



Europejski  
Instytut Miedzi  
Copper Alliance



---

# **Energia odnawialna**

## Modelowanie niezawodności elektrowni wodnych

Piotr Marchel  
Józef Paska

Politechnika Warszawska

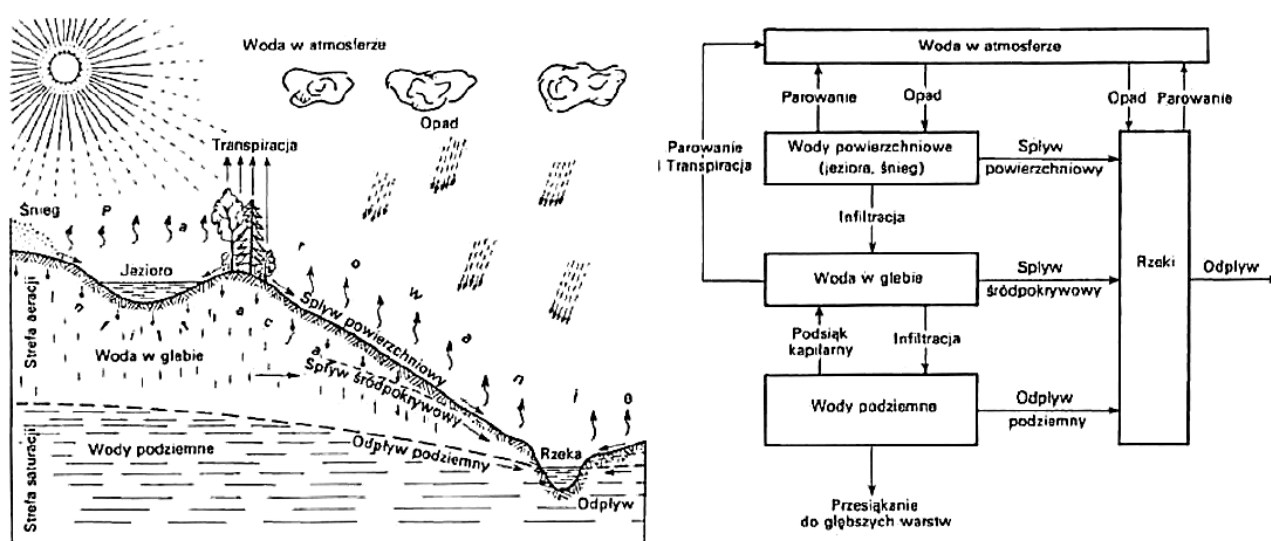
Nr ref EIM: EIM05132

# Wstęp

Z punktu widzenia niezawodności systemów elektroenergetycznych, w szczególności ich podsystemów wytwórczych, istotne jest, że produkcja energii elektrycznej w elektrowniach wykorzystujących energię wiatru, spadku wód czy Słońca jest ograniczona dostępnością energii pierwotnej. Niezawodność elektrowni wiatrowych, wodnych lub słonecznych zależy zatem nie tylko od ich struktury technologicznej i połączenia z siecią, do której dostarczają energię, ale również od warunków geoklimatycznych czy hydrologicznych. Moc generowana przez elektrownie wodne zależy od dostępności energii pierwotnej, która w tym przypadku uzależniona jest od dostępnej wielkości natężenia przepływu oraz wysokości spadku użytecznego. W pracy została podjęta próba opisanego charakteru i zmienności dostępnej energii wody. Opracowany został również prosty model dostępności energii pierwotnej dla wybranej lokalizacji w Polsce.

## Charakterystyka rzek w Polsce

Pochodzenie energii wód śródlądowych jest powiązane z cyklem krążenia wody w przyrodzie (rys. 1). Cykl ten jest zasilany energią promieniowania słonecznego.



Rys. 1. Schemat obiegu wody w obrębie zlewni [2, 9].

