

Adam ADAMKOWSKI, Zbigniew KRZEMIANOWSKI

INSTYTUT MASZYN PRZEPŁYWOWYCH IM. PROF. R. SZEWAŁSKIEGO POLSKIEJ AKADEMII NAUK
80-231 Gdańsk, ul. Fiszerka 14

Modyfikacje procedur obliczeniowych w metodach uderzenia hydraulicznego i młynków hydrometrycznych wykorzystywanych do pomiaru natężenia przepływu w elektrowniach wodnych

Dr hab. inż. Adam ADAMKOWSKI

Od 1979 roku pracuje w Instytucie Maszyn Przepływowych PAN (IMP PAN) w Gdańsku, w który w 1989 roku uzyskał stopień doktora n.t. w dziedzinie: mechanika, specjalność hydromechanika. W 2005 roku uzyskał tytuł doktora habilitowanego n.t. w dziedzinie budowa i eksploatacja maszyn. Główne kierunki działalności naukowej: badania doświadczalne i teoretyczne natężenia przepływu niestabilnych w przewodach zamkniętych, zagadnienia budowy i eksploatacji maszyn oraz urządzeń hydraulicznych.



e-mail: aadam@imp.gda.pl

Dr inż. Zbigniew KRZEMIANOWSKI

Ukończył studia na Wydziale Mechanicznym Politechniki Gdańskiej w specjalności: turbiny gazowe, parowe i wodne, uzyskując tytuł magistra inżyniera w 1998 roku. W tym samym roku rozpoczął Studia Doktoranckie na Wydziale Mechanicznym PG, które ukończył w 2003 roku uzyskując tytuł doktora n.t. w dziedzinie: budowa i eksploatacja maszyn. Główne zainteresowania zawodowe to: projektowanie układów przepływowych turbin wodnych, analiza numeryczna CFD maszyn i urządzeń wodnych, pomiary natężenia przepływu.



e-mail: krzemian@imp.gda.pl

Streszczenie

Metody uderzenia hydraulicznego i młynków hydrometrycznych są najczęściej używane do pomiaru natężenia przepływu podczas badań energetycznych turbin wodnych. Liczne doświadczenia w stosowaniu ww. metod pomiaru były przesłanką do wprowadzenia nowych elementów, które udoskonalają sposoby całkowania zmierzonych wielkości w procedurach obliczania natężenia przepływu. Modyfikacje te mają na celu poprawę dokładności pomiaru natężenia przepływu rozważanymi metodami.

Słowa kluczowe: pomiar natężenia przepływu, metoda uderzenia hydraulicznego, metoda Gibsona, metoda młynków hydrometrycznych, badania turbin wodnych.

Modifications of the flow rate calculation procedures in the application of the pressure-time method and the current meters method in hydropower plants

Abstract

The hydraulic current meters method and pressure-time method are most commonly used in measuring of the hydraulic turbines. Gained experience in application both mentioned methods in flow rate measurements was basis for the introduction into them new elements that are supposed to improve the accuracy of integration of the measured values. For the pressure-time method, in comparison to the IEC 60041 standard, the calculation procedure has been changed by introducing modifications that concern: (1) the procedure for calculating the hydraulic losses, and (2) determining the upper limit of integration. For current meter method, the calculation procedure has also been changed by introducing modifications that concern: (1) the boundary layer calculated by means of von Karman formula in which some parameters have been introduced instead of the recommended by the ISO 3354 standard, and (2) the way of integrating of the measured velocity field in which NURBS have been applied that allow to avoid some improper shapes of the interpolated profiles. New procedure is compared with other procedures – (1) compatible with ISO 3354, and (2) based on the natural cubic splines. Assessment of the two modified methods was based on the results of the simultaneous flow rate measurement in Polish hydropower plant equipped with Kaplan turbines with penstocks (Fig. 5). The comparison of the results confirmed the validity of new elements introduced to the procedures (Fig. 6).

Keywords: discharge measurement, the pressure-time method, the current meter method, hydraulic turbines measurement.

1. Wstęp

Artykuł prezentuje modyfikacje dwóch podstawowych metod pomiaru natężenia przepływu: 1) metody uderzenia hydraulicznego (zwanej także metodą wzrostu ciśnienia w czasie lub metodą Gibsona) oraz 2) metody młynków hydrometrycznych. Dla obydwu tych metod zmiany wprowadzono w celu poprawienia

dokładności wyników pomiaru. Potrzeba wprowadzenia zmian wynika z faktu, iż odpowiednie normy międzynarodowe pozostają niezmienione od wielu lat, co prowadzi do wniosku, że nie nadążają za obecnym rozwojem naukowo-technicznym.

