

Wpływ projektowanej elektrowni szczytowo-pompowej Solina – Jawor na reżim pracy elektrowni Solina – Myczkowce

1. Wstęp

W dzisiejszej rzeczywistości, przy nadrzędnych kryteriach dobrego stanu ekologicznego, poczucia sprawiedliwości społecznej oraz efektywności ekonomicznej, infrastruktura wodna, coraz częściej droższa oraz ingerująca w środowisko, jest wielozadaniowym systemem wodno-gospodarczym. Termin „wielozadaniowa infrastruktura wodna” systemu wodno-gospodarczego (MPWI, ang. *multi-purpose water infrastructure*) [1] w pełni oddaje sposób realizacji zadań i osiągania celów. Systemy, które są wykorzystywane do realizacji więcej niż jednego celu w działaniach gospodarczych, społecznych i środowiskowych, podnoszą efektywność ekonomiczną dużych przedsięwzięć hydrotechnicznych oraz wzmacniają ich pozycję w procesie zarządzania zasobami wodnymi oraz środowiskowymi [2, 3].

Obiekty hydrotechniczne Solina – Myczkowce są od początku ich eksploatacji wielozadaniowymi obiektami hydrotechnicznymi, realizującymi funkcje produkcji energii elektrycznej, zaopatrzenia w wodę, alimentacji, retencji, ochrony doliny poniżej przed powodzią oraz rekreacji i turystyki [4-8]. Produkcja energii elektrycznej realizowana jest przez przyzaporową elektrownię Solina, pełniącą zadania elektrowni szczytowo-pompowej, oraz dwie elektrownie Myczkowce: mała przyzaporowa i większa derywacyjna. W niniejszym artykule rozważa się rozbudowę istniejącej elektrowni Solina – Myczkowce o dodatkowy obiekt hydroenergetyczny: elektrownię szczytowo-pompową Solina – Jawor.

2. Opis obecnego stanu obiektu

2.1. Zlewnia zbiorników Solina – Myczkowce

Powierzchnia zlewni rzeki San dla przekroju Solina (rys. 1) wynosi 1174,5 km². Powierzchnia zlewni dla przekroju Myczkowce – 1248,0 km². Zbiornik soliński zasilany jest z dwóch głównych dopływów, rzeki San i jej prawego dopływu – rzeki Solinki. Przepływ średni roczny (SSQ) w przekroju dla Soliny z okresu eksploatacji od 1969 do 2006 wynosi 22,7 m³/s [5, 6].

¹ btwarog@pk.edu.pl, Katedra Geoinżynierii i Gospodarki Wodnej, Wydział Inżynierii Środowiska i Energetyki, Politechnika Krakowska, www.pk.edu.pl.



Rysunek 1. Widok zapory i zbiornika Solina [fot. Bąk, Krzeszowiak, Borowiec, Kordaszewski, Kozłowski]

2.2. Gospodarka wodna kaskady

Obecnie kaskada Solina – Myczkowce spełnia następujące zadania:

- wykorzystanie energetyczne retencjonowanej wody;
- ochrona przed powodzią na rzece San;
- wyrównywanie wieloletnich przepływów minimalnych rzeki San – poniżej przekroju Myczkowce;
- zaopatrzenie w wodę do celów komunalnych i przemysłowych oraz cele rekreacyjne.

W okresie normalnej pracy priorytet jest ukierunkowany na realizację czynności związanych z wypełnianiem zadań energetycznych dla Krajowego Systemu Elektroenergetycznego (KSE), natomiast w okresie powodziowym ze względu na zagrożenie dla społeczeństwa w dolinie poniżej oraz niebezpieczeństwo dla obiektów kaskady (maksymalna przepustowość stopnia Myczkowce jest mniejsza od maksymalnej przepustowości stopnia Solina) priorytet jest przedstawiony na ochronę przed powodzią. Realizacja zadań ochrony przed powodzią oraz utrzymanie potencjału energetycznego są sprzeczne zadaniowo, co prowadzi do konfliktowych działań. Dla ochrony przed powodzią wymagane jest zejście z piętrzeniem do bezpiecznej rzędnej na zbiorniku w celu przygotowania tzw. rezerwy powodziowej. Osiągnięcie celów energetycznych wymaga utrzymania piętrzenia możliwie najwyżej. Wszystkie realizowane zadania muszą być zgodne z instrukcją gospodarowania wodą na kaskadzie. Ze względu na bezpieczeństwo obiektu i ludności zamieszkującej dolinę Sanu poniżej jedynym racjonalnym rozwiązaniem jest przyjęcie priorytetów w sposobie gospodarowania wodą na kaskadzie [3-12].

2.3. Elektrownia wodna Solina

EW Solina (rys. 2) jest specjalnym typem elektrowni wodnej o zdolności przepompowania wody ze zbiornika dolnego do zbiornika górnego. Podstawowe dane elektrowni przedstawiono w tabeli 1.

Zbiornik Solina został utworzony w 1968 roku. Przy maksymalnym piętrzeniu gromadzi 503,97 mln m³ wody, w tym pojemność użytkowa wynosi 275,70 mln m³ (tab. 1). Normalny poziom piętrzenia wynosi 420,00 m n.p.m. Zbiornik soliński jest zbiornikiem o wieloletnim wyrównaniu odpływów [5, 6].