Rzeki w Polsce są zasilane wodą: bezpośrednio z opadów atmosferycznych, z topniejącego śniegu lub też z dopływu podziemnego. W zależności od dominującego typu zasilania można wyróżnić następujące reżimy odpływów rzecznych (rys. 2) [2, 9]: niwalny (śnieżny) słabo, średnio lub silnie wykształcony, niwalno-pluwialny (śnieżno-deszczowy) i pluwialno-niwalny (deszczowo-śnieżny). W dominującej części kraju, poza terenami górskimi i podgóorskimi, przeważa reżim niwalny, co oznacza że największe przepływy są związane z topnieniem śniegu i występują w marcu i kwietniu. W przypadku reżimu niwalno-pluwialnego lub też pluwialno-niwalnego pojawia się drugi szczyt przepływu przypadający na miesiące letnie, o najwyższych opadach - od maja do sierpnia (rys. 3). Rzeki w kraju różnią się między sobą również dobową zmiennością przepływu. Największą zmiennością charakteryzują się rzeki górskie. Są one zasilane głównie powierzchniowo. W przypadku nizin dobową zmienność jest mniejsza, a większą rolę w zasilaniu odgrywają zgromadzone wody podziemne. Cechy te przekładają się na charakter przepływów. Rzeki górskie mogą gwałtownie wezbrać, ale wzrost przepływu jest krótkotrwały. Taka sytuacja ma miejsce najczęściej latem, po intensywnych opadach. Woda szybko spływa (powierzchniowo) po stromych zboczach zbudowanych na słabo przepuszczającym gruncie. Na nizinach przepływ jest bardziej wyrównany. Wiąże się to z mniejszym spadkiem oraz gromadzeniem wody (retencją) przez podłoże. Gwałtowniejsze wezbrania mogą mieć miejsce na wiosnę, gdy po dużych opadach śniegu i jego zaleganiu na rozległym obszarze przychodzi odwilż.



Rys. 2. Reżim odpływu rzecznego (opr. I. Dynowska) [2, 9]:

I. Typy reżimów rzecznych:

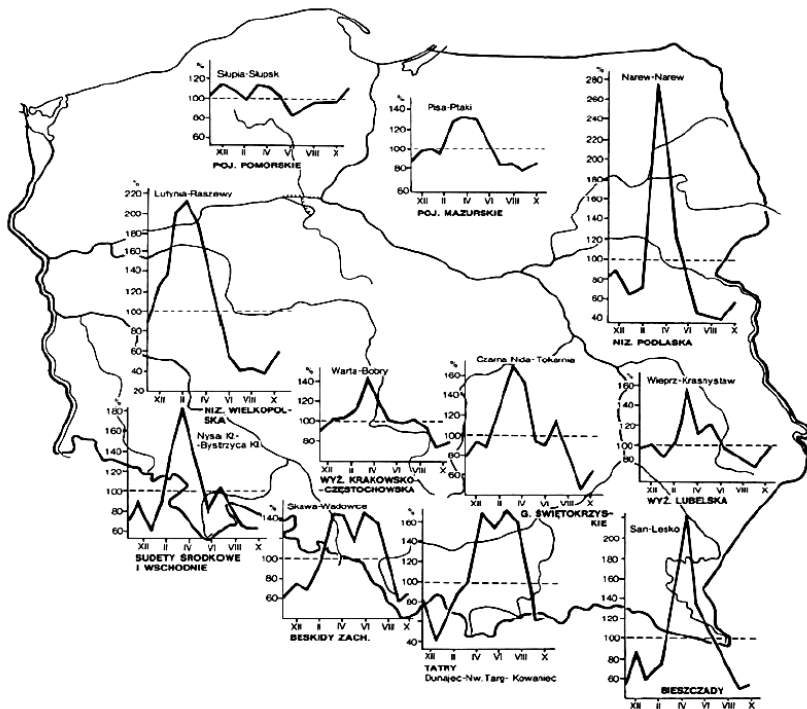
1 – niwalny słabo wykształcony; 2 – niwalny silnie wykształcony; 3 – niwalny średnio wykształcony;  
4 – niwalno-pluwialny; 5 – pluwiально-niwalny.

II. Zmienność przepływów dobowych:

6 –  $C_v < 0,5$ ;  
7 –  $0,5 < C_v < 1,0$ ;  
8 –  $1,0 < C_v < 1,5$ ;  
9 –  $1,5 < C_v < 2,0$ ;  
10 –  $C_v > 2,0$

( $C_v$  – stosunek odchylenia decylowego do mediany).