Rozpatrywane metody są najczęściej używanymi metodami w badaniach turbin wodnych do pomiaru natężenia przepływu. Zastosowanie tych metod wymaga wysoce wykwalifikowanego i doświadczonego zespołu pomiarowego, nowoczesnego sprzętu pomiarowego oraz oprogramowania, przygotowanego i przetestowanego w różnych warunkach eksploatacyjnych elektrowni wodnych. Instytut Maszyn Przepływowych PAN w Gdańsku zebrął duże doświadczenie w znacznej liczbie przeprowadzonych badań różnej wielkości turbin wodnych i pompoturbin. Posiada własne oprogramowanie do obliczania natężenia przepływu w oparciu o zmierzone wielkości fizyczne. Zdobyte doświadczenia w stosowaniu obydwu metod były podstawą do wprowadzenia do nich nowych elementów, których celem było poprawienie dokładności obliczania natężenia przepływu i co za tym idzie, jakości pomiarów, poprzez redukcję niepewności pomiaru.

W metodzie uderzenia hydraulicznego procedura obliczeniowa wykorzystuje zmierzoną różnicę ciśnień pomiędzy dwoma przekrojami pomiarowymi rurociągu ciśnieniowego podczas odcinania przepływu. W porównaniu do procedury opisanej przez normę IEC 41 proponowana procedura została zmieniona poprzez wprowadzenie dwóch istotnych modyfikacji, które dotyczą: 1) sposobu obliczania strat hydraulicznych w przepływie oraz 2) określania górnej granicy całkowania przebiegu zmierzonej różnicy ciśnień. Nowa procedura obliczeniowa została z powodzeniem zastosowana w pomiarach natężenia przepływu przez turbiny wodne i pompoturbin w Polsce i za granicą.

Z kolei, dla metody młynków hydrometrycznych, w porównaniu do zaleceń normy ISO 3354, procedura obliczeniowa została zmieniona poprzez wprowadzenie dwóch modyfikacji, które dotyczą: 1) sposobu obliczania rozkładu prędkości w warstwie przyściennej według prawa von Karmana oraz 2) sposobu całkowania zmierzonego pola prędkości, w którym zastosowano splajny typu NURBS, pozwalające na uniknięcie niewłaściwych kształtów interpolowanych profili prędkości, jakie mogą pojawiać się w obszarach sklepania warstwy przyściennej z głównym przepływem. Nowa procedura została porównana z następującymi procedurami: 1) rekomendowaną w ww. normie oraz 2) opartą na splajnach naturalnych trzeciego stopnia. Na tej podstawie została przeprowadzona odpowiednia analiza otrzymanych rezultatów.

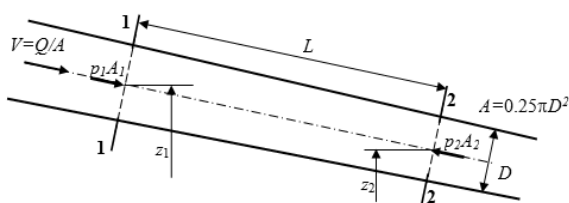
Oprócz analizy teoretycznej, ocena uzyskanych rezultatów została również dokonana w oparciu o wyniki jednoczesnych pomiarów przepływu obydwoma rozpatrywanymi metodami w jednej z polskich elektrowni wodnych, wyposażonej w turbiny Kaplana zasilanych rurociągami derywacyjnymi.

Porównanie uzyskanych rezultatów potwierdziło zasadność wprowadzenia nowych elementów do omawianych procedur obliczeniowych.

2. Metoda uderzenia hydraulicznego

Metoda uderzenia hydraulicznego jest podstawową metodą pomiarową natężenia przepływu rekomendowaną przez międzynarodową normę IEC 41:1991, jak również jej europejski odpowiednik EN 60041 [1] oraz przez normę amerykańską [2].

Metoda ta opiera się na drugim prawie dynamiki Newtona, zastosowanym do hamowanego w rurociągu przepływu cieczy za pomocą urządzenia odcinającego. Jednym z najważniejszych kroków metody jest eksperymentalne wyznaczenie czasowego przebiegu różnicy ciśnień pomiędzy dwoma wybranymi przekrojami pomiarowymi rurociągu (rys. 1) powstającej podczas opóźnienia przepływu, np. za pomocą kierownic turbiny.