Rysunek 2. Widok na Oddział Zespół Elektrowni Wodnych Solina – Myczkowce, PGE Energia Odnawialna S.A. [fot. Bąk, Krzeszowiak, Borowiec, Kordaszewski, Kozłowski]

Tabela 1. Podstawowe parametry techniczne zbiornika Solina

Nazwy charakterystyczne	Poziomy piętrzenia	
	[m n.p.m.]	
Najwyższy poziom awaryjnego przeciążenia (maksymalny poziom piętrzenia)	max. PP	421,50
Normalny poziom piętrzenia	NPP	420,00
Minimalny poziom piętrzenia	min. PP	401,50
	Poziomy piętrzenia	Pojemności
	[m n.p.m.]	[mln m ³]
pojemność całkowita z nadpiętrzeniem		503,97
pojemność użytkowa	401,5 ÷ 420,0	275,70
rezerva powodziowa stała	417,2 ÷ 420,0	50,00
rezerva powodziowa forsowana	420,0 ÷ 421,5	31,93
pojemność martwa	401,5	196,34

Źródło: opracowanie własne na podstawie [5].

Turbozespoły solińskie (tab. 2) dostarczają do systemu energetycznego moc czynną w okresach szczytowego zapotrzebowania mocy (przedpołudnie, wieczór). Oprócz mocy czynnej wytwarzają również moc bierną, przyczyniając się do regulacji częstotliwości w systemie.

Tabela 2. Charakterystyczne parametry EW Solina

	Wielkość spadu [m]	Moce turbin [MW]
moc instalowana		$(2 \times 68) + (2 \times 32) = 200$
hydrozespoły klasyczne przy pracy turbinowej	$H_{sr} = 55$	$2 \times 68 = 136$
hydrozespoły odwracalne przy pracy turbinowej	$H_{sr} = 55$	$2 \times 32 = 64$
przy pracy pompowej*	$H_{sr} = 55$	$2 \times 30 = 60$
moc maksymalna pompowa		69
Przełyki turbin		[m ³ /s]
przełyk przy pracy turbinowej	$H = 55$	$(2 \times 138) + (2 \times 66) = 408$
przełyk przy pracy pompowej	$H = 55$	$2 \times 52,5 = 105$
	Spady charakterystyczne	Zakres rzędnych
	m	m n.p.m.
max. brutto	$H_{brutto\ max} = 61$	$420,0 \div 359,0$
min. brutto	$H_{brutto\ min} = 39$	$401,5 \div 362,5$
* pompowanie prowadzi się wyłącznie przy spadkach mniejszych od 55,3 m		

Źródło: opracowanie własne na podstawie [5].

2.4. Elektrownia wodna Myczkowce

Derywacyjna elektrownia Myczkowce (tab. 3) znajduje się w Zwierzyniu, zaś woda doprowadzona jest do niej sztolnią ze zbiornika myczkowieckiego. Zbiornik Myczkowiecki jest zbiornikiem wyrównania dobowego interwencyjno-regulacyjnej pracy EW Solina i wraz ze zbiornikiem Solina tworzą kaskadę zbiorników o silnie powiązanej gospodarce wodnej. Zbiornik Myczkowiecki stanowi dolną wodę dla elektrowni Solina. Najwyższy poziom piętrzenia użytkowego wynosi 362,50 m n.p.m. Pojemność całkowita z napiętrzeniem wynosi 10,7 mln m³, a pojemność użytkowa: 4,4 mln m³. Ze względu na niewielką pojemność pozwala jedynie na dobowe wyrównywanie odpływu ze zbiornika Solina oraz na akumulację wody przeznaczoną na pompowanie turbinami rewersyjnymi [7].

Elektrownia wyposażona jest w dwa pionowe turbozespoły z turbinami Kaplana, bezpośrednio sprzęgnięte z prądnicami synchronicznymi [5, 6; 10-11]. Podstawowe parametry elektrowni przedstawiono w tabeli 3.

Tabela 3. Charakterystyczne parametry EW Myczkowce

Moce turbin [MW]		
moc instalowana		$2 \times 4,15 = 8,3$
Przełyki turbin [m ³ /s]		
przełyk instalowany		$2 \times 22,5 = 45$
Spady [m]		
spad minimalny		19,2
spad nominalny		21,7
spad maksymalny		22,7
Spady charakterystyczne		
max. brutto	$(362,5 \div 337,9)$ [m n.p.m.] $Q_{min} = 6,0$ [m ³ /s]	24,6 [m]
min. brutto	$(359,0 \div 338,7)$ [m n.p.m.] $Q = 45,0$ [m ³ /s]	20,3 [m]

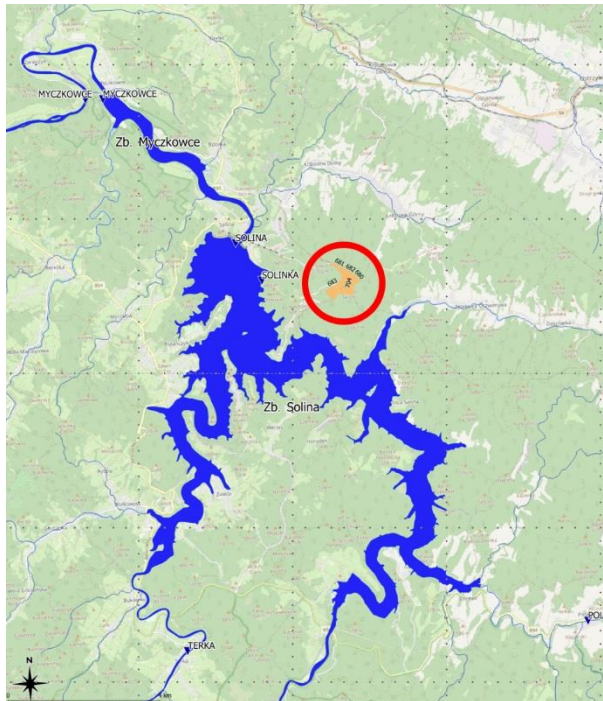
Źródło: opracowanie własne na podstawie [5].

3. Gospodarka energetyczna zbiornika Solina

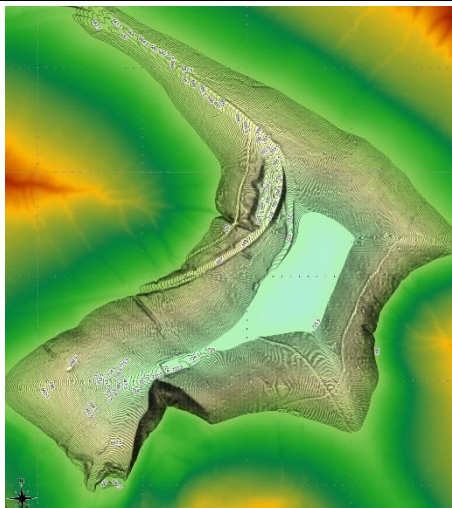
EW Solina jest jednostką wytwórczą centralnie dysponowaną (JWCD) o charakterze szczytowo-pompowym, pracuje na retencjonowanym dopływie naturalnym do zbiornika Solina i pełni również funkcję elektrowni interwencyjnej. Poza produkcją planową elektrownia Solina – Myczkowce świadczy usługi systemowe dla potrzeb operatorów. Na każde polecenie Krajowej Dyspozycji Mocy (KDM) jest interwencyjnie uruchamiana do usług systemowych (praca generatorowa, pompowa i kompensatorowa). Elektrownia pracuje w reżimie generatorowym oraz w reżimie pompowym. Gospodarka energetyczna zbiorników wiąże się z optymalnym wykorzystaniem pojemności zbiornika do celów produkcji energii elektrycznej.

4. Charakterystyka obiektu projektowanego Jawor

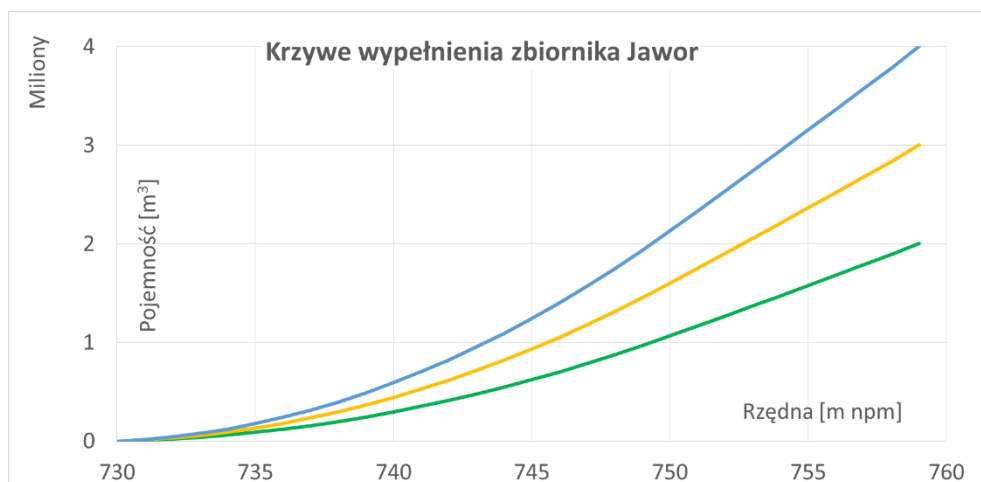
W niniejszej koncepcji ESP Solina – Jawor (rys. 3, 4) analizowana jest konfiguracja czterech turbin rewersyjnych Francisca. Zaproponowano moc zainstalowaną turbin dla pracy generatorowej 4×100 MW oraz dla reżimu pompowego 4×110 MW. Sprawność cyklu elektrowni wynosi około 75% [4, 5]. Zbiornik górny jest zbiornikiem ziemnym, sztucznym, bez dopływu naturalnego. Usytuowany jest na szczycie góry Jawor (rys. 4). W wykonanej analizie przyjęto pojemność zbiornika od 2 mln m³ do 4 mln m³ wody. Lustro wody zbiornika górnego waha się w zakresie roboczym od 735,00 m n.p.m. do 755,00 m n.p.m. (rys. 3-5).



Rysunek 3. Kaskada zbiorników Solina – Myczkowce oraz lokalizacja planowanego zbiornika Jawor [opracowanie własne]



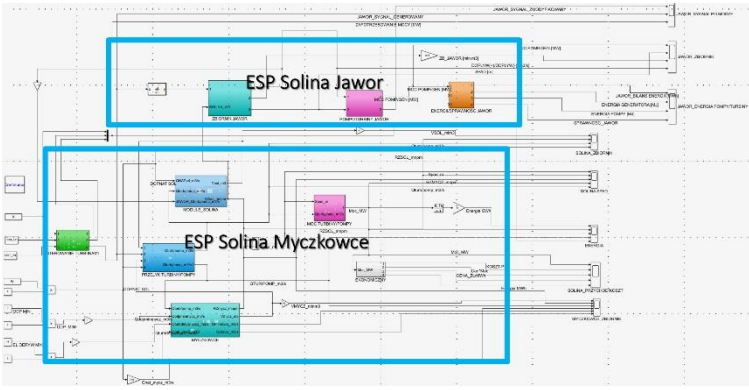
Rysunek 4. Topografia szczytu góry Jawor [opracowanie własne]



Rysunek 5. Analizowane warianty zbiornika Jawor [opracowanie własne]

5. Opis modelu symulacyjnego pracy elektrowni Solina – Jawor

Model został opracowany w interfejsie Matlab – Simulink (rys. 6). Do symulacji modelu przyjęto dane historycznych dopływów do zbiornika (Katedra Geoinżynierii i Gospodarki Wodnej Politechniki Krakowskiej). Dane o zapotrzebowaniu mocy zostały przyjęte dla okresu o tej samej długości [10, 11].