III. Udział zasilania podziemnego i powierzchniowego w odpływie całkowitym: 1 – znaczna przewaga zasilania podziemnego, 2 – słaba przewaga zasilania podziemnego, 3 – równowaga obu typów zasilania, 4 – słaba przewaga zasilania powierzchniowego, 5 – znaczna przewaga zasilania powierzchniowego.



Rys. 3. Sezonowy rytm odpływu w wybranych regionach (opr. I. Dynowska) [2, 7].

# Moc wyjściowa małej elektrowni wodnej przepływowej

Przybliżoną moc elektrowni wodnej  $P$ , w kW, można wyrazić następującą zależnością [5-7]:

$$P = 9,81 \cdot H Q \eta_T \eta_G, \quad (1)$$

gdzie:

$H$  – spad niwelacyjny (różnica poziomów lustra wody pomiędzy poziomami niwelacyjnymi luster górnej wody GW, a dolnej wody DW) [m];

$Q$  – przepływ turbiny [ $\text{m}^3/\text{s}$ ];

$\eta_T$  – sprawność turbiny;

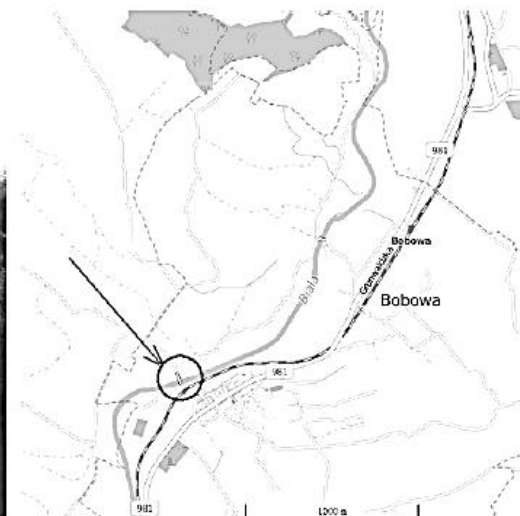
$\eta_G$  – sprawność generatora.

Dlatego najważniejsze z punktu widzenia modelowania elektrowni wodnych jest poznanie charakteru dwóch zmiennych wpływających na moc: przepływu turbiny  $Q(t)$  oraz wysokości spad  $H(t)$ . Można założyć, że poziom wody górnej  $H_{GW}$  jest utrzymywany na stałym poziomie. Jeśli elektrownia ma duży spad, wówczas zmiany poziomu dolnej wody  $H_{DW}$  są znikome w stosunku do różnicy poziomów. W takim przypadku można przyjąć stałą wielkość spad. Jeśli mamy do czynienia z elektrownią o niskim spadzie, do których zalicza się większość małych elektrowni wodnych, wówczas należy uwzględnić zmianę poziomu lustra wody dolnej w funkcji natężenia przepływu  $H_{DW} = f(Q)$ . Zależność ta nosi nazwę krzywej przepływu (konsumcyjnej) i jest związana z kształtem przekroju poprzecznego rzeki [1]. Gdy odpływ z elektrowni jest swobodny, to zależność ta jest stała. Należy jednak pamiętać, że pojawienie się pokrywy lodowej lub też zarosnięcie rzeki wpływają na zmianę tej zależności [10].

