnie małej retencji zapobiegającej obniżaniu poziomu wód gruntowych. Ze względu na nizinny charakter większości obszarów Polski budowa dużych zbiorników możliwa jest do realizacji jedynie w górnych biegach rzek na południu kraju. Ale dotyczy to



głównie dużych rzek. Jeśli chodzi o rzeki małe to budowa niewielkich spiętrzeń znacząco może poprawić sytuację nawodnienia regionów i jednocześnie pozwala na wykorzystanie energetyczne cieków wodnych. 100 lat temu taką rolę pełniły siłownie wodne np. młynów czy tartaków, teraz mogą to być mikro i małe elektrownie wodne. Przy czym zawsze konieczny jest bilans zysków i strat wywołanych takim działaniem.

Koncepcja budowy dużych elektrowni, przy niewielkim potencjale energetycznym polskich rzek, pozostaje nadal nierozstrzygnięta. Należy zadać sobie pytanie, czy duża elektrownia wodna, wpływająca niekorzystnie na koryto rzeki (blokada spławności, gromadzenie osadów, erozja dna) przyniesie efekty korzystne w kontekście zaspokojenia potrzeb energetycznych. Inaczej ma się sytuacja z przepływowymi elektrowniami mikro i małymi, których niewielki potencjał energetyczny nie jest tak bardzo istotny, a wartościami dodanymi w tym przypadku są: źródło regulacyjno-bilansujące oraz bufor wody dla małej retencji.

Historycznie siłownie wodne, a później ich dostosowanie do produkcji energii elektrycznej były pierwszymi, przed elektrowniami wiatrowymi i słonecznymi. Jednakże to inwestycje w źródła wiatrowe i słoneczne są postrzegane jako przyszłość energetyki. W połączeniu ze źródłami biogazowymi i mikrobiogazowniami utylizacyjnymi (których potencjał w Polsce oszacowano na 10 TWh [17]) oraz magazynami akumulatorowymi stają się solidnym fundamentem struktury wytwarzania energii elektrycznej. Dlatego energetyka wodna staje się niepotrzebna ze względu na inne i lepsze (oraz tańsze) rozwiązania. Niemniej jednak nie należy całkiem lekceważyć energetyki wodnej, która może pozostać w gestii pasjonatów (co jest szczególnie widoczne oglądając mikro elektrownie wodne).

Literatura:

- [1] J. Popczyk: Wyprzedzająca odpowiedź Konwersatorium IE na bieżącą sytuację w energetyce 2020, zawsze w perspektywie monizmu elektrycznego OZE 2050. Prezentacja, Konwersatorium grudzień 2019, www.ppte2050.pl, zakładka *Konwersatorium*
- [2] J. Popczyk: W dążeniu do mono rynku energii elektrycznej OZE i rynków energii użytecznej. 10-stronicowa podróż elektroenergetyka przez historię polskiej elektroenergetyki. Raport 1 Cyklu BPEP, luty 2018, www.ppte2050.pl, zakładka *Biblioteka PPTE*
- [3] M. Chudecki: Elektrownie wodne w Gródku i Żurze. Wydawnictwo „Unitex”, Bydgoszcz 2017
- [4] Z. Dziewoński: Rolnicze zbiorniki retencyjne. PWN, Warszawa 1973
- [5] A. Łaski: Elektrownie wodne, rozwiązania i dobór parametrów. WNT, Warszawa 1971
- [6] K. Jackowski: Elektrownie wodne, turbozespoły i wyposażenie. WNT, Warszawa 1971
- [7] S. Michałowski, J. Plutecki: Energetyka wodna. WNT, Warszawa 1975
- [8] Zarządzanie zasobami wodnymi w Polsce 2018. Ministerstwo Gospodarki Wodnej i Żeglugi Śródlądowej oraz Global Compact Network Poland, Warszawa 2018
- [9] M. Templin: Elektrownia rzeczna o małych nakładach. Czasopismo naukowo-techniczne Postępy Inżynierii Mechanicznej, nr 5(3)/2015
- [10] Historia elektryki polskiej, Tom II: Elektroenergetyka, WNT, Warszawa 1977
- [11] Historia elektryki polskiej, Tom II: Elektroenergetyka, WNT, Warszawa 1992



**Fundusze
Europejskie**
Wiedza Edukacja Rozwój

Unia Europejska
Europejski Fundusz Społeczny



[12] Ustawa z dnia 20 lipca 2017 r. - Prawo wodne, tekst ujednolicony, dostęp w dniu 19.09.2019 r.

[13] www.genealog.mrog.org

[14] www.energa-wytwarzanie.pl

[15] www.tauron-ekoenergia.pl

[16] www.csw.pl

[17] J. Popczyk, K. Bodzek, M. Fice, D. Wereszczyński: Prosumencki model mikrosystemu elektroenergetycznego z mikroelektrownią μ EB na rynku wschodzącym 1 energii elektrycznej. Raport 10 Cyklu BPEP, listopad 2018, www.ppte2050.pl, zakładka Biblioteka PPTE