Rysunek 6. Model symulacyjny pracy ESP Solina – Myczkowce + Solina – Jawor, Matlab – Simulink [opracowanie własne]

Przy tworzeniu modelu skupiono się na następujących elementach:

1. Model ESP Solina – Myczkowce

- moduł wejścia; w tym bloku czytana jest informacja o zapotrzebowaniu mocy KSE, wielkości kryteriów uruchamiania turbin/pomp oraz o wielkości dopływu naturalnego do zbiorników (mogą to być prognozy tych wielkości);
- moduł budowania sygnału sterowania turbinami generatorowymi i rewersyjnymi [6]; odpowiada za przygotowanie harmonogramu włączeń i wyłączeń turbin oraz pompoturbin zarówno do pracy pompowej, jak i generatorowej;
- moduł modyfikacji sygnału sterowania [6]; modyfikuje sygnał sterowania włączeń i wyłączeń w wyniku ograniczenia bieżących możliwości retencjonowania zbiornika górnego/dolnego (ewentualnie ze względu na impuls pracy interwencyjnej może to być prognoza);
- moduł turbin/pomp; oblicza moc i energię turbin pracujących w reżimie generatorowym oraz turbin rewersyjnych w reżimie generatorowym i pompowym;
- moduł ekonomiczny; wykonuje obliczenia przychód–koszt uwzględniające bieżące ceny energii lub ich prognozę;
- moduł wyjścia; prezentuje graficznie wyniki symulacji lub pozwala zapisać wyniki w formacie np. ASCII.

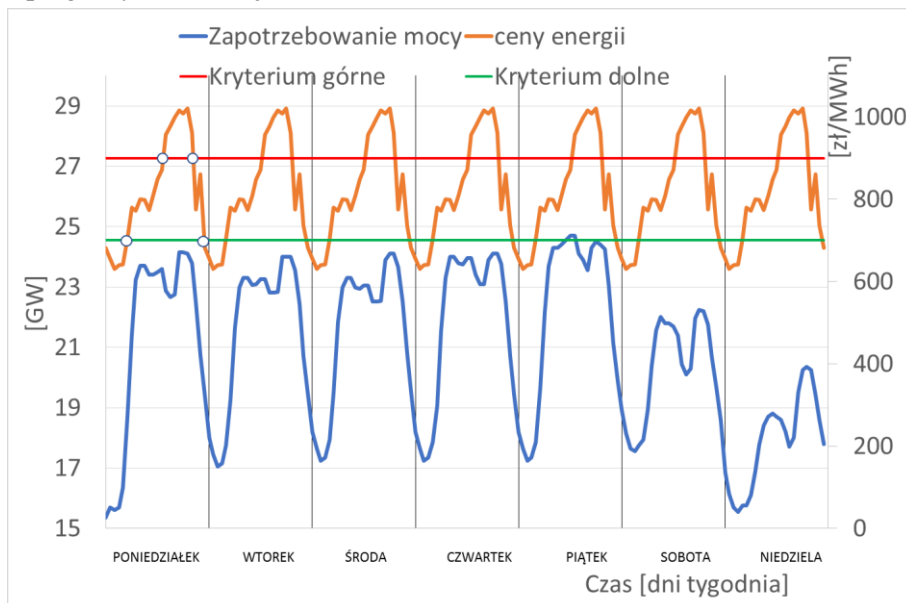
2. Model ESP Solina – Jawor

- moduł współpracy zbiornika Jawor ze zbiornikiem Solina; odpowiada za bilans wodny dwóch zbiorników;
- moduł turbin/pomp; oblicza moc i energię turbin pracujących w reżimie generatorowym oraz turbin rewersyjnych w reżimie generatorowym i pompowym;
- moduł ekonomiczny; wykonuje obliczenia przychód–koszt uwzględniające bieżące ceny energii lub ich prognozę.

5.1. Moduł budowania sygnału włączenia/wyłączenia turbin oraz reżimu pracy

Moduł budowania sygnału oparto na zdefiniowanych kryteriach włączeń/wyłączeń, które nadawane są *a priori* przez dyspozytora systemu (np. KDM). Określają momenty włączeń i wyłączeń oraz reżim pracy turbin i pompoturbin. Kryterium włączeń/wyłączeń

i zmiany reżimu można zbudować na podstawie prognozy zapotrzebowania mocy lub prognozy cen energii. W niniejszej symulacji przyjęto jako kryterium rozkład 24-godzinny cen regulowanych. Kryterium dolne określono na poziomie 700 zł/MWh, natomiast górne: 900 zł/MWh (rys. 7). To przykładowe rozwiązanie może być modyfikowane poprzez prognozy/interwencje [10, 11].



Rysunek 7. Określenie punktów przełączeń z pracy turbinowej na pompową i odwrotnie na przykładzie siedmiodniowego okresu pracy [opracowanie własne]

5.2. Moduł modyfikacji sygnału włączeń/wyłączeń oraz reżimu pracy

Rzeczywiste parametry systemu oraz ograniczenia, jakie związane są z wielozadaniową realizacją celów kaskady, nie tylko w wymiarze energetycznym, ale również w obszarze gospodarki wodnej, wymagają modyfikacji sygnału sterowania turbinami. Ograniczenia wynikają głównie z dopuszczalnych wielkości pojemności obu zbiorników kaskady, ograniczeń dla wielkości odpływów jałowych, zakresów spadów pracy turbin w reżimie generatorowym oraz turbin rewersyjnych dla pracy generatorowej i pompowej. Dodatkowo pojawia się konieczność uwzględnienia tzw. interwencji, czyli zmiany reżimu pracy wynikającej z potrzeb KSE. Wzajemne przenikanie się tych ograniczeń, planowej pracy oraz interwencji wymaga przebudowania sygnału sterowania [10, 11].

5.3. Praca turbin/pompoturbin

Moduł pracy turbin/pompoturbin oblicza moc i energię turbin pracujących w reżimie generatorowym oraz turbin rewersyjnych w reżimie generatorowym i pompowym. Uwzględnia bieżące napięcie zbiornika Solina i zbiornika Myczkowce. Objętości wody w zbiornikach, napęnienia zbiorników, wynikowy spad oraz wielkość zużywanej/produkowanej energii obliczane są z uwzględnieniem bilansowych równań kaskady Solina – Myczkowce.

5.4. Moduł ekonomiczny

Moduł ekonomiczny (finansowy) pozwala ocenić wartość przychodu z tytułu sprzedaży produkowanej energii oraz kosztów związanych z kupnem niezbędnej energii do pompowania.

Wymiar finansowy jest obliczany wg następującego podejścia:

$$P = \frac{1}{3600} \sum \int_0^T C_{REG}(t) \cdot N_{G_i}(t) dt$$

$$K = \frac{1}{3600} \sum \int_0^T C_{REG}(t) \cdot N_{P_i}(t) dt$$

$$Z = P - K$$

gdzie:

$C_{REG}(t)$ – cena regulowana [zł/MWh],

$N_G(t)$ – moc turbiny w reżimie generatorowym [MW],

$N_P(t)$ – moc turbiny w reżimie pompowym [MW],

P, K, Z – przychód, koszt, zysk [zł].

6. Wyniki symulacji

Rozważono różne przypadki projektowe wielkości zbiornika lokalizowanego na górze Jawor. Przyjęto trzy warianty pojemności: 2 mln m³, 3 mln m³ i 4 mln m³. W wariantach założono stałe rzędne wypełnienia. Oznacza to, że w poszczególnych wariantach zmieniają się tylko wymiary poziome analizowanych zbiorników. Obliczenia wykonano dla wszystkich trzech wariantów przy założeniu stałej strategii sterowania turbinami. Moment włączeń/wyłączeń i charakter reżimu pracy zostały określone na podstawie kryteriów zmiany cen. Wielkość przęłyków turbin elektrowni Solina została dobrana wg następującego algorytmu:

- przęłyk turbin w reżimie generatorowym, przy założeniu pojemności zbiornika Solina

$$\alpha > 0$$

$$Q_{TG} = \begin{cases} V_{min} < V < V_{max}; \min(Q_{TG}^{nom}, \alpha \cdot Q_{dop}^{NAT}) \\ V = V_{max}; \min(Q_{TG}^{nom}, \alpha \cdot Q_{dop}^{NAT}) \\ V = V_{min}; 0 \end{cases}$$

- przęłyk turbin w reżimie pompowym

$$Q_{TP} = \begin{cases} V_{min} < V < V_{max}; Q_{TP}^{nom} \\ V = V_{max}; 0 \\ V = V_{min}; Q_{TP}^{nom} \end{cases}$$

gdzie:

Q_{TG} – przęłyk turbiny w reżimie generatorowym,

Q_{TP} – przęłyk turbiny w reżimie pompowym,

Q_{TG}^{nom} – przęłyk nominalny turbiny w reżimie generatorowym,

Q_{TP}^{nom} – przęłyk nominalny turbiny w reżimie pompowym,

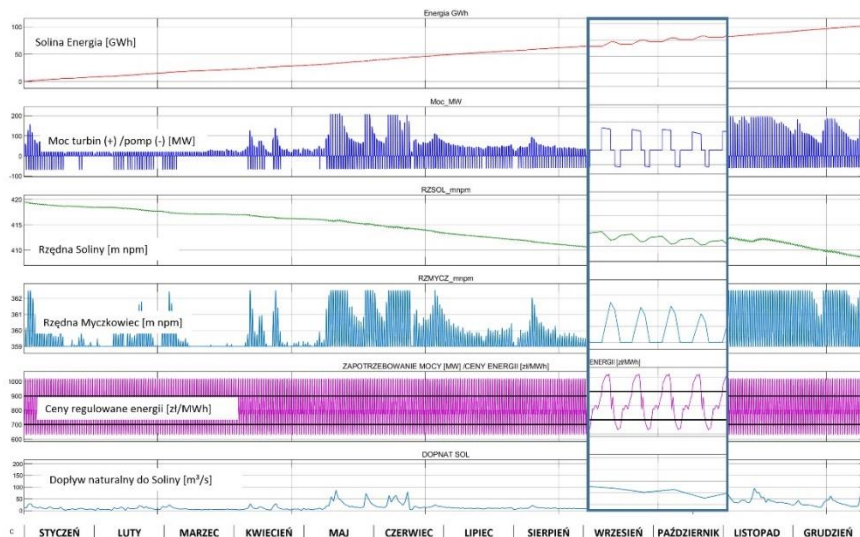
α – współczynnik proporcjonalności.

Reguła określona w ten sposób pozwala ustawić pracę turbin w reżimie generacyjnym proporcjonalnie do dopływu do zbiornika, natomiast praca w reżimie pompowym odpowiada nominalnym wartościom przełyków dla tego reżimu. W regule wartości uzależniono od pojemności zbiornika Solina, jednak algorytm uwzględnia ograniczenia obu zbiorników.

W celu uchwycenia zmian sezonowych, zarówno w zakresie warunków hydrologicznych, jak i w wartościach zapotrzebowania mocy, do symulacji przyjęto okres 365 dni. W symulacjach założono postać kryteriów definiujących momenty włączeń/wyłączeń oraz definiowania reżimu pracy turbin/pompoturbin z wykorzystaniem dobowej zmienności cen energii.

6.1. Status Quo

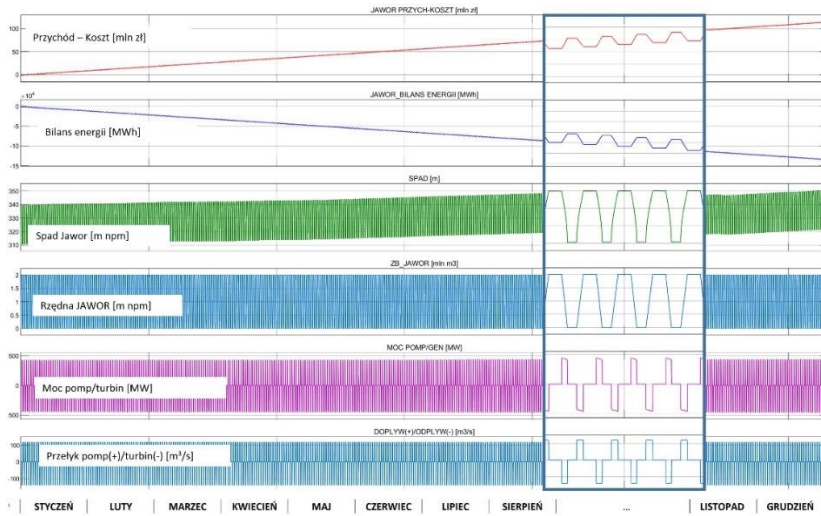
Zaprezentowano wyniki dla 365-dniowego okresu symulacji. Aby wykresy były czytelne, pokazano powiększone obszary dla wybranych przedziałów czasu. Rezultaty obliczeń pozwalają zauważyć związki i relacje pomiędzy zachowaniem poszczególnych obiektów/modułów. Rysunek 8 przedstawia wartość dopływu naturalnego, okresową funkcję regulowanych cen energii, rzędną zbiornika Myczkowce, rzędną zbiornika Solina, moc turbin/pompoturbin oraz bilans energii narastająco.



Rysunek 8. Praca ESP Solina – Myczkowce [opracowanie własne]

6.2. ESP Solina – Myczkowce + ESP Solina – Jawor

Analiza pracy systemu ESP Solina – Myczkowce oraz systemu z uwzględnieniem zbiornika Jawor pokazuje, że w zależności od parametrów ESP Solina – Jawor, tj. pojemności zbiornika oraz mocy turbin, dopiero przy dużych wartościach parametrów w porównaniu do parametrów ESP Solina można zauważyć wpływ na zmianę reżimu pracy obecnej kaskady (rys. 9).



Rysunek 9. Wyniki symulacji ESP Solina – Jawor [opracowanie własne]

Wyniki symulacji w aspekcie finansowym i energetycznym zostały pokazane w tabelach 4-6. Warianty zbiornika Jawor średnio gromadzą od 1,77 GWh do 3,54 GWh energii (tab. 4). Przy założonych parametrach sterowania turbinami bilans energetyczny dla jednego roku pracy ESP Solina – Jawor wynosi od -135,5 GWh do -239,4 GWh (tab. 5). Sprawność układu jest na poziomie około 75%. Rezultat bilansu finansowego jest dodatni, wynosi od +34,96 mln zł do +136,59 mln zł. Wyniki zależą od wartości dopływów do ESP Solina – Myczkowce oraz parametrów i strategii sterowania. Dodatni wynik finansowy został uzyskany przy odpowiednim doborze parametrów przełączania turbin, wcześniej opisanym przy budowaniu sygnału przełączania turbin. Analiza wyników symulacji pokazuje, że przy tak małych parametrach obiektu Jawor (od 2 mln m³ do 4 mln m³) praktycznie niezauważalny jest wpływ na reżim pracy Solina – Myczkowce (tab. 6).

Tabela 4. Wielkość gromadzonej energii potencjalnej przez zbiornik Jawor

Objętość zbiornika [mln m ³]	Średnia wysokość podnoszenia [m]	Energia potencjalna	
		[J]	[GWh]
2	325	6,38 E +12	1,77
3		9,56 E +12	2,66
4		1,28 E +13	3,54

Źródło: opracowanie własne.