## Charakterystyka natężenia przepływu

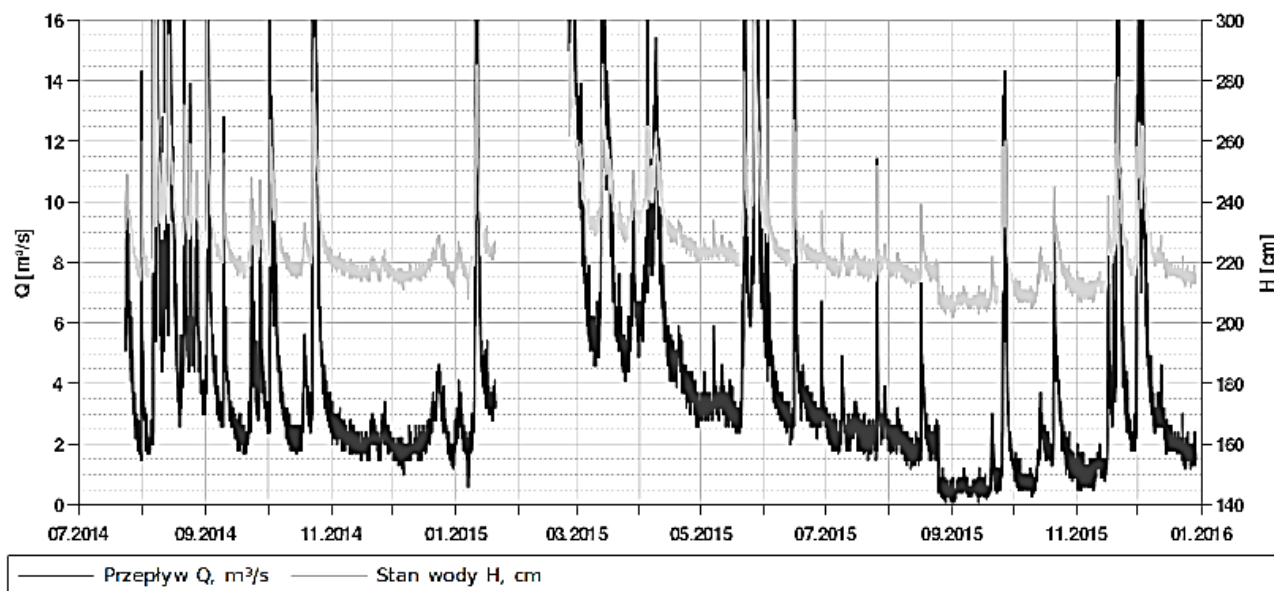
Znaczna różnorodność charakteru przepływu dla różnych rzek w Polsce sprawia, że w celu stworzenia modelu przepływu w wybranej lokalizacji należy wykorzystać analizę danych historycznych. Ponieważ reżim odpływu rzeczno-górnego ma charakter sezonowy, a pogoda w poszczególnych latach może różnić się od siebie znacznie, minimalnym wymaganym okresem obserwacji jest kilkanaście lat. W przypadku braku odpowiednich danych dla określonej lokalizacji, można wyliczyć je posługując się wynikami pomiarów z sąsiednich punktów wodowskazowych [1].

Procedura tworzenia modelu natężenia przepływu zostanie przedstawiona na przykładzie rzeki Biała Tarnowska, w miejscowości Bobowa, w województwie Małopolskim (rys. 4). Zgodnie z klasyfikacją zawartą w [2, 7] (rys. 1) rzeka w tej lokalizacji ma reżim niwalno-pluwialny, o średniej zmienności przepływów dobowych i o znacznej przewadze zasilania powierzchniowego. Historyczne stany wód zostały zaczerpnięte ze strony Monitoringu Powodziowego rzeki Biała [3] (rys. 5).

