

## Adam ADAMKOWSKI

INSTYTUT MASZYN PRZEPLYWOWYCH  
POLSKIEJ AKADEMII NAUK W GDAŃSKU

# Pomiary natężenia przepływu w warunkach eksploatacyjnych maszyn wodnych<sup>1</sup>

Dr inż. Adam Adamkowski



Uzyskał dyplom magistra inżyniera mechanika w 1978 r. w Instytucie Okrętowym Politechniki Gdańskiej w zakresie maszyn, urządzeń i siłowni okrętowych, stopień doktora nauk technicznych – w 1989 r. w Instytucie Maszyn Przepływowych PAN w Gdańsku – specjalność: hydromechanika. Obecnie adiunkt – kierownik Zakładu Badań i Diagnostyki Maszyn Hydraulicznych w Ośrodku Mechaniki Cieczy IMP PAN w Gdańsku. Główne kierunki działalności naukowej: przepływy nieustalone w przewodach zamkniętych i zagadnienia eksploatacji wirowych maszyn wodnych.

### Streszczenie

Przedstawiono wybrane doświadczenia zdobyte w ostatnich latach w metodyce pomiaru natężenia przepływu w warunkach eksploatacyjnych elektrowni wodnych. Doświadczenia dotyczą kilku metod klasycznych – metody młynkowej, wolumetrycznej, Gibsona i Winter-Kennedy'ego. Główną uwagę zwrócono na zagadnienia nie ujęte w odpowiednich normach międzynarodowych oraz wskazano na wpływ stosowania technik komputerowych (do akwizycji i analizy danych pomiarowych) na poprawę jakości pomiaru.

### Abstract

Chosen experiences gained during the last decade in the flow rate measurements in service conditions of water powerplant by the classic methods (the current-meter method, volumetric method, pressure-time (Gibson) method and Winter-Kennedy method) are presented. The main attention is paid to problems not taken into consideration by international standards. The influence of using computer technique on improving quality of measurements is also shown.

### Wstęp

Pomiar natężenia przepływu należy do najtrudniejszych zadań w badaniach energetycznych maszyn wodnych. Wymaganiu uzyskania wysokiej dokładności pomiaru nie sprzyjają zwykle trudne warunki hydrotechniczne elektrowni oraz reżimy pracy narzucone elektrowniom przez system elektroenergetyczny. Pomiar natężenia przepływu odbywa się zarówno metodami bezwzględными jak również względnymi – wskaźnikowymi. Do metod bezwzględnych, należy głównie zaliczyć metodę młynkową, metodę wolumetryczną (zbiornikową) i metodę przystosowaną ciśnienia w czasie (Gibsona). Metody względne, a wśród nich najczęściej stosowana metoda Winter-Kennedy'ego, wymagają wzorcowania za pomocą metod bezwzględnych. W ostatnich latach zaczęto stosować metody akustyczne, oparte na pomiarze czasu przejścia lub przesunięcia dopplerowskiego sygnału ultradźwiękowego w przekroju pomiarowym. Ze względu na brak większych doświadczeń, nie będą one przedmiotem niniejszej pracy.

Omawiane metody posiadają bogatą literaturę, np. [4, 5, 6, 7, 9], są przedmiotem szeregu norm międzynarodowych, między innymi [9, 10, 11, 12]. Na wzrost jakości pomiaru tymi metodami w ostatnich latach ma niewątpliwie wpływ postęp w stosowaniu kompute-

rów do zbierania, przetwarzania i analizy sygnałów pomiarowych, a także wzrost klasy dokładności dostępnych przyrządów pomiarowych. Rozwój w tych dziedzinach spowodował szereg zmian w omawianych sposobach pomiaru. W niniejszym artykule przedstawiono wybrane doświadczenia zdobyte w ostatnim czasie przez Instytut Maszyn Przepływowych PAN w Gdańsku w metodyce pomiaru natężenia przepływu, w większości nie ujęte w odpowiednich normach.

### Metoda młynkowa

Metoda młynkowa należy do tradycyjnych, najbardziej rozpowszechnionych metod stosowanych w badaniach sprawnościowych maszyn wodnych w Polsce, a także w Europie. Stosuje się ją zwykle na ujęciach wody (komory wlotowe lub wylotowe) i w rurociągach derywacyjnych elektrowni wodnych. Natężenie przepływu wyznacza się na podstawie całkowania pomierzonego młynkami pola prędkości w przekroju hydrometrycznym z wykorzystaniem zależności szybkości obrotowej wirnika młynka a prędkości cieczy.

Na ujęciu wody, zespół pomiarowy IMP PAN stosuje często metodę integracyjną. Ruchoma rama trawersująca przekrój pomiarowy jest umieszczana w miejscu przeznaczonym na zastawki remontowe – rys. 1. Trudności tej metody pojawiają się, gdy pomiar odbywa się w krótkich kanałach, w których przepływ wody nie ma charakteru uporządkowanego. Decydując się na jej stosowanie należy zwrócić szczególną uwagę na następujące czynniki:

- prędkość ruchu ramy powinna umożliwiać zliczanie dostatecznej ilości impulsów generowanych przez młynki,
- kąt napływu wody na młynki nie powinien przekraczać granic wynikających z ich charakterystyk kierunkowych,
- w przekroju pomiarowym nie powinno dochodzić do przepływów powrotnych.

Przy dużej zmienności kąta napływu metodę integracyjną zastępuje się metodą stacjonarną, w której rama jest zatrzymywana na kolejnych poziomach, charakteryzujących się stałym kątem napływu na młynek.

Mniej trudności pojawia się, gdy pomiaru metodą młynkową odbywa się w rurociągu o odpowiedniej długości. W ostatnich badaniach w elektrowniach wodnych Myczkowce i Bielkowo zastosowano jako konstrukcję nośną młynków krzyżak pomiarowy wykonany z rur – rys. 2. Wpływ konstrukcji krzyżaka na pole prędkości, w którym znajdują się wirniki młynków oszacowano posługując się wzorami znanymi z mechaniki płynów.

Postęp w pomiarze za pomocą młynków wiąże się z wykorzystaniem komputera do całkowania wyznaczonego pola prędkości oraz do zliczania impulsów młynków. Te dwa elementy sprzyjają zwiększeniu dokładności pomiaru oraz zmniejszeniu jego uciążliwości. Do całkowania w IMP PAN wykorzystuje się własne oprogramowanie [8]. W przypadku przekroju kołowego, całkowanie odbywa się najpierw wzdłuż poszczególnych ramion krzyżaka, a następnie w kierunku obwodowym – zgodnie ze wzorem:

$$Q_0 = \int_0^{2\pi} d\varphi \int_0^{D/2} rV(r, \varphi) dr,$$

gdzie  $(r, \varphi)$  są współrzędnymi biegunowymi punktu bieżącego we-

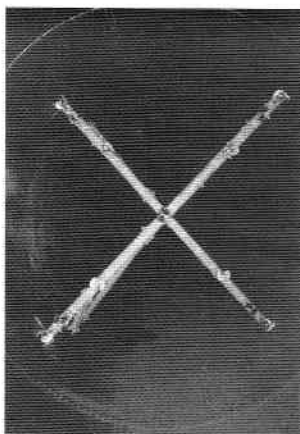
<sup>1</sup> Pracę prezentowano na Seminarium nt. „Odbudowa i modernizacja elektrowni wodnych – doświadczenia polskie i europejskie” podczas Targów EKOENERGIA'2000, Gdynia 13 kwietnia 2000.

wewnątrz przekroju pomiarowego,  $D$  – średnicą tego przekroju, a  $V$  – prędkością lokalną cieczy.

Całkowanie w kierunku promieniowym poprzedzone jest interpolacją pola prędkości funkcjami 3-go stopnia modyfikowanymi w pobliżu ścianki rurociągu poprzez zastąpienie jednomianu typu  $Ax^3$  jednomianem  $Ax^{1/m}$ , gdzie  $x$  jest odległością od ścianki,  $m$  – wykładnikiem rozkładu prędkości ( $m = 5 \div 10$ ), zaś  $A$  współczynnikiem proporcjonalności.



Rys. 1. Rama trawersująca przekrój hydrometryczny w metodzie młynkowej (EW Stoczek Młyn).



Rys. 2. Krzyżak z młynkami do pomiaru natężenia przepływu (EW Bielkowo).

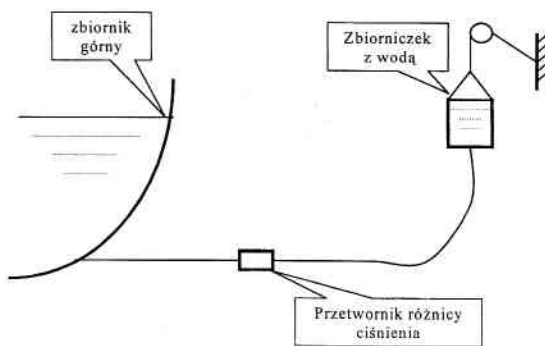
## Metoda wolumetryczna (zbiornikowa)

Pomiar natężenia przepływu metodą wolumetryczną polega na określaniu w mierzonym czasie  $\Delta t$  przyrostu lub ubytku objętości wody  $\Delta V$  w zbiorniku elektrowni (górnym lub dolnym). Wyznaczanie zmiany objętości  $\Delta V$  odbywa się na podstawie mierzonego przyrostu poziomu  $\Delta z$  zwierciadła wody w zbiorniku, odnoszonego do zależności objętości zbiornika od stanu jego napelnienia  $V(z)$  – funkcji wyznaczonej na podstawie pomiarów geodezyjnych. Natężenie przepływu mierzone tą metodą można zapisać wzorem:

$$Q = \frac{\Delta V}{\Delta t} = \frac{V(z_0 + \Delta z) - V(z_0)}{\Delta t}$$

gdzie  $z_0$  oznacza poziom zwierciadła wody w zbiorniku na początku pomiaru.

Do istotnych czynników, na które trzeba zwrócić szczególną uwagę należy dokładność wyznaczenia zależności  $V(z)$  oraz dokładność pomiaru zmiany poziomu wody  $\Delta z$ . Do pomiaru tej ostatniej wielkości nie można zwykle wykorzystać istniejących w elektrowniach przyrządów, ponieważ ich zakresy pomiarowe i klasa nie pozwalają na uzyskanie wystarczającej dokładności<sup>2</sup>. Z tego powodu, w wielu przypadkach pomiaru dokonuje się aparaturą ze sprężonym powietrzem [4]. Jest to metoda dokładna, lecz niezbyt wygodna. Alternatywna metoda została zastosowana przez IMP PAN podczas badań energetycznych maszyn hydraulicznych w Elektrowni Wodnej Porąbka – Żar. Zasadę pomiaru ilustruje rysunek 3. Do jednej strony zastosowanego przetwornika różnicy ciśnień podłączono ciśnienie wywierane przez słup wody w zbiorniku górnym, zaś do drugiej – stałe ciśnienie zadawane za pomocą zbiorniczka z wodą, zawieszanego na stałej, podczas wykonywania pomiaru, wysokości. Do pomiaru różnicy ciśnienia, a tym samym przyrostu poziomu wody w zbiorniku górnym, zastosowano wysokiej klasy przetwornik różnicy ciśnień (klasa 0,1%) na mały zakres pomiarowy.

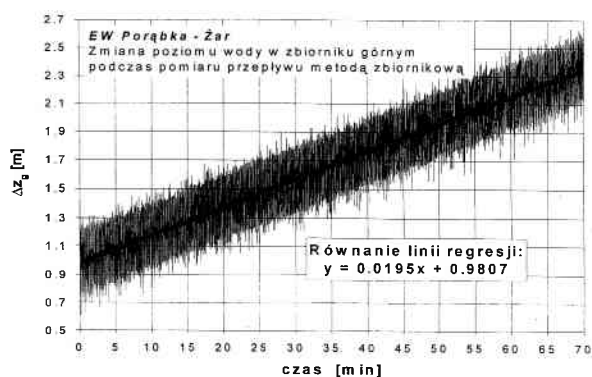


Rys. 3. Sposób pomiaru zmiany poziomu zwierciadła wody w zbiorniku górnym.

Dodatkowym, bardzo istotnym czynnikiem w trakcie pomiarów tą metodą jest wpływ falowania wody w zbiorniku. Przykład zarejestrowanego przebiegu zmiany poziomu wody w zbiorniku górnym w EW Porąbka-Żar podczas pomiaru natężenia przepływu metodą zbiornikową ilustruje rysunek 4. Mimo dobrych warunków atmosferycznych (słaby wiatr) w trakcie wykonywania badań, amplituda fali, dochodząca do około 0,25 m, stanowiła około 17% przyjętego zakresu zmiany poziomu wody w czasie trwania jednego pomiaru. Do wyeliminowania wpływu falowania zastosowano regresję liniową zarejestrowanego cyfrowo sygnału pomiarowego – rys. 4. Oparcie pomiarów w tych warunkach na tradycyjnych odczytach nie mogłoby zagwarantować wystarczającej dokładności.

## Metoda przyrostu ciśnienia w czasie (metoda Gibsona)

Metoda przyrostu ciśnienia w czasie, często zwana metodą Gibsona, od nazwiska autora, lub metodą uderzenia hydraulicznego, opiera się na pomiarze przebiegu zmian różnicy ciśnień w przewodach zamkniętych podczas zatrzymywania przepływu cieczy za pomocą urządzeń odcinających.



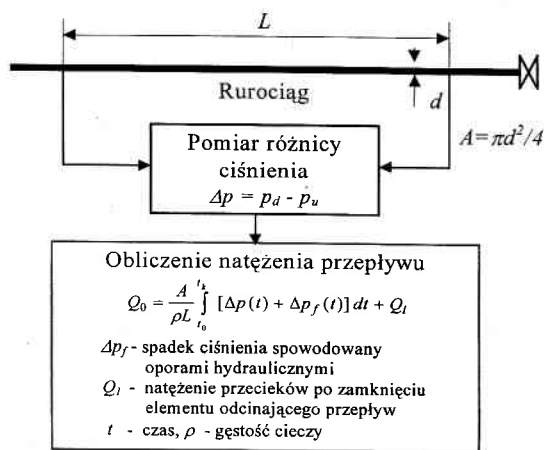
Rys. 4. Przebieg zmiany poziomu zwierciadła wody w zbiorniku zarejestrowanej podczas pomiaru natężenia przepływu metodą wolumetryczną.

Podstawa teoretyczna metody Gibsona wynika z II zasady dynamiki zastosowanej do opóźnianej masy strumienia cieczy w przewodzie zamkniętym. Siły bezwładności działające na masy zatrzymanej cieczy w odcinku przewodu zamkniętego oraz siły tarcia objawiają się różnicą ciśnień statycznych między końcowymi przekrojami rozpatrywanego odcinka przewodu – rys. 5. Efekt sił tarcia wydziela się uwzględniając kwadratową funkcję spadku ciśnienia spowodowanego oporami hydraulicznymi od natężenia przepływu.

<sup>2</sup> Warunki podczas badań energetycznych nie zezwalają na dużą zmianę poziomu wody w zbiorniku, dlatego w celu uzyskania wystarczającej dokładności pomiaru należy stosować specjalne oprzyrządowanie.

Wymagania jakie należy spełnić przy pomiarze metodą Gibsona określa międzynarodowa norma IEC 41 [11] oraz norma amerykańska [14]. Normy te zalecają stosowanie metody tylko w warunkach pracy turbinowej wirowych maszyn hydraulicznych. Własne badania laboratoryjne oraz analiza teoretyczna nie potwierdziły zasadności tego ograniczenia. Przy stosowaniu metody w warunkach ruchu pompowego zazwyczaj dochodzi do chwilowej zmiany kierunku przepływu cieczy z pompowego na turbinowy. Zaproponowana w ww. normach procedura nie uwzględnia tej zmiany. Wyznaczana, zgodnie z nimi, składowa różnicy ciśnień pochodząca od oporów hydraulicznych, posiada ten sam znak niezależnie od kierunku przepływu. W związku z tym zmieniono w oprogramowaniu przygotowanym w IMP PAN sposób wyznaczania składowej od strat hydraulicznych z zarejestrowanego przebiegu różnicy ciśnień między przekrojami pomiarowymi odcinka przewodu, uwzględniając zmianę kierunku przepływu.

W celu potwierdzenia słuszności wprowadzonej zmiany przeprowadzono badania w laboratorium IMP PAN<sup>3</sup> [3]. Natężenie przepływu mierzone metodą Gibsona według ww. norm oraz zgodnie z wprowadzoną poprawką porównywano z pomiarem za pomocą przepływomierza ultradźwiękowego. Rysunek 6 przedstawia trzy wybrane przebiegi pomierzonej różnicy ciśnień podczas różnych sposobów zatrzymywania pompy oraz odpowiadające im przebiegi natężenia przepływu wyznaczone metodą Gibsona – według własnych obliczeń. Różnice między własnymi obliczeniami i wynikami pomiaru przepływomierzem są niewielkie, natomiast różnice między pomiarem zgodnie z normami a przepływomierzem są tym większe im większa jest wartość natężenia przepływu po zmianie kierunku. W najgorszym z badanych przypadków różnica dochodzi aż do 7,5%.

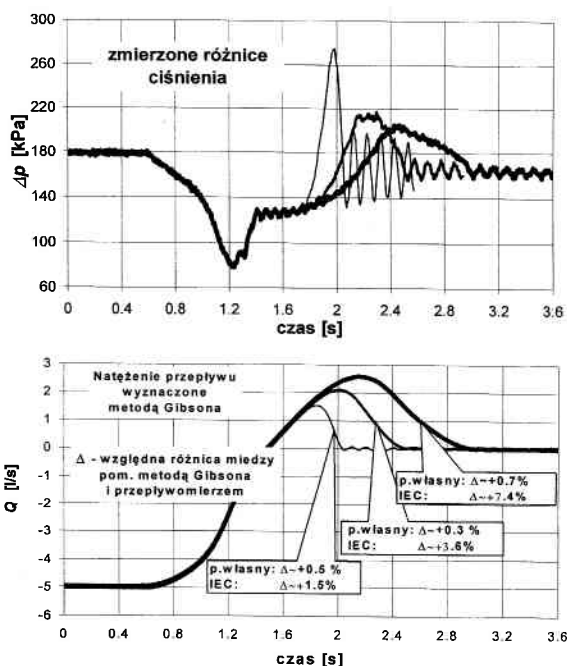


Rys. 5. Zasada pomiaru natężenia przepływu metodą Gibsona.

Po sprawdzeniu przygotowanych procedury pomiaru również w warunkach rzeczywistych [1], metodę zastosowano (po raz pierwszy w Polsce w 1998) w badaniach sprawdzających poprawność wskazań jednodrogowych przepływomierzy ultradźwiękowych zainstalowanych na rurociągach Elektrowni Wodnej Żarnowiec. Wykorzystano dwie następujące wersje metody:

- wersję I opartą na bezpośrednim pomiarze różnicy ciśnień między dwoma przekrojami hydrometrycznymi wybranego odcinka rurociągu derywacyjnego elektrowni o stałej średnicy wzdłuż jego długