XV Polska Konferencja Hydroenergetyczna
HYDROFORUM 2026
Augustów, Hotel „Warszawa" / EW Kruonis (Litwa), 21-23 października 2026

# MODUŁOWE SYSTEMY JAZOWE JAKO ELEMENT INTEGRACJI NISKOSPADOWYCH MAŁYCH ELEKTROWNI WODNYCH

Od projektu POIR.01.02.00-00-0251/16 do wdrożeń z turbiną Kaplana i turbiną Archimedesa

**Andrzej Polniak**
AQUA-Tech Sp. z o.o., Trzebinia
e-mail: andrzej@aqua-tech.info.pl

**Projekt POIR.01.02.00-00-0251/16**
„Opracowanie technologii niskospadowej modułowej elektrowni wodnej o wysokiej efektywności energetycznej i minimalnej ingerencji w środowisko"

## Streszczenie

Artykuł przedstawia rozwój technologii modułowych małych elektrowni wodnych i ruchomych modułów jazowych na tle rezultatów projektu POIR.01.02.00-00-0251/16. Główną tezą opracowania jest traktowanie urządzenia piętrzącego jako aktywnego elementu układu sterowania stopniem wodnym, współpracującego z hydrozespołem, automatyką, urządzeniami środowiskowymi i układem elektroenergetycznym. W pierwszej części omówiono przesłanki techniczne modułowości oraz wyniki prac nad niskospadowym hydrozespołem Kaplana i generatorem synchronicznym PMSG. Następnie przedstawiono dwa kierunki wdrożeniowe: MEW Papiernia w Żaganiu, gdzie rozwiązania projektu zweryfikowano z turbiną Kaplana, oraz MEW Czechy na rzece Szreniawie, dla której rozwijana jest konfiguracja z jazem powłokowym i turbiną Archimedesa. Porównanie obu przypadków pokazuje, że wspólnym rdzeniem technologicznym może być moduł jazowy wraz z pomiarem poziomów, algorytmem regulacji oraz układem bezpieczeństwa, podczas gdy moduł energetyczny może być dobierany zależnie od spadu, przepływu, geometrii stopnia i uwarunkowań środowiskowych. Omówiono również rolę retencji korytowej, przepławki, sterowania podczas wezbrań oraz możliwości dalszej standaryzacji rozwiązań dla modernizacji istniejących piętrzeń.

**Słowa kluczowe:** mała elektrownia wodna, MEW, jaz powłokowy, modułowy stopień wodny, turbina Kaplana, turbina Archimedesa, PMSG, automatyka, retencja korytowa, POIR.

## 1. Wprowadzenie

Rozwój małej energetyki wodnej w Polsce jest w znacznym stopniu związany z możliwością ponownego wykorzystania istniejącej infrastruktury: dawnych stopni młyńskich, jazów, progów, ujęć oraz budowli regulacyjnych. W takich lokalizacjach potencjał energetyczny rzeki jest już częściowo ukształtowany przez istniejące piętrzenie, natomiast zasadniczym wyzwaniem pozostaje dostosowanie obiektu do współczesnych wymagań bezpieczeństwa, ochrony środowiska, automatyzacji i ekonomiki inwestycji.

W obiektach o małym spadzie koszt części budowlanej, urządzeń piętrzących i infrastruktury pomocniczej ma szczególnie duży udział w całkowitych nakładach inwestycyjnych. Dlatego rozwój technologii nie może ograniczać się do poprawy sprawności samej turbiny, konieczne jest więc podejście systemowe, w którym konstrukcja, hydraulika, generator, energoelektronika, automatyka, przepławka oraz urządzenia upustowe są projektowane jako współpracujące moduły.

Projekt POIR.01.02.00-00-0251/16 był ukierunkowany na opracowanie technologii niskospadowej modułowej elektrowni wodnej o wysokiej efektywności energetycznej i minimalnej ingerencji w środowisko. W ramach prac rozwijano rozwiązania turbinowe, generatorowe, konstrukcyjne i sterujące. Doświadczenia uzyskane w trakcie projektu pozwalają dziś rozszerzyć pierwotną ideę „modułowej elektrowni" do pojęcia „modułowego stopnia wodnego", w którym szczególną rolę odgrywa aktywnie sterowany moduł jazowy.

Celem niniejszego artykułu jest przedstawienie tej koncepcji w ujęciu praktycznym, na przykładzie dwóch różnych modułów energetycznych. Pierwszym jest turbina Kaplana zastosowana w MEW Papiernia w Żaganiu jako demonstrator rozwiązań projektu POIR. Drugim jest turbina Archimedesa przewidziana w aktualnej koncepcji MEW Czechy na rzece Szreniawie. Zestawienie tych przypadków pokazuje, które elementy systemu można standaryzować niezależnie od rodzaju maszyny wodnej, a które wymagają indywidualizacji dla konkretnej lokalizacji.