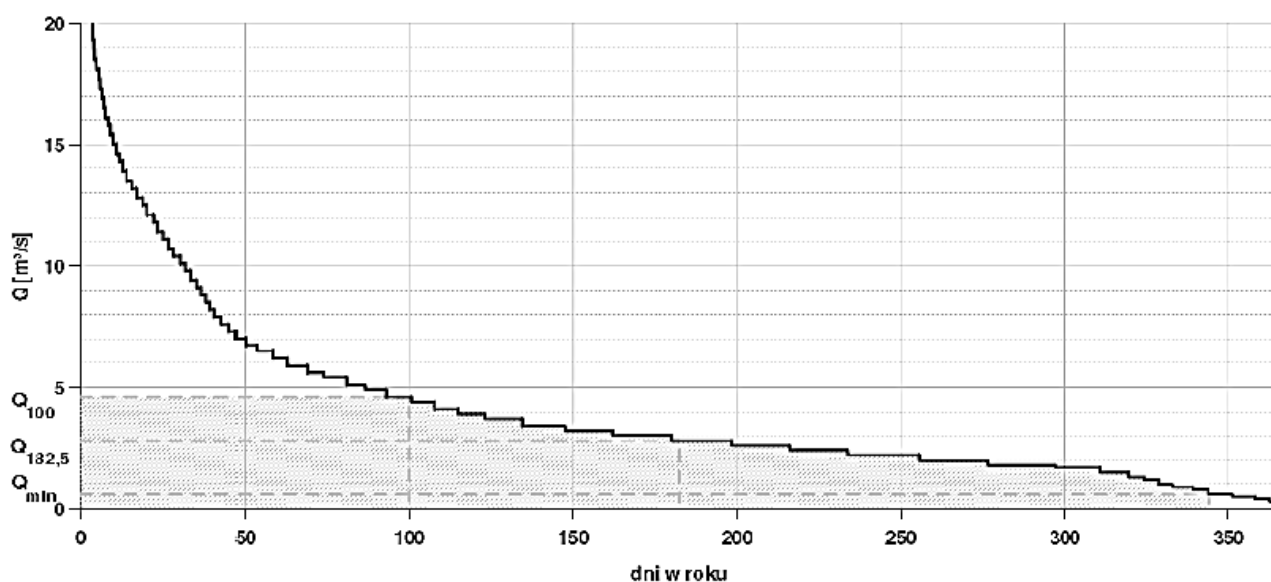


Rys. 4. Widok (opracowanie własne) oraz lokalizacja punktu pomiarowego (opracowanie własne, podkład mapowy OpenStreetMap [www.openstreetmap.org](http://www.openstreetmap.org)).

Zmianę natężenia przepływu w ciągu roku można przedstawić w postaci wykresu uporządkowanego (rys. 6). Na tym wykresie można odczytać charakterystyczne wielkości przepływu  $Q_i$ , które występują wraz z stanami wyższymi przez  $i$  dni w ciągu roku. Pozwala to szacować ekonomiczną wielkość przepływu instalowanego  $Q_{inst}$ . Jeśli będzie on zbyt niski, nie zostanie wykorzystana znaczna część energii cieku, gdyż woda przewyższająca ten przepływ będzie przepuszczana jałowo przez jaz. Zwiększanie przepływu instalowanego powoduje, zwiększanie kosztów budowy i eksploatacji elektrowni. Jednocześnie przy dużym przepływie instalowanym będzie on wykorzystywany jedynie przez krótki czas w roku. Dlatego przyjmuje się, że ekonomicznie uzasadnione jest budowanie elektrowni uwzględniając przepływ 100 dniowy ( $Q_{inst} \approx Q_{100}$ ). W przypadku braku wiarygodnych danych, można założyć, że przepływ instalowany powinien stanowić 1,2÷2,0 krotność średniego natężenia przepływu  $Q_{sr}$  [10].



Rys. 5. Zmienność stanu wody oraz przepływu w Bobowej, na rzece Biała Tarnowska (dane [3], opracowanie własne).

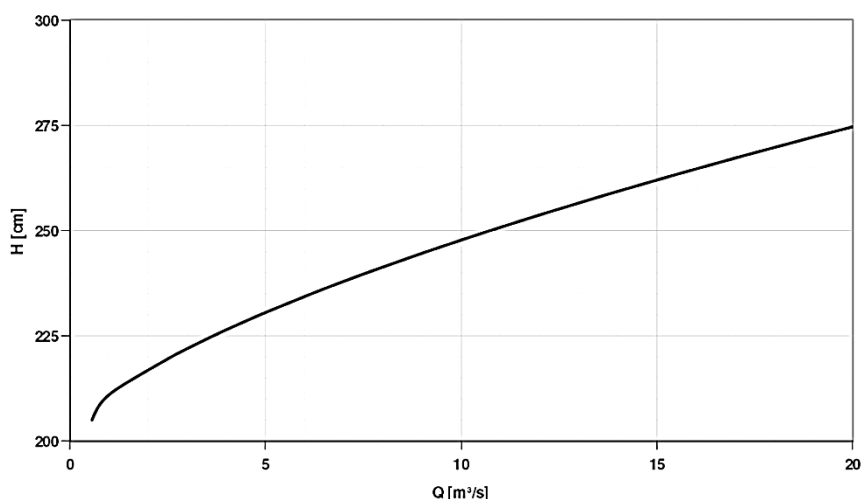


Rys. 6. Krzywa czasu trwania przepływu w ciągu roku dla Białej Tarnowskiej w Bobowej:  $Q_{100}$  – przepływ, który jest przekraczany przez 100 dni w roku;  $Q_{182,5}$  – odpowiadający medianie przepływu (stan zwyczajny);  $Q_{min}$  – przepływ przy którym osiągnęte jest minimum techniczne elektrowni wodnej; obszar zakreskowany oznacza możliwy do wykorzystania przez elektrownię wodną przepływ, przy założeniu, że jej przepływ instalowany jest równy  $Q_{100}$ , zaś minimalny  $Q_{min}$ .