Rys. 1. Schemat rurociągu z oznaczeniami przekrojów pomiarowych, wyjaśniającymi teoretyczne podstawy metody uderzenia hydraulicznego

Fig. 1. Scheme of a pipeline with marks explaining the theoretical basis of the pressure-time method

Objęściowe natężenie przepływu obliczane jest poprzez całkowanie zarejestrowanego przebiegu różnicy ciśnień, w odpowiednio określonym przedziale czasu z wykorzystaniem zależności [3]:

$$Q_0 = \frac{1}{\rho C} \int_{t_0}^{t_f} (\Delta p(t) + \Delta p_d(t) + \Delta P_f(t)) dt + q_l, \quad (1)$$

gdzie: ρ – gęstość cieczy, C – współczynnik geometryczny wyznaczany na podstawie wymiarów odcinka rurociągu pomiędzy przekrojami 1-1 i 2-2 (L – długość odcinka, A – pole przekroju pomiarowego), $\Delta p = p_2 + \rho g z_2 - p_1 - \rho g z_1$ – zmierzona różnica ciśnień pomiędzy przekrojami 2-2 and 1-1 odniesiona do poziomu odniesienia, Δp_d – różnica ciśnień dynamicznych pomiędzy przekrojami 2-2 and 1-1, ΔP_f jest spadkiem ciśnienia powstałym w wyniku strat tarcia pomiędzy przekrojami 1-1 and 2-2, q_l – objęściowe natężenie przepływu w warunkach końcowych po odcięciu przepływu (zwykle jest to wartość przecieków przez urządzenie odcinające w pozycji zamkniętej, które musi zostać zmierzone lub oszacowane osobną metodą), t – czas, (t_0 , t_f) oznacza przedział czasu, w którym przepływ zmienia się od początkowego do końcowego stanu.

Wartość współczynnika C jest określana ze wzoru:

$$C = \int_0^L \frac{dx}{A(x)}. \quad (2)$$

w którym x oznacza współrzędną wzdłuż osi rurociągu, L jest odległością pomiędzy przekrojami 1-1 i 2-2, natomiast A jest polem wewnętrznym poprzecznych przekrojów rurociągu.

Modyfikacja nr 1

W celu określenia natężenia przepływu opisanego równaniem (1) niezbędne jest określenie spadku ciśnienia wywołanego stratami hydraulicznymi, powstałymi w wyniku istnienia tarcia w odcinku pomiędzy przekrojami pomiarowymi 1-1 i 2-2. Procedura obliczeniowa typowa dla metody uderzenia hydraulicznego,

włącznie z przedstawioną w normie IEC 41, zakłada, że straty ciśnienia, wywołane tarciami są proporcjonalne do kwadratu objęściowego natężenia przepływu Q :

$$\Delta P_f = k Q^2, \quad (3)$$

gdzie k jest stałym współczynnikiem określanym eksperymentalnie.

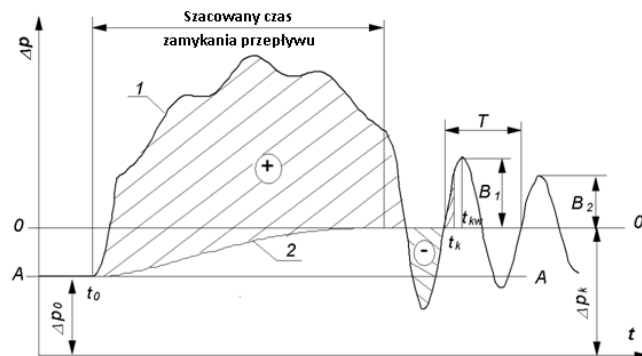
Spadek ciśnienia spowodowany tarciami, określony wzorem (3), nie zależy od kierunku przepływu (posiada zawsze ten sam znak). Zastosowanie tego wzoru może prowadzić do dodatkowego błędu w określaniu wartości natężenia przepływu. Jest to spowodowane tym, iż pod pewnymi warunkami (zwłaszcza w przypadku pomiarów pompoturbin, a także zjawisk falowych, które pojawiają się w rurociągach), tymczasowa zmiana kierunku przepływu cieczy ma miejsce podczas zamykania urządzenia odcinającego przepływ. W związku z tym, zaproponowano następującą modyfikację wzoru (3):

$$\Delta P_f = k Q |Q|. \quad (4)$$

Proponowana zmiana procedury obliczeniowej nie ma jedynie tylko teoretycznego znaczenia, ale pozwala uwzględnić zmiany kierunku przepływu cieczy, które mają miejsce podczas stosowania metody uderzenia hydraulicznego, a co za tym idzie, podnosi dokładność obliczanej wartości natężenia przepływu [3, 4, 5].

Modyfikacja nr 2

Równanie (1), przedstawiające wzór na obliczanie natężenia przepływu, wymaga określenia czasowych granic całkowania t_0 i t_f , tj. przedziału czasowego, w których odbywa się odcinanie przepływu. W przeciwieństwie do czasu t_0 (dolna granica całkowania), określenie wartości czasu t_f (górną granicą całkowania) następuje pewne trudności. Właściwe zsynchronizowanie zamykania urządzenia odcinającego przepływ z pomiarem zmiany ciśnienia nie gwarantuje precyzyjnego określenia tego czasu. Jest to spowodowane brakiem dokładnego określenia momentu zamknięcia urządzenia odcinającego oraz momentu, w którym przepływ ten rzeczywiście jest w stanie końcowym (w niektórych przypadkach, pomimo zatrzymania przepływu, urządzenie odcinające przepływ jest wciąż w stanie ruchu, np. ze względu na naprężenia sprężyste). Z tego powodu, do określenia górnej granicy całkowania używa się przebiegu zmian swobodnych oscylacji ciśnienia (rys. 2).



Rys. 2. Przebieg zmian różnicy ciśnień pomiędzy przekrojami pomiarowymi podczas odcinania przepływu (krzywa 1) oraz krzywa strat hydraulicznych (krzywa 2) [4]

Fig. 2. The course of the pressure difference change between the measuring cross-sections during the flow cut-off [4]

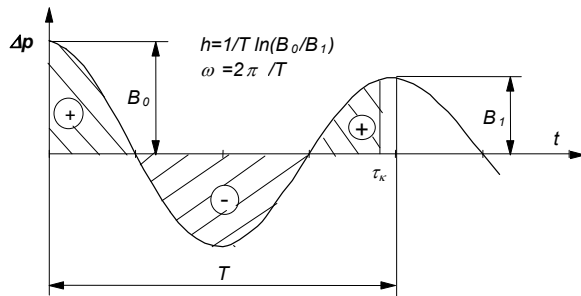
Swobodne oscylacje ciśnienia pozostają po odcięciu przepływu w rurociągu, jako wynik interakcji pomiędzy efektami bezwładnościowymi cieczy oraz efektami wywołanymi ściśliwością cieczy i odkształcalnością ścianek rurociągu [3]. Jedną z procedur określania górnej granicy całkowania dla metody uderzenia hydraulicznego jest przedstawiona w normie IEC 41. Procedura ta jednakże zawiera matematyczną niedokładność, a mianowicie nie

zapewnia zerowania się całki ze swobodnych oscylacji ciśnienia w celu pozbycia się ich wpływu na wynik pomiaru natężenia przepływu. Dyskusja dotycząca tej modyfikacji została przedstawiona poniżej [4].

Można założyć, iż swobodne oscylacje ciśnienia, powstające po odcięciu przepływu, mogą być opisane za pomocą następującej funkcji (rys. 3):

$$\Delta p(t) = B_0 e^{-ht} \cos(\omega t), \quad (5)$$

gdzie: $h = (1/T) \cdot \ln(B_0/B_1)$ – współczynnik tłumienia oscylacji, $\omega = 2\pi/T$ – częstotliwość falowa, $\ln(B_0/B_1)$ – logarytmiczny dekrement tłumienia, T – okres fali ciśnienia.



Rys. 3. Przebieg swobodnych oscylacji ciśnienia [4]

Fig. 3. Free pressure oscillation course [4]

W celu uniknięcia wpływu swobodnych oscylacji ciśnienia na obliczane natężenie przepływu, poszukiwany jest czas τ_k , który ma spełniać następujący warunek:

$$\int_0^{\tau_k} B_0 e^{-ht} \cos(\omega t) dt = 0. \quad (6)$$

Powyższe równanie jest równoważne warunkowi równych pól nad i pod osią czasu t – rys. 3.

Na podstawie przedstawionej analizy stwierdzić można, że procedura określająca czas τ_k , zaprezentowana w normie IEC 41 jest niewłaściwa, ponieważ nie prowadzi do ścisłego rozwiązania równania (6). Można udowodnić, iż procedura ta jest wyprowadzona z rozwiązania równania opartego na całce nieoznaczonej (6), które może być określone analitycznie w postaci:

$$\int B_0 e^{-ht} \cos(\omega t) dt = B_0 \frac{e^{-ht}}{h^2 + \omega^2} [-h \cos(\omega t) + \omega \sin(\omega t)] = 0. \quad (7)$$

Poprzez rozwiązanie równania (7) w zależności od czasu t , możliwe jest wyprowadzenie analitycznego wyrażenia, które jest prezentowane w normie IEC 41 i które określa końcowy czas przedziału całkowania.

Dokładne rozwiązanie powinno być jednak oparte na całce oznaczonej równania (6), które może być zapisane w następującej formie:

$$\int_0^{\tau} B_0 e^{-ht} \cos(\omega t) dt = \frac{B_0}{h^2 + \omega^2} \left\{ e^{-h\tau} [-h \cos(\omega \tau) + \omega \sin(\omega \tau)] + h \right\} = 0 \quad (8)$$

Równanie (8) nie może być rozwiązane analitycznie ze względu na τ .

Poprzez porównanie równań (7) i (8) zauważyć można, że wyrażenie:

$$\text{Równanie (8) - Równanie (7)} = B_0 h / (\omega^2 + h^2), \quad (9)$$

nie zostało wzięte pod uwagę podczas formułowania procedury określonej w normie IEC 41. Z tego wynika, iż całka ze swobod-

nych oscylacji ciśnienia nie zeruje się w punktach określonych przy pomocy normy IEC 41.

Rozważania powyższe nasuwają wniosek, że jednym ze sposobów eliminacji wpływu swobodnych oscylacji ciśnienia na określone natężenie przepływu jest odjęcie wartości wyrażenia $B_0 h / (\omega^2 + h^2)$ z obliczanej całki na podstawie normy IEC 41. Ta wartość może być z łatwością obliczona z zarejestrowanego przebiegu różnicy ciśnienia.

Innym sposobem eliminacji wpływu swobodnych oscylacji ciśnienia jest numeryczne poszukiwanie zer całki (6 lub 8) [3].

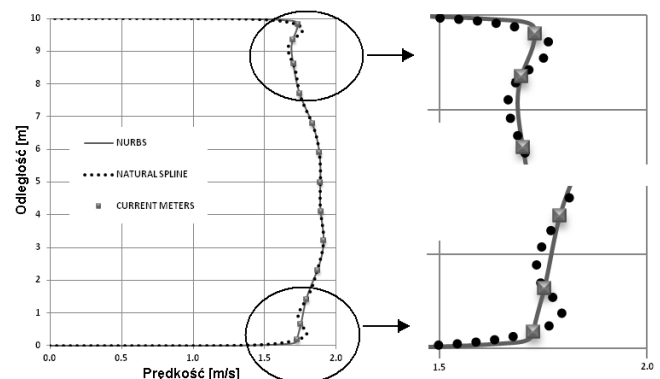
Wpływ swobodnych oscylacji ciśnienia, powstających w rurociągu po zamknięciu przepływu, na uzyskiwane wyniki pomiaru natężenia przepływu, wzrasta wraz ze zwiększaniem się amplitudy tych oscylacji. W niektórych przypadkach, jak z doświadczeń autorów wynika, może osiągnąć 0,5% obliczanego natężenia przepływu [4].

3. Metoda młynków hydrometrycznych

Międzynarodowa norma ISO 3354 [6] wydana w 1988 roku (drugie wydanie) i jej późniejsza wersja wydana w 2008 roku (trzecie wydanie) zawierają zalecenia dotyczące obliczeń objętościowego natężenia przepływu na podstawie zmierzonych lokalnych prędkości cieczy, np. za pomocą młynków hydrometrycznych w przewodach zamkniętych o uporządkowanym przepływie. Norma przedstawia trzy następujące sposoby całkowania zmierzonego pola prędkości: 1) metodę numeryczną za pomocą zdefiniowanej formuły; 2) metodę graficzną (planimetrowania) oraz 3) metodę arytmetyczną. Metody te ogólnie nie przystają już do obecnego stanu wiedzy, a ponadto nie są zalecane do krótkich kanałów wlotowych i rurociągów turbin wodnych.

Obecnie, obliczanie natężenia przepływu jest często oparte na metodach wykorzystujących funkcje splajnowe (splajny). Jednakże, większość używanych splajnow klasycznych (splajnow naturalnych) nie zawsze zapewnia właściwą interpolację rozkładu prędkości, szczególnie w obszarze łączenia warstwy przyściennej z głównym przepływem. Stąd też, autorzy proponują dwa sposoby poprawy dokładności obliczania natężenia przepływu: 1) poprzez zastąpienie splajnow naturalnych splajnami typu NURBS (Non-Uniform Rational B-Splines), które są obecnie powszechnie stosowane w programach typu CAD, oraz 2) poprzez zmianę funkcji opisującej rozkład prędkości w warstwie przyściennej.

Rysunek 4 przedstawia przykład porównania interpolacji zmierzonych (w jednej z polskich elektrowni wodnych) prędkości wody z wykorzystaniem splajnow naturalnych oraz splajnow uwzględniających obydwie ww. modyfikacje. Z przykładu tego wynika, że w obszarze sklejanego warstwy przyściennej z głównym przepływem, kształt profilu prędkości uzyskanego za pomocą splajnow naturalnych jest, jak należy przypuszczać, mniej wiarygodny od kształtu wyznaczonego za pomocą splajnow NURBS.



Rys. 4. Przykład interpolacji zmierzonych prędkości za pomocą splajnow naturalnych oraz NURBS

Fig. 4. Example of the velocity distribution by means of the natural splines and the NURBS

Modyfikacja nr 1

Pierwsza z ww. zmian dotycząca zastosowania NURBS pozwala na wyeliminowanie lub złagodzenie lokalnych zafalowań funkcji w obszarach dużych gradientów, które pojawiają się, w rozpatrywanym przypadku, między warstwą przyścienną i głównym przepływem. Korzyścią wynikającą z użycia NURBS jest mała tendencja do nagłych zmian w przebiegu (kształcie) funkcji. Jest to typowa własność tego rodzaju splajnów, szeroko prezentowanych w literaturze np. [7] i Internecie i dlatego też nie będą one w tym miejscu szerzej opisywane.

Modyfikacja nr 2

Druga ze zmian odnosi się do ilościowego opisu rozkładu prędkości w warstwie przyściennej za pomocą wzoru von Karmana o następującej postaci [6]:

$$v(x) = V_a \left(\frac{x}{a} \right)^{1/m}, \quad (10)$$

gdzie: V_a jest lokalną prędkością zmierzona przez młynek hydrometryczny, znajdujący się najbliżej ścianki kanału przepływowego (w odległości a), m jest wykładnikiem zależnym od współczynnika strat tarcia.

Jak łatwo zauważyć, funkcja prędkości w warstwie przyściennej jest zależna od położenia pierwszego młynka (najbliższego ściance), co wydaje się być niewłaściwym podejściem. Stąd też, opierając się na doświadczeniu i obserwacji pól prędkości autorzy niniejszej pracy proponują używanie wzoru von Karmana w następującej postaci:

$$v(x) = KV_a \left(\frac{x}{\delta} \right)^{1/m}, \quad (11)$$

gdzie: δ jest grubością warstwy przyściennej, K jest współczynnikiem określającym w celu zapewnienia gładkiego połączenia warstwy przyściennej z głównym przepływem.

We wzorze (11), odległość a pierwszego młynka została zastąpiona przez grubość warstwy przyściennej δ . Wykładnik m jest możliwy do określenia w oparciu o współczynnik strat tarcia. Zależność tych wielkości jest dostępna w normie ISO 3354, w postaci empirycznych stabelaryzowanych wartości.

Współczynnik K jest stałą określaną na podstawie obserwacji profilu prędkości. Doświadczenie autorów wskazuje, że współczynnik ten znajduje się w zakresie od 0,94 do 0,997. Przy tym zdecydowanie najczęściej jest to wartość zbliżona do górnego zakresu tego przedziału. Stała K jest związana w pewien sposób z umowną definicją grubości warstwy przyściennej, która określa 0,99 średniej wartości przepływu głównego.

Grubość warstwy przyściennej δ jest określana za pomocą dobrze znanego wzoru, szeroko prezentowanego w literaturze [8, 9, 10]:

$$\delta = 0,37z (Re_z)^{-0,2}, \quad (12)$$

gdzie Re_z jest liczbą Reynoldsa zależną od odległości z od wlotu kanału do przekroju pomiarowego oraz średniej prędkości V_{CM} , uzyskanej z pomiaru młynkami hydrometrycznymi w przekroju pomiarowym, co można zapisać w postaci wzoru:

$$Re_z = \frac{V_{CM} z}{\nu}, \quad (13)$$

gdzie ν jest lepkością kinematyczną.

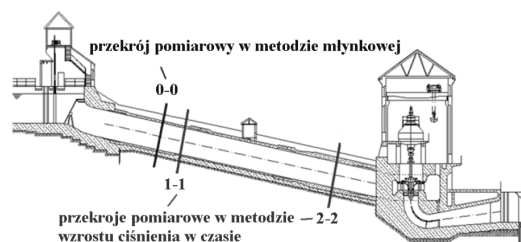
Obserwacje pól prędkości uzyskanych za pomocą interpolacji na podstawie wyników pomiarów w wielu elektrowniach wodnych pozwalają na wyciągnięcie wniosku, że w porównaniu do zaleceń normy ISO 3354, obydwie proponowane zmiany pozwala-

ją na uzyskanie bardziej realistycznych krzywych interpolowanych i dają lepszą reprezentację rozkładu prędkości i w ten sposób, jak się zakłada, zwiększają dokładność obliczeń natężenia przepływu. Zaleca się jednak używanie obydwu zmian jednocześnie.

4. Obiekt badań i analiza porównawcza wyników

Pomiary sprawności turbiny Kaplana przeprowadzone zostały z wykorzystaniem obydwu prezentowanych metod: uderzenia hydraulicznego oraz młynków hydrometrycznych w jednej z polskich elektrowni (rys. 5 – turbina o mocy 4 MW jest połączona z betonowym rurociągiem o średnicy 4 m i całkowitej długości około 40 m).

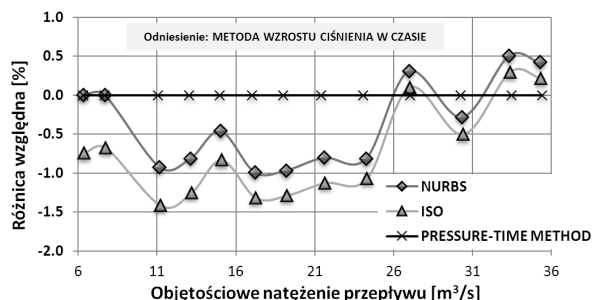
Dalsza część niniejszego rozdziału przedstawia przykład porównania wyników obliczeń natężenia przepływu za pomocą następujących procedur: 1) procedury numerycznej zawartej w normie ISO 3354 oraz 2) zmodyfikowanej przez autorów procedury, opartej o splajny NURBS i ze zmienionym wzorem określającym prędkość w warstwie przyściennej. Wyniki te zostały odniesione do wyników uzyskanych przy użyciu metody uderzenia hydraulicznego, jednocześnie zastosowanej do pomiaru natężenia przepływu (więcej szczegółów w [11]).



Rys. 5. Schemat układu przepływowego elektrowni z zaznaczonymi przekrojami hydrometrycznymi do metody młynków hydrometrycznych (0-0) i metody uderzenia hydraulicznego (1-1) oraz (2-2)

Fig. 5. Layout of the turbine penstock with marked hydrometric sections used for discharge measurement using the current meter method (0-0) and the pressure-time method (1-1) and (2-2)

Porównanie wyników, przedstawionych na rys. 6, pokazuje, że w całym zakresie pomiarowym, w odniesieniu do wyników otrzymanych za pomocą metody uderzenia hydraulicznego, różnice względne uzyskane za pomocą procedury NURBS nie przekroczyły 1%, podczas gdy wyniki uzyskane według normy ISO 3354 osiągnęły 1,5%. To może stanowić wstępne potwierdzenie eksperymentalne użyteczności wprowadzonych modyfikacji. Szczególnie jest to ważne w przypadkach, w których metoda młynków hydrometrycznych jest stosowana w układach z krótkimi kanałami dotłowymi do turbin.



Rys. 6. Porównanie wyników użytych procedur obliczeniowych w metodzie młynków i metodzie uderzenia hydraulicznego – różnice względne w funkcji objętościowego natężenia przepływu (wyniki metody uderzenia hydraulicznego są wartościami referencyjnymi)

Fig. 6. The comparison of used current meter procedures and the pressure-time procedure – relative differences vs. flow rate (the pressure-time method results are reference values)

5. Podsumowanie i wnioski

- Artykuł dotyczy dwóch podstawowych metod pomiaru natężenia przepływu stosowanych w badaniach turbin wodnych: 1) metody uderzenia hydraulicznego oraz 2) metody młynków hydrometrycznych). Dla metod tych zaproponowano zmiany w ich procedurach obliczeniowych. W przypadku pierwszej metody wprowadzone modyfikacje dotyczą: 1) zmiany obliczania spadku ciśnienia spowodowanego siłami tarcia oraz 2) sposobu wyznaczania górnej granicy całkowania przebiegu zmierzonej podczas odcinania przepływu zmiany różnicy ciśnień między dwoma przekrojami pomiarowymi rurociągu. W przypadku drugiej metody wprowadzone modyfikacje dotyczą: 1) zmiany sposobu interpolacji prędkości cieczy poprzez zastąpienie splajnow naturalnych splajnami typu NURBS oraz 2) zmiany wyznaczania profilu prędkości w obszarze warstwy przyściennej. Wszystkie te zmiany mają racjonalne podstawy teoretyczne. Są rezultatem analizy oraz doświadczenia autorów niniejszej pracy i mają na celu poprawę dokładności (zmniejszenie niepewności) pomiaru natężenia przepływu podczas badań sprawnościowych turbin wodnych.
- Analiza porównawcza wyników uzyskanych metodami uderzenia hydraulicznego i młynków hydrometrycznych wskazuje na poprawność wprowadzonych zmian do procedur obliczeniowych tych metod. Jednakże, dalsze prace są niezbędne do lepszego poznania wpływu tych zmian na zmniejszenie niepewności wyników pomiaru natężenia przepływu.

6. Literatura

- [1] IEC 60041:1991: Field acceptance tests to determine the hydraulic performance of hydraulic turbines, storage pumps and pump turbines.
- [2] ASME PTC 18:2002: American National Standard: Hydraulic Turbines and Pump-Turbine, Performance Test Codes (Consolidation of ASME PTC 18-1992 and ASME PTC 18.1-1978).
- [3] Adamkowski A.: Discharge Measurement Techniques in Hydropower Systems with Emphasis on the Pressure-Time Method, Chapter no. 5 of the book: Hydropower - Practice and Application, ISBN 978-953-51-0164-2 pp.83-114, 2012.
- [4] Adamkowski A. and Janicki W.: Selected problems in calculation procedures for the Gibson discharge measurement method, Proc. of 8th Int. Conf. on Hydraulic Efficiency Measurement – IGHEM'2010, Roorkie India, pp. 73-80, 2010.
- [5] Adamkowski A.: Pomiary natężenia przepływu w warunkach eksploatacyjnych maszyn wodnych. Miesięcznik Naukowo-Techniczny: Pomiary Automatyka Kontrola, Nr 6, 2001.
- [6] ISO 3354:2008 (3rd edition): Measurement of clean water flow in closed conduits - Velocity-area method using current-meters in full conduits and under regular flow conditions, 2008.
- [7] Yamaguchi F.: Curves and surfaces in computer aided geometric design, Springer Verlag, Berlin, 1988.
- [8] Cengel Y. A., Cimbala J. M.: Fluid Mechanics. Fundamentals and Applications. McGraw-Hill International Edition, New York, 2006.
- [9] Nalluri C., Featherstone R. E.: Civil Engineering Hydraulics (Fourth Edition). Blackwell Science, 2001.
- [10] Crowe C. T., Robertson J. A., Elger D. F.: Engineering Fluid Mechanics (7-th Edition). John Wiley & Sons, 2001.
- [11] Krzemianowski Z., Adamkowski A.: The use of the Non-Uniform Rational B-Splines (NURBS) for discharge calculation in the velocity area method. Journal of Energy and Power Engineering, David Publishing, based on the International Conference HYDRO'2013, Innsbruck, 07-09.10.2013. ISSN 1934-8975.

otrzymano / received: 15.09.2014

przyjęto do druku / accepted: 03.11.2014

artykuł recenzowany / revised paper

INFORMACJE

Nowa inicjatywa PAK

Na stronie internetowej Wydawnictwa PAK został utworzony dział: **Niepewność wyników pomiarów** w którym są zamieszczane aktualne informacje dotyczące problemów teoretycznych i praktycznych związanych z szacowaniem niepewności wyników pomiarów. W dziale znajdują się:

- aktualne informacje o publikacjach dotyczących niepewności wyników,
 - informacje o przedsięwzięciach naukowo-technicznych i edukacyjnych, o tematyce związanej z niepewnością,
 - dokumenty dotyczące niepewności,
 - pytania do ekspertów (FAQs).
- Zapraszamy:
- autorów opublikowanych prac dotyczących niepewności o nadsyłanie tekstów do zamieszczenia w tym dziale,
 - organizatorów przedsięwzięć naukowo – technicznych lub edukacyjnych do nadsyłania informacji o imprezach planowanych lub odbytych,
 - zainteresowanych zagadnieniami szczegółowymi do nadsyłania pytań do ekspertów.

Materiały mogą mieć formę plików lub linków do źródeł. Warunkiem zamieszczenia w tym dziale strony internetowej PAK materiałów lub linków jest przysłanie do redakcji PAK pocztą zwykłą zgody właściciela praw autorskich na takie rozpowszechnienie. Zamieszczanie i pobieranie materiałów i informacji w tym dziale strony internetowej jest bezpłatne. Redakcja PAK będzie nadzorować zawartość działu, ale za szczegółowe treści merytoryczne odpowiadają autorzy nadsyłanych materiałów.

Tadeusz SKUBIS
Redaktor naczelny Wydawnictwa PAK