## 2. Projekt POIR.01.02.00-00-0251/16 jako baza technologiczna

Projekt „Opracowanie technologii niskospadowej modułowej elektrowni wodnej o wysokiej efektywności energetycznej i minimalnej ingerencji w środowisko" realizowano w ramach Programu Operacyjnego Inteligentny Rozwój. Z punktu widzenia wdrożeniowego istotne było połączenie prac badawczych nad niskospadową maszyną wodną z rozwojem pozostałych elementów układu elektrowni takich jak generator synchroniczny oraz energetyczny układ wyspowy.

W ramach prac wykonano model turbiny Kaplana o średnicy wirnika 265 mm przeznaczony do badań laboratoryjnych. Kolejnym etapem było opracowanie prototypowego hydrozespołu o średnicy wirnika 700 mm i mocy rzędu 37-45 kVA dla spadu około 2,5 m, który został zainstalowany w MEW Papiernia w Żaganiu. Równolegle rozwijano technologię budowy generatora synchronicznego z magnesami trwałymi. Generator AQUAGen45, opracowany na potrzeby projektu, ma moc nominalną 45 kVA przy prędkości 430 obr./min. Generator ten może pracować przy minimalnym obciążeniu rzędu 30 % mocy, tj. ok. 10-12 kVA oraz może być przeciążony do 130 % mocy nominalnej tj. do 60 kVA. Procedura badawcza wykazała sprawność generatora na poziomie 96% w punkcie obciążenia nominalnego oraz wysoką sprawność przy obciążeniu częściowym występującą w zakresie 86-96 %.

Znaczenie tych wyników wykracza poza parametry pojedynczych urządzeń. W małej elektrowni wodnej ważne jest dopasowanie chwilowej charakterystyki turbiny, generatora i przekształtnika do zmiennego przepływu oraz utrzymanie odpowiedniego spadu. Jeżeli urządzenie piętrzące jest sterowalne, może ono aktywnie uczestniczyć w utrzymaniu warunków pracy hydrozespołu. Otwiera to drogę do zintegrowanej regulacji stopnia wodnego, w której jaz staje się jednym z elementów wykonawczych systemu automatyki.

| Obszar prac | Przykładowy rezultat | Znaczenie dla modułowej MEW |
|---|---|---|
| Hydraulika | Model i prototyp turbiny Kaplana | Dobór modułu energetycznego do niskiego spadu |
| Generator | PMSG AQUAGen45, 45 kVA | Wysoka sprawność i możliwość współpracy z energoelektroniką |
| Konstrukcja | Prefabrykowane/modułowe elementy obiektu | Skrócenie robót i powtarzalność rozwiązań |
| Sterowanie | Integracja pomiarów i urządzeń wykonawczych | Koordynacja pracy turbiny i urządzenia piętrzącego |
| Środowisko | Ograniczenie ingerencji i integracja przepławki | Uwzględnienie ciągłości ekologicznej już na etapie architektury |

**Tabela 1. Elementy technologii rozwijanej w projekcie POIR i ich znaczenie dla podejścia modułowego.**

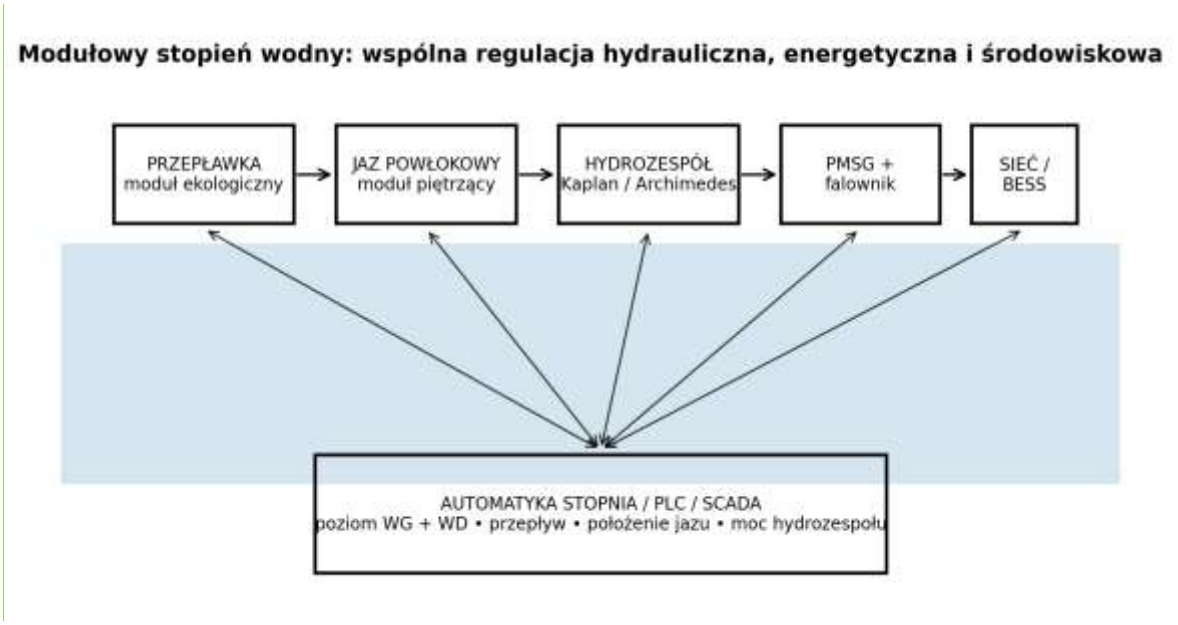
## 3. Od modułowej elektrowni do modułowego stopnia wodnego