# Charakterystyka mocy małej elektrowni wodnej w funkcji przepływu

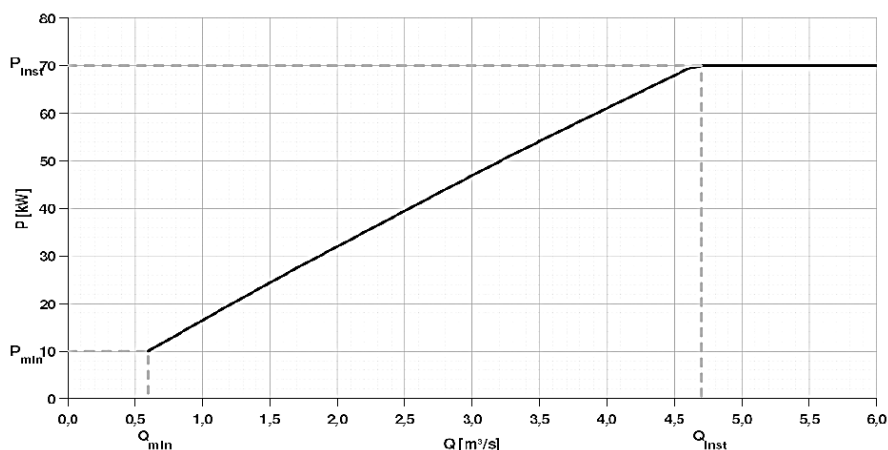
W celu wyznaczenia charakterystyki mocy wyjściowej małej elektrowni wodnej w funkcji przepływu zostały przyjęte następujące założenia:

- elektrownia zostanie zbudowana na rzece Biała Tarnowska w Bobowej;
- moc zainstalowana elektrowni  $P_{inst} = 70$  kW;
- przepływ zainstalowany elektrowni  $Q_{inst} = 4,7$  m<sup>3</sup>/s;
- utrzymywany jest stały poziom górnej wody  $H_{GW} = 421$  cm; nadmiar przepływu może być przepuszczany przez jaz;
- przy przepływie średnim  $Q_{sr} = 2,8$  m<sup>3</sup>/s poziom dolnej wody  $H_{DW} = 221$  cm, a spad  $H = H_{GW} - H_{DW} = 2,0$  m;
- poziom dolnej wody  $H_{DW}$  jest zależny od przepływu zgodnie z krzywą przepływu przedstawioną na rys. 7;
- iloczyn sprawności turbiny  $\eta_T$  oraz generatora  $\eta_G$  jest stały i wynosi 0,8; w dokładniejszych analizach należałoby uwzględnić zmienność sprawności w funkcji przepływu.



Rys. 7. Krzywa przepływu (konsumcyjna) dla Białej Tarnowskiej w Bobowej.

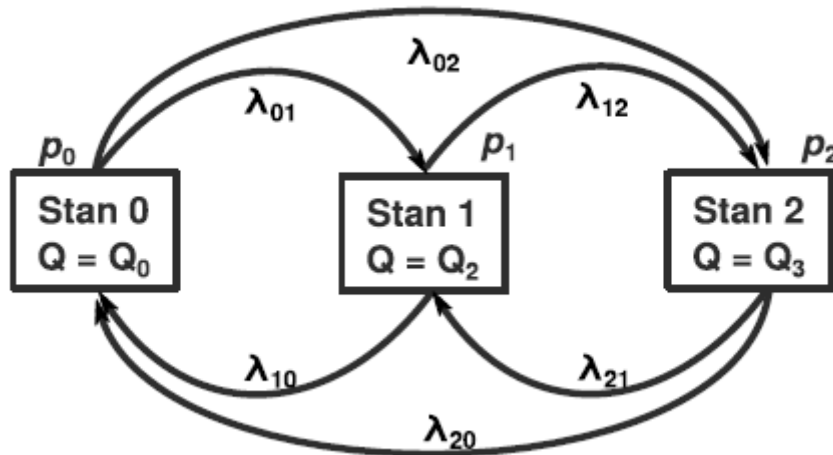
Wyznaczona na podstawie równania (1) charakterystyka została przedstawiona na rys. 8. Można zauważyć, że pomimo stosunkowo niewielkiego spadku w zakresie przepływów od minimalnego  $Q_{min}$  do zainstalowanego  $Q_{inst}$  moc wyjściowa jest praktycznie liniowo zależna od przepływu. Poniżej wielkości przepływu minimalnego  $Q_{min}$  energia nie jest generowana, ze względu na minimum techniczne turbiny i generatora.



Rys. 8. Obliczona zależność mocy wyjściowej małej elektrowni wodnej od natężenia przepływu.

## Modelowanie pracy małej elektrowni wodnej

Do modelowania natężenia przepływu użyto metody procesów Markowa [4, 8]. Założono użycie modelu trójstanowego (rys. 9), gdzie wielkość natężenia przepływu może przyjmować trzy różne stany. Dla każdego z nich można wyznaczyć, korzystając z charakterystyki przedstawionej na rys. 8, odpowiadającą mu moc wyjściową małej elektrowni wodnej.



Rys. 9. Schemat łańcuchów Markowa użytych do modelowania dostępności natężenia przepływu.

Algorytm wyznaczania parametrów modelu był następujący. Poszczególne wartości przepływów z danych historycznych zostały przydzielone klasom odpowiadające trzem stanom pracy elektrowni. Ze względu na wahania przepływu przy przydzielaniu do klas została użyta histereza 0,2 m<sup>3</sup>/s. Do stanu 0 zostały przydzielone te dane, dla których wartość przepływu spadła poniżej 0,7 m<sup>3</sup>/s; do stanu 1 dane, w przypadku których przepływ spadł poniżej 3,5 m<sup>3</sup>/s ze stanu 2 lub wzrósł ponad 1,1 m<sup>3</sup>/s ze stanu 0; do stanu 2, gdy natężenie przepływu wzrosło powyżej 3,9 m<sup>3</sup>/s. Następnie wyznaczono częstości oraz intensywności przejść pomiędzy poszczególnymi stanami λ<sub>ij</sub>.

$$\lambda_{ij} = \frac{f_{ij}}{\sum_{k=1}^N f_{ik}} \quad (2)$$

gdzie:

$N$  – liczba stanów,

$\lambda_{ij}$  – intensywność przejść ze stanu  $i$  do  $j$ ,

$f_{ij}$  – częstość przejść ze stanu  $i$  do stanu  $j$  w ciągu danych historycznych.

Prawdopodobieństwa graniczne (stacjonarne)  $\pi_i$  przebywania w stanie  $i$  wyznaczano korzystając z zależności [4, 8]:

$$\mathbf{0} = \mathbf{\Pi A} \quad (3)$$

gdzie:

$\mathbf{\Pi}$  – wektor kolumnowy granicznych (stacjonarnych) prawdopodobieństw stanów procesu,

$\mathbf{A}$  – macierz intensywności przejść:

$$\begin{bmatrix} -\sum_{j=2}^N \lambda_{j1} & \lambda_{12} & \dots & \lambda_{1N} \\ \lambda_{21} & -\sum_{\substack{j=1 \\ j \neq 2}}^m \lambda_{j2} & \dots & \lambda_{2N} \\ \vdots & \cdot & \ddots & \vdots \\ \lambda_{N1} & \lambda_{N2} & \dots & -\sum_{j=1}^{N-i} \lambda_{jN} \end{bmatrix} \quad (4)$$

Dla uniknięcia nieoznaczoności układu (4) należy usunąć jedno równanie i zastąpić je warunkiem:

$$\sum_{i=1}^N p_i = 1 \quad (5)$$

Średnie czasy przebywania w stanie i wyznaczono z zależności:

$$T_i = \frac{1}{\sum_{j \neq i} \lambda_{ij}} \quad (6)$$

Wyznaczone parametry modelu dostępności natężenia przepływu, przedstawione w tabeli 1, odpowiadają parametrom modelu trójstanowego jednostki wytwórczej. Uzyskane wyniki można wykorzystać do dalszych analiz niezawodności systemów elektroenergetycznych.

Tabela 1 Wyznaczone parametry modelu trójstanowego małej elektrowni wodnej.

Nr stanu [i]	Q <sub>i</sub> [m <sup>3</sup> /s]	H <sub>i</sub> [m]	P <sub>i</sub> [kW]	λ <sub>ij</sub> [1/h]			T <sub>i</sub> [h]	p <sub>i</sub>
				j = 0	j = 1	j = 2		
0	0,0	n.d.	0	0,9746	0,0254	0,0000	39,39	0,077
1	2,2	2,02	35	0,0033	0,9881	0,0086	83,98	0,585
2	4,7	1,91	P <sub>inst</sub> =70	0,0000	0,0148	0,9852	67,38	0,338

## Wnioski

1. Moc, którą generuje w danej chwili mała elektrownia wodna zależy od dostępności energii pierwotnej, jaką jest energia wody. Moc ta jest zależna w głównej mierze od chwilowego natężenia przepływu wody. Mniejszy wpływ ma wielkość spadu. Zatem, aby móc modelować zachowanie tego typu elektrowni jest potrzebne poznanie charakteru zmienności przepływu.

2. W artykule przedstawiono metodykę tworzenia modeli niezawodnościowych małych elektrowni wodnych. Ze względu na znaczną różnorodność charakterów rzek w Polsce dla każdej z elektrowni należy przeprowadzić podobną analizę, z wykorzystaniem wieloletnich danych historycznych. Należy pamiętać o zmienności sezonowej wielkości przepływu, jak również o zmienności pomiędzy poszczególnymi latami. W klimacie Polski zdarzają się zarówno bardzo suche, jak i bardzo mokre lata, przez co analizę należy wykonać na obserwacjach z co najmniej kilkunastu lat.

3. Ponieważ rzeki w Polsce są zasilane z opadów lub też topniejącego śniegu, to na danym obszarze charakter zmian przepływu będzie podobny dla wielu cieków. Na przykład nagłe wezbranie spowodowane przejściem frontu atmosferycznego z silnymi opadami będzie wpływało na generację energii elektrycznej nie tylko w jednej elektrowni, ale również w innych okolicznych małych elektrowniach wodnych. Dlatego, przy modelowaniu małych elektrowni wodnych w analizach niezawodności systemów elektroenergetycznych, celowe wydaje się łączenie wielu małych jednostek wytwórczych (agregacja) w jedną jednostkę o większej mocy.



## Literatura

- [1] Byczkowski A.: Hydrologia. Wydawnictwo SGGW. Warszawa 1999.
- [2] Dynowska I.: Reżim odpływu rzecznoego. Atlas Rzeczypospolitej Polskiej. Polska Akademia Nauk, Instytut Geografii i Przestrzennego Zagospodarowania im. Stanisława Leszczyckiego. Warszawa, 1994.
- [3] Historyczne stany wody na rzece Biała Tarnowska w miejscowości Bobowa ze strony Monitoringu Powodziowego rzeki Biała:  
[http://www.biala.prospect.pl/wizualizacja/punkt\\_pomiarowy.php?prze=BOBI](http://www.biala.prospect.pl/wizualizacja/punkt_pomiarowy.php?prze=BOBI)
- [4] Paska J.: Niezawodność systemów elektroenergetycznych. Oficyna Wydawnicza Politechniki Warszawskiej. Warszawa 2005.
- [5] Paska J.: Wytwarzanie energii elektrycznej. Oficyna Wydawnicza Politechniki Warszawskiej. Warszawa 2005.
- [6] Paska J.: Wytwarzanie rozproszone energii elektrycznej i ciepła. Oficyna Wydawnicza Politechniki Warszawskiej. Warszawa 2010.
- [7] Pawlik M., Strzelczyk F.: Elektrownie. Wydawnictwo WNT. Warszawa 2012.
- [8] Sheldon M. Ross.: Stochastic Processes. John Wiley & Sons. New York 1996.
- [9] Starkel L.: Geografia Polski Środowisko przyrodnicze. Wydawnictwo Naukowe PWN. Warszawa 1999.
- [10] Zawadzki P.: Małe elektrownie wodne – wykłady. Ze strony:  
[www.up.poznan.pl/kiwis/dydaktyka/mew/mew.pdf](http://www.up.poznan.pl/kiwis/dydaktyka/mew/mew.pdf)