Tabela 5. Wyniki rocznego bilansu energetycznego i finansowego

SOLINA – JAWOR	mln m ³	alfa	BILANS [mln zł]			BILANS [GWh]		
			JAWOR	SOLINA	MYCZKOWCE	JAWOR	SOLINA	MYCZKOWCE
2	10	34,960	119,184	38,978	-135,543	102,732	45,151	
3	10	107,307	119,148	38,978	-201,426	102,687	45,151	
4	10	136,590	118,920	38,978	-239,416	102,480	45,151	
bez zbiornika Jawor	10	0,000	119,317	38,978	0,000	102,812	45,151	

Źródło: opracowanie własne

Tabela 6. Statystyki rzędnej zbiorników Solina i Myczkowce dla jednego roku

ESP Solina – Myczkowce + ESP Solina – Jawor					
Zbiornik Jawor	alfa	SOLINA		MYCZKOWCE	
		Średnia	Odchylenie standardowe	Średnia	Odchylenie standardowe
mln m ³		[m n.p.m.]			
2	10	413,714	3,265	359,11	1,059
3	10	413,711	3,245	359,711	1,059
4	10	413,633	3,265	359,711	1,059
ESP Solina – Myczkowce					
bez zbiornika Jawor	10	413,833	3,240	359,711	1,059

Źródło: opracowanie własne.

7. Elementy optymalizacji

Optymalizacja pracy tak rozbudowanego systemu może być przeprowadzana w układzie hierarchicznym realizacji zadań albo dla kryteriów oceniających pracę całego układu MPWI. Podstawowym kryterium jest bezpieczeństwo (powodziowe/ zaopatrzenia w wodę/ energetyczne) oraz efekt finansowy. Wieloaspektowość problemu sterowania wielozbiornikowymi systemami energetycznymi i pojęcie sterowania optymalnego jest trudno definiowalne [4, 9, 10, 12]. Działania podejmowane na zbiornikach wpływają na stan całego systemu wodno-gospodarczego (MPWI) [1], w związku z tym stosowane kryteria powinny uwzględnić możliwie szeroką wieloaspektowość podejmowanych decyzji, miary o charakterze ekonomicznym, ekologicznym oraz społecznym. W najszerszym rozumieniu zadanie optymalnego sterowania systemem MPWI jest: wielokryterialne, losowe, dynamiczne, wielowymiarowe oraz nieliniowe [4, 9, 10, 12-14].

8. Podsumowanie

W artykule zaprezentowano wyniki symulacji opracowanego modelu ESP Solina oraz ESP Jawor. Model został zaprojektowany i wykonany w interfejsie Matlab – Simulink. Zastosowano modułowe podejście pozwalające w sposób czytelny wyróżnić charakterystyczne elementy modelu. Symulacje działania modelu przeprowadzono dla okresu 365 dni. Uwzględniono wszystkie ograniczenia związane z fizycznymi parametrami i ograniczeniami obiektów kaskady, jak również te wynikające z zapisów obowiązującej instrukcji gospodarowania wodą na kaskadzie Solina – Myczkowce. Model jest elastyczną propozycją, za pomocą której można rozwijać i testować mechanizmy podejmowania decyzji w energetycznym obszarze funkcjonowania kaskady z dodatkowymi elementami rozbudowy nowego projektowanego obiektu.

Analiza wyników symulacji pokazuje, że przy tak małych parametrach obiektu Jawor praktycznie niezauważalny jest wpływ na reżim pracy Solina – Myczkowce. Objętość zbiornika Jawor stanowi 0,73% do 1,45% części objętości roboczej Soliny. Wpływ jest zauważalny przy ślizganiu się po ograniczeniach, czyli w przypadkach nadmiaru lub deficytu wody (pełny/pusty zbiornik Solina), jednak, zgodnie z obowiązującą regułą sterowania kaskadą, są to przypadki sterowania dla sytuacji nadzwyczajnych, takich jak powódź i susza, które nie były przedmiotem analizy.

W zaleceniach dotyczących analizy tak rozbudowanego systemu powinno się uwzględnić następujące działania:

- optymalizację cykli ładowania i rozładowywania w celu maksymalnego wykorzystania energii;
- dostosowanie sterowania do prognozy pogody, popytu na energię, a także ceny energii na rynku;
- zapewnienie stabilności systemu w kontekście częstych zmian obciążenia;
- dostosowanie strategii sterowania w ujęciu środowiskowym, np. poprzez minimalizację wahań poziomu wód, ograniczenia wielkości odprowadzanych wód z kaskady, ochronę fauny i flory;
- integrację z systemami magazynowania energii, monitorowania czy algorytmami sztucznej inteligencji;
- bezpieczeństwo operacyjne, stabilność i niezawodność systemu ESP.

Literatura

1. Naughton M., DeSantis N., Martoussevitch A., *Managing multi-purpose water infrastructure: A review of international experience*, OECD Environment Working Papers, 115, OECD Publishing, Paris 2017.
2. Kaczmarek Z., *Rozważania w sprawie ryzyka i niepewności*, [w:] Maciejewski M. (red.), *Ryzyko w gospodarce wodnej*, Oficyna Wydawnicza Politechniki Warszawskiej, Warszawa 2000, Monografie Komitetu Gospodarki Wodnej PAN.
3. Twaróg B., *Elementy ryzyka i zarządzania bezpieczeństwem obiektów przeciwpowodziowych*, Czasopismo Techniczne. Środowisko, z. 3-Ś, 2008, s. 143-159.
4. Twaróg B., *Multicriterion methods for evaluation of decision support algorithms in flood conditions with risk consideration*, Czasopismo Techniczne. Środowisko, z. 1-Ś, 2009.
5. *Instrukcja gospodarowania wodą w warunkach normalnych i powodziowych Zespołu Elektrowni Wodnych Solina – Myczkowce – aktualizacja*, Politechnika Rzeszowska, Rzeszów 2001.
6. Dziewański J. (red. nauk.), *Elektrownia Wodna Solina im. Karola Pomianowskiego na Sanie*, Wydawnictwo IGSMiE PAN, Kraków 2002.
7. Słota H. (red.), *Ocena oddziaływania na środowisko obiektów Solina i Myczkowce*, Politechnika Krakowska, Kraków 2000.
8. Kaczmarek Z., *Programowanie gospodarki zbiornikowej*, Politechnika Warszawska, Katedra Hydrauliki i Hydrologii, Warszawa 1960.
9. Malinowski K., *Sterowanie w systemach wodnych*, Monografie Komitetu Gospodarki Wodnej PAN, 1995.
10. Twaróg B., *Modeling of the Solina – Myczkowce pumped storage power plant*, Technical Transactions (Czasopismo Techniczne), 120(1), 2023.
11. Twaróg B., *Modelowanie elektrowni szczytowo-pompowej Solina – Myczkowce*, Czasopismo Techniczne, 120(1), 2023.
12. Słota H., *Sterowanie wielozbiornikowymi systemami wodnogospodarczymi*, Instytut Meteorologii i Gospodarki Wodnej, Warszawa, 1983.
13. Xu B., Chen D., Venkateshkumar M., Xiao Y., Yue Y., Xing Y., Li P., *Modeling a pumped storage hydropower integrated to a hybrid power system with solar-wind power and its stability analysis*, Applied Energy, 248(3), 2019, s. 446-462.
14. Padiyar K.R., *Power system dynamics. Stability and control*, BS Publications, Adithya Art Printers, Hyderabad 2008.

Wpływ projektowanej elektrowni szczytowo-pompowej Solina – Jawor na reżim pracy elektrowni Solina – Myczkowce

Streszczenie

W artykule zaprezentowano model elektrowni szczytowo-pompowej Solina – Myczkowce rozbudowany o projektowany nowy zbiornik i elektrownię Jawor. Rozważono różne przypadki projektowe wielkości zbiornika lokalizowanego na górze Jawor. W budowaniu modelu zastosowano modułowe podejście pozwalające w sposób czytelny wyróżnić charakterystyczne elementy modelu. W celu uchwycenia zmian sezonowych, zarówno w warunkach hydrologicznych, jak i w wartościach zapotrzebowania mocy, do symulacji przyjęto okres 365 dni. W symulacjach założono postać kryteriów definiujących momenty włączeń/wyłączeń oraz definiowania reżimu pracy turbin/pompoturbin z wykorzystaniem dobowej zmienności cen energii. Uwzględniono wszystkie ograniczenia wynikające z fizycznych parametrów i ograniczeń obiektów kaskady, jak również wynikające z zapisów obowiązującej instrukcji gospodarowania wodą na kaskadzie Solina – Myczkowce. Model został zaprojektowany i wykonany w interfejsie Matlab – Simulink. Opracowany model, przy założeniu różnych rozwiązań dodatkowej elektrowni szczytowo-pompowej Jawor – Solina, pozwala na wielowariantową analizę efektów, zarówno w sferze produkcji energii elektrycznej jak i finansowej. Elastyczna konstrukcja modelu jest propozycją, za pomocą której można rozwijać i testować mechanizmy podejmowania decyzji w energetycznym i finansowym obszarze funkcjonowania kaskady. Rozszerzenie kaskady energetycznej o nowy element elektrowni szczytowo-pompowej wpływa na funkcjonowanie w obecnej postaci ESP Solina – Myczkowce. Wyniki pokazują kierunki zmian, jakie należałoby wprowadzić w strategii pracy tak rozbudowanego energetycznego kompleksu. Analizy poparto wieloma wykresami oraz komentarzem.

Słowa kluczowe: elektrownia Jawor, elektrownia Solina – Myczkowce, elektrownie szczytowo-pompowe, optymalizacja, kryteria sterowania, wielozadaniowe systemy wodnogospodarcze

Influence of the designed Solina – Jawor pumped storage power plant on the operating regime of the Solina – Myczkowce power plant

Abstract

The article presents an extended model of the Solina – Myczkowce pumped storage power plant with the designed new reservoir and Jawor power plant. Different design cases for the size of the reservoir located on Mt. Jawor were considered. In building the model, a modular approach was used to clearly distinguish characteristic elements of the model. In order to capture seasonal changes in both hydrological conditions and power demand values, a period of 365 days was assumed for the simulations. The simulations assumed the form of criteria defining on/off moments and defining the turbine/pump turbine operating regime using the daily variation of energy prices. All constraints arising from the physical parameters and limitations of the cascade facilities as well as those arising from the provisions of the current Water Management Manual for the Solina – Myczkowce cascade were taken into account. The model was designed and executed in Matlab – Simulink interface. The developed model, assuming various solutions of the additional Jawor – Solina pumped storage power plant, allows multivariate analysis of the effects, both in the sphere of electricity production and financial. The flexible design of the model is a proposal with the help of which it is possible to develop and test decision-making mechanisms in the energy and financial area of cascade operation. Expansion of the energy cascade with a new element of the pumped storage power plant affects the functioning in its current form of ESP Solina – Myczkowce. The results show the directions of changes that should be made in the operating strategy of such an expanded energy complex. The analyses are supported by a number of charts and commentary.

Keywords: Jawor power plant, Solina – Myczkowce power plant pumped storage power plants, optimization, control criteria, multi-purpose water infrastructure