Modułowość może być rozumiana dwojako. W znaczeniu konstrukcyjnym oznacza prefabrykację i powtarzalność elementów, które można przygotować poza placem budowy, a następnie zamontować w lokalizacji inwestycji. W znaczeniu funkcjonalnym oznacza natomiast podział całego stopnia na współpracujące bloki: piętrzący, energetyczny,

ekologiczny, pomiarowo-sterujący i elektroenergetyczny. To drugie rozumienie ma szczególne znaczenie w przypadku rewitalizacji istniejących stopni wodnych.

W proponowanej architekturze moduł piętrzący nie jest jedynie bierną przegrodą. Jaz powłokowy może zmieniać efektywną wysokość progu i dzięki temu uczestniczyć w regulacji poziomu wody górnej. Moduł energetyczny może być wyposażony w turbinę Kaplana, śrubę Archimedesa albo inną maszynę dobraną do parametrów lokalizacji. Moduł ekologiczny obejmuje przepławkę i zapewnienie przepływu środowiskowego. Wszystkie elementy łączy system pomiarowy oraz sterownik PLC/SCADA.

Takie podejście pozwala zachować wspólną logikę obiektu przy zmianie rodzaju turbiny. W konsekwencji część dokumentacji automatyki, pomiarów, zabezpieczeń, szaf sterowniczych, telemetrii i procedur eksploatacyjnych może być standaryzowana, natomiast indywidualizacji podlegają przede wszystkim geometria części przepływowej, fundamentowanie i dobór maszyny wodnej.




**Rys. 1. Architektura funkcjonalna modułowego stopnia wodnego – wspólna regulacja hydrauliczna, energetyczna i środowiskowa.**

## 4. Moduł jazowy jako aktywny element regulacji

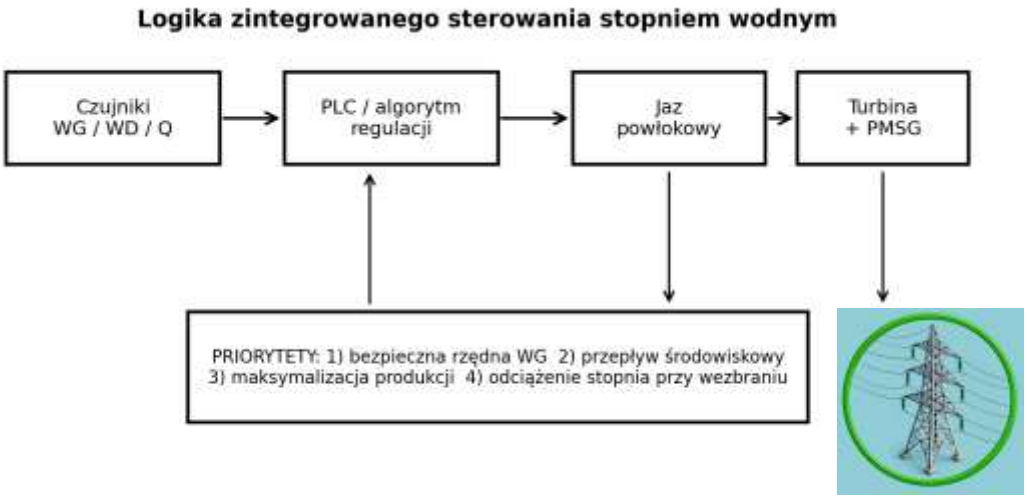
W elektrowniach niskospadowych nawet niewielka zmiana rzędnej wody górnej stanowi znaczący udział całkowitego spadu. Utrata kilkunastu lub kilkudziesięciu centymetrów może wyraźnie obniżyć moc osiągalną przez hydrozespół. Z tego powodu urządzenie piętrzące powinno być traktowane jako integralna część układu energetycznego, a nie wyłącznie jako element budowlany stopnia.

Elastyczne zamknięcie powłokowe może być napełniane i opróżniane w sposób kontrolowany, co pozwala zmieniać wysokość piętrzenia w granicach wynikających z pozwolenia wodnoprawnego i warunków bezpieczeństwa. W normalnej pracy podstawowym zadaniem modułu jazowego jest stabilizacja poziomu wody górnej. Po osiągnięciu maksymalnego przełyku hydrozespołu nadmiar przepływu może być przejmowany przez część jazową. Przy dalszym wzroście przepływu stopień otwarcia jazu zwiększa się, ograniczając wzrost poziomu wody górnej.

Sterowanie powinno mieć hierarchię priorytetów. Pierwszym jest bezpieczeństwo hydrotechniczne i dotrzymanie dopuszczalnych rzędnych. Drugim – zapewnienie przepływu środowiskowego i warunków działania przepławki. Dopiero w trzeciej kolejności realizowana jest maksymalizacja produkcji energii. Taka kolejność jest ważna zarówno z punktu widzenia prawa wodnego, jak i niezawodnej eksploatacji.

| Stan obiektu | Działanie hydrozespołu | Działanie jazu | Priorytet |
|---|---|---|---|
| Przepływ niski | Praca przy dostępnej wodzie | Utrzymanie zadanej rzędnej | Środowisko + stabilizacja poziomu |
| Przepływ normalny | Optymalizacja punktu pracy | Korekta wysokości piętrzenia | Produkcja energii przy zachowaniu rzędnej |
| Przepływ > przełyk turbiny | Maksymalny dopuszczalny przełyk | Przejęcie przepływu nadmiarowego | Bezpieczna gospodarka wodna |
| Wezbranie | Ograniczenie lub odstawienie | Stopniowe / pełne obniżenie | Bezpieczeństwo stopnia |
| Awaria turbiny | Odstawienie | Przejęcie przepływu przez jaz | Utrzymanie bezpieczeństwa i przepływu |

**Tabela 2. Przykładowa logika współpracy hydrozespołu z modułem jazowym.**



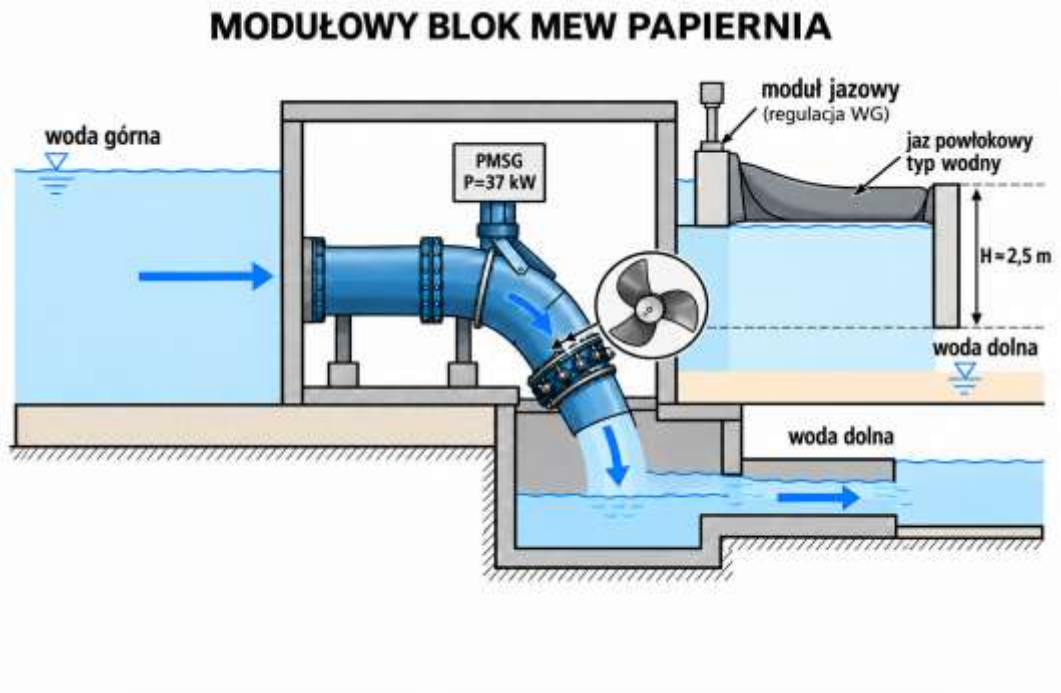

**Rys. 2. Schemat logiki zintegrowanego sterowania stopniem wodnym.**

## 5. MEW Papiernia – wdrożenie z turbiną Kaplana

MEW Papiernia w Żaganiu jest kluczowym przykładem przejścia od prac badawczo-rozwojowych do demonstracji technologii w rzeczywistym obiekcie. Wdrożony prototyp hydrozespołu Kaplana ma średnicę wirnika 700 mm, moc około 45 kW i jest przeznaczony do pracy przy spadzie H= 2,5 m. Parametry te odpowiadają typowym warunkom małych stopni, gdzie mały spad kompensowany jest stosunkowo dużym przepływem.

Pozioma turbina Kaplana jest rozwiązaniem korzystnym tam, gdzie ważna jest wysoka sprawność w szerokim zakresie przepływów. Regulacja łopat lub elementów kierowniczych pozwala dostosować pracę turbiny do zmiennego obciążenia hydraulicznego. W podejściu modułowym istotne jest jednak, aby regulacja turbiny nie była prowadzona w izolacji od obiektu piętrzącego. Zmiana przełyku hydrozespołu wpływa na poziomy wody, a odpowiedź jazu wpływa z kolei na dostępny spad.

Demonstrator MEW Papiernia pokazał także znaczenie modułowej organizacji części budowlanej. W przypadku małych mocy skrócenie czasu robót i ograniczenie liczby indywidualnych elementów wykonywanych na miejscu może mieć istotny wpływ na ekonomikę całej inwestycji. W przyszłych wdrożeniach doświadczenia te można wykorzystać do tworzenia zestawów powtarzalnych rozwiązań fundamentowych, komór turbinowych i układów sterowania.




**Rys. 3. MEW Papiernia – funkcjonalna integracja niskospadowego hydrozespołu Kaplana z modułem regulacji piętrzenia.**




**Fot. 1. Obiekt MEW Papiernia**

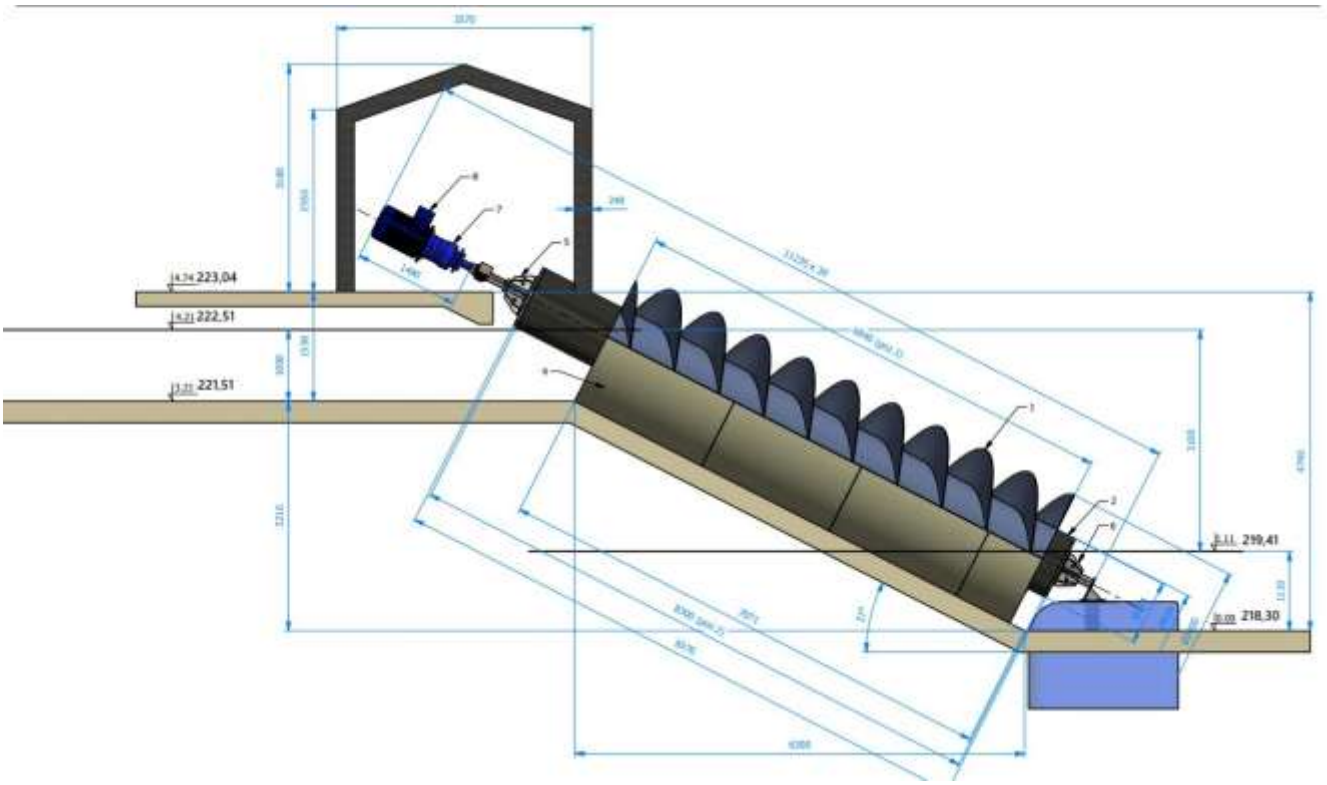
## 6. MEW Czechy – rozwinięcie koncepcji z turbiną Archimedesa

MEW Czechy rzeka Szreniawa w km 43+960 znajduje się obecnie w budowie, w lokalizacji m. Czechy, gmina Słomniki k/Krakowa. W ramach prac optymalizujących na podstawie wykonanej dokumentacji budowlanej, zespół projektowy AQUA-OZE wykonał modyfikację części technologicznej dla parametrów spadu wynoszącego 3,10 m oraz przełyku dyspozycyjnego 0,6 do 1,8 $m^3/s$. Układ ten różni się od MEW Papiernia rodzajem maszyny wodnej, ale zachowuje zasadniczą logikę zabudowy modułowej.

Moduł energetyczny zostanie wyposażony w turbinę Archimedesa o średnicy około 2,0 m, długości około 7,5 m i nachyleniu około 27°. Projekt turbiny został wykonywany przez IMP PAN we współpracy z AQUA-Tech. Moc obiektu przyjęto na poziomie około 30-37 kVA. Przeniesienie napędu będzie realizowane przez przekładnię planetarną współpracującą z generatorem PMSG i falownikiem 3×400 V. Rozwiązanie takie umożliwia dopasowanie prędkości elektrycznej generatora do wolnoobrotowej charakterystyki śruby.

W sąsiedztwie turbiny przewidziano jaz powłokowy o szerokości około 4,75 m. Funkcjonalny układ stopnia można opisać jako: przepławka – jaz – turbina. W projekcie budowlanym przepławka ma około 49 m długości i 21 komór o długości 2,1 m. Jej parametry zostały przyjęte w odniesieniu do warunków hydraulicznych oraz wymagań ichtiologicznych przyjętych na etapie dokumentacji środowiskowej i wodnoprawnej.

Turbina Archimedesa dobrze wpisuje się w ideę adaptacji istniejących stopni. Jej tor przepływu jest prosty, znaczna część urządzenia może być prefabrykowana, a geometria pochyłej rynny pozwala w wielu przypadkach ograniczyć rozbudowę głębokiej komory turbinowej. Z punktu widzenia modułowości ważne jest to, że zmiana maszyny wodnej nie wymaga zmiany całej architektury automatyki i gospodarowania wodą. Zastosowanie turbiny Archimedesa pozwala ograniczyć oddziaływanie hydrozespołu na ryby migrujące z prądem rzeki przede wszystkim dzięki małej prędkości obrotowej, niewielkim zmianom ciśnienia i ograniczeniu naprężeń ścinających. W przeciwieństwie do klasycznych turbin ciśnieniowych, takich jak Kaplan i Francis, ryba nie przechodzi przez zamknięty układ przepływowy o gwałtownych zmianach ciśnienia. Nie eliminuje to całkowicie ryzyka urazów mechanicznych, ale zasadniczo zmienia charakter zagrożenia i może istotnie poprawić warunki migracji ryb.




**Rys. 4. MEW Czechy – turbina Archimedesa D = 2,0 m.**

| Parametr | MEW Czechy – wartość robocza | Uwagi |
|---|---|---|
| Spad H | ok. 3,10 m | różnica przyjętych rzędnych WG/WD |
| Rzędna WG | 222,51 m n.p.m. | założenie projektowe |
| Rzędna WD | 219,41 m n.p.m. | założenie projektowe |
| Turbina | Archimedes D = 2,0 m; L ≈ 7,1 m | nachylenie ok. 27° |
| Moc generatora | ok. 37 kW | PMSG |
| Falownik | max. 50 kW | 3×400 V |
| Jaz powłokowy | B ≈ 4,75 m | moduł piętrzący – jaz powłokowy |
| Przepławka | ok. 49 m; 21 komór × 2,1 m | zgodnie z parametrami projektowymi |

**Tabela 3. Podstawowe parametry robocze koncepcji MEW Czechy (stan prac – 2026).**

**Fot. 2 – stopień wodny Czechy / rzeka Szreniawa**

*Zdjęcie istniejącego stopnia przed realizacją lub wizualizacja układu po modernizacji.*

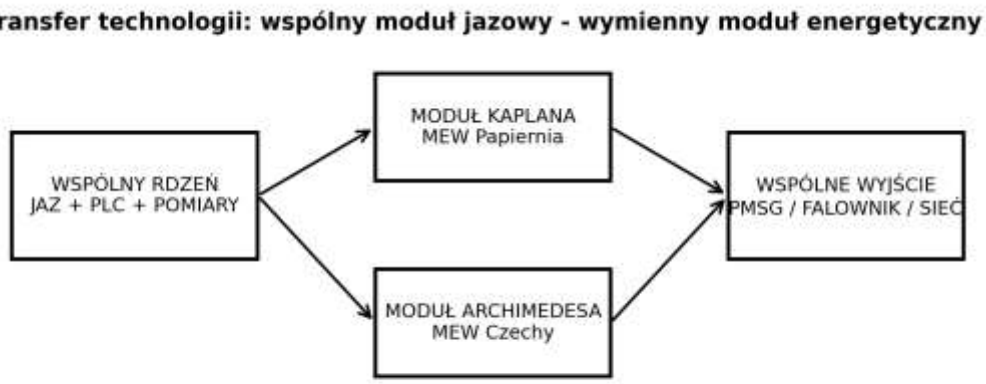
**Fot. 2. MEW Czechy – miejsce na fotografię istniejącego obiektu lub wizualizację docelowego rozwiązania.**

## 7. Kaplan i Archimedes – dwa moduły energetyczne, wspólny rdzeń technologiczny

Porównanie MEW Papiernia i MEW Czechy nie powinno prowadzić do wyboru jednego „lepszego" typu turbiny w oderwaniu od lokalizacji. Obie maszyny odpowiadają innym warunkom hydraulicznym i konstrukcyjnym. Z perspektywy rozwoju platformy technologicznej istotniejsze jest rozdzielenie elementów wspólnych od elementów wymiennych.

| Cecha | MEW Papiernia – Kaplan | MEW Czechy – Archimedes |
|---|---|---|
| Charakter obiektu | Demonstrator technologii POIR | Rozwinięcie i adaptacja koncepcji |
| Spad | ok. 2,5 m | ok. 3,1 m |
| Moc | 45 kW | ok. 37 kW |
| Część robocza | Wirnik Kaplan D 700 mm | Śruba D 2,0 m; L ok. 7,1 m |
| Regulacja maszyny | Klasyczna (podwójna) regulacja hydrozespołu | regulacja przepływem / prędkość + energoelektronika |
| Moduł piętrzący | Jaz powłokowy B=20 m | jaz powłokowy B = 4,75 m |
| Generator / elektronika | PMSG – rozwiązania rozwijane w projekcie + przekształtnik EE | PMSG + przekładnia + przekształtnik EE |
| Elementy wspólne | pomiar WG/WD, PLC/SCADA, zabezpieczenia, logika gospodarowania wodą | pomiar WG/WD, PLC/SCADA, zabezpieczenia, logika gospodarowania wodą |

**Tabela 4. Porównanie dwóch kierunków integracji modułu energetycznego.**




**Rys. 5. Transfer technologii – wspólny moduł jazowy i sterowanie przy wymiennym module energetycznym.**

Rdzeń wspólny obejmuje przede wszystkim moduł jazowy, pomiary poziomu wody górnej i dolnej, sterownik PLC, komunikację, system awaryjny, logikę utrzymania rzędnej, procedurę przejścia w stan wezbraniowy oraz współpracę z przepławką. Wymienny jest natomiast moduł energetyczny: jego część przepływowa, prędkość obrotowa, sposób przeniesienia napędu oraz szczegółowy algorytm optymalizacji punktu pracy.

## 8. Generator PMSG i energoelektronika w niskospadowej MEW

Zastosowanie generatora synchronicznego z magnesami trwałymi jest szczególnie interesujące w małych hydrozespołach pracujących ze zmiennym obciążeniem. Brak konieczności zasilania wzbudzenia ogranicza straty, a współpraca z przekształtnikiem umożliwia oddzielenie prędkości obrotowej maszyny od częstotliwości sieciowej. W praktyce pozwala to prowadzić hydrozespół w szerszym zakresie warunków hydraulicznych.

W projekcie POIR rozwijano typoszereg generatorów AQUAGen o mocy od 45 do 90 kVA. Wyniki prób wskazywały na wysoką sprawność zarówno w pobliżu obciążenia nominalnego, jak i przy częściowym obciążeniu. Jest to istotne dla MEW, ponieważ przepływ rzeczny przez znaczną część roku odbiega od średniego przepływu projektowego.

W MEW Czechy energoelektronika pełni dodatkową funkcję dopasowania charakterystyki wolnoobrotowej turbiny Archimedesa do parametrów sieci. Zintegrowany sterownik wykorzystuje dane o poziomach wody, prędkości turbiny, mocy generatora i położeniu jazu do wyznaczania zadanej prędkości obrotowej. W ten sposób hydraulika stopnia i część elektryczna nie działają niezależnie, lecz tworzą wspólny układ regulacji energii.

## 9. Retencja korytowa, wezbrania i bezpieczeństwo hydrauliczne

Ruchomy jaz może wspierać retencję korytową przez utrzymywanie zadanej rzędnej wody górnej w okresach niskich i średnich przepływów (www.retencja.info.pl). Wielkość uzyskanej objętości retencyjnej jest zależna od geometrii koryta i doliny, dlatego dla każdej lokalizacji wymaga osobnych obliczeń. Nie należy utożsamiać tej funkcji z retencją dużych zbiorników zaporowych; jej znaczenie polega raczej na rozproszeniu retencji na wielu istniejących stopniach i stabilizacji lokalnych stosunków wodnych oraz zatrzymaniu wody w krajobrazie.

Ta sama zdolność regulacji, która pozwala utrzymywać poziom w okresach niżówkowych, może być wykorzystana odwrotnie podczas wezbrania. Opróżnienie powłoki zmniejsza wysokość czynnego progu i zwiększa przepustowość części jazowej. Warunkiem jest właściwe zaprojektowanie hydrauliczne całego stopnia oraz określenie scenariuszy awaryjnych na wypadek zaniku zasilania, awarii sterownika lub uszkodzenia hydrozespołu.

W algorytmie pracy należy przewidzieć tryb normalny, tryb wysokich przepływów, tryb awarii turbiny, tryb serwisowy i – jeżeli wymaga tego eksploatacja – tryb płukania rumowiska. Sygnały krytyczne powinny mieć redundancję, a położenie bezpieczne zamknięcia powinno być zdefiniowane na etapie projektu. Dla powłokowego modułu jazowego naturalnym stanem przy bardzo dużym przepływie może być stan obniżony, jednak szczegółowa logika musi wynikać z analizy zagrożeń konkretnego stopnia.




**Fot.3. Autonomiczny jaz powłokowy Kamienna Góra rz. Zadrna**

## 10. Ciągłość ekologiczna i integracja przepławki

Minimalizacja ingerencji w środowisko nie może być utożsamiana wyłącznie z ograniczeniem kubatury betonu lub czasu robót. Dla stopni wodnych jednym z podstawowych zagadnień jest zachowanie ciągłości ekologicznej cieku. Dlatego przepławka powinna być traktowana jako równorzędny moduł układu już na etapie tworzenia koncepcji hydraulicznej.

W MEW Czechy przyjęto układ, w którym przepławka, jaz i turbina funkcjonują równolegle. Sterowanie stopniem powinno uwzględniać minimalny przepływ przez przepławkę oraz zakres różnic poziomów, dla których zachowuje ona projektowe warunki hydrauliczne. Oznacza to, że algorytm utrzymania wody górnej nie może być optymalizowany wyłącznie pod kątem uzysku energetycznego.

Z punktu widzenia projektowania modułowego korzystne jest opracowanie standardowego zestawu pomiarów: poziom na wejściu i wyjściu przepławki, poziomy WG/WD, sygnał otwarcia jazu, stan hydrozespołu oraz – w uzasadnionych przypadkach – monitoring wizyjny. Taki zestaw umożliwia dokumentowanie warunków eksploatacyjnych i tworzenie danych do dalszego doskonalenia algorytmów sterowania.

## 11. Standaryzacja, prefabrykacja i możliwości skalowania

W małych elektrowniach wodnych największą korzyść z modułowości można uzyskać wtedy, gdy standaryzacja obejmuje zestaw powtarzalnych interfejsów. Moduł jazowy powinien mieć zdefiniowane przyłącza hydrauliczne i sterujące; moduł energetyczny – zakres sygnałów i mocy, a automatyka – jednolity sposób komunikacji. Dzięki temu urządzenia o różnej konstrukcji mogą być integrowane bez projektowania całego systemu od początku.

Prefabrykacja może dotyczyć komór, ram montażowych, elementów prowadzących, rynien, szaf sterowniczych oraz kompletnych zespołów napędowych. W warunkach istniejących stopni zawsze pozostanie część indywidualna: geotechnika, dopasowanie do konstrukcji istniejącej, przeprowadzenie wód budowlanych i uwarunkowania środowiskowe. Celem modułowości nie jest wyeliminowanie projektowania, ale ograniczenie liczby elementów tworzonych od zera.

Kolejnym kierunkiem rozwoju jest integracja MEW z lokalnymi systemami zarządzania energią. Generator PMSG i falownik ułatwiają współpracę z magazynem energii lub instalacją fotowoltaiczną, jednak w pierwszej kolejności należy zapewnić bezpieczną i niezawodną pracę hydrauliczną stopnia. Rozbudowa o BESS lub system hybrydowy powinna być traktowana jako kolejna warstwa platformy technologicznej, a nie jako warunek funkcjonowania samej MEW.

## 12. Wnioski

**1.** Projekt POIR.01.02.00-00-0251/16 stworzył bazę do rozwoju niskospadowych modułowych MEW, łącząc badania hydrauliczne z rozwojem generatora i elementów konstrukcyjnych.

**2.** MEW Papiernia w Żaganiu stanowi praktyczny przykład wdrożenia modułu energetycznego z turbiną Kaplana o średnicy wirnika około 700 mm i mocy około 37 kW przy spadzie około 2,5 m.

**3.** MEW Czechy rozwija tę samą filozofię w konfiguracji z turbiną Archimedesa o średnicy około 2,0 m, spadzie około 3,10 m i mocy generatora około 37 kW, współpracującą z jazem powłokowym o szerokości około 4,75 m.

**4.** Wspólnym rdzeniem obu konfiguracji może być aktywny moduł jazowy, pomiary poziomów, sterownik PLC/SCADA, logika bezpieczeństwa oraz integracja z modułem ekologicznym.

**5.** Modułowość należy rozumieć jako standaryzację funkcji i interfejsów, a nie wyłącznie prefabrykację. Pozwala to wymieniać moduł energetyczny bez zmiany podstawowej architektury całego stopnia.

**6.** Najważniejszym kierunkiem dalszego rozwoju jest pełna integracja gospodarki wodnej, energetyki i ochrony środowiska w jednym algorytmie sterowania, z nadrzędnym priorytetem bezpieczeństwa hydrotechnicznego i zachowania wymaganych przepływów środowiskowych.

## Informacja o finansowaniu

Prace badawczo-rozwojowe stanowiące bazę technologii opisanej w artykule realizowano w ramach projektu nr POIR.01.02.00-00-0251/16 „Opracowanie technologii niskospadowej modułowej elektrowni wodnej o wysokiej efektywności energetycznej i minimalnej ingerencji w środowisko”, współfinansowanego w ramach Programu Operacyjnego Inteligentny Rozwój 2014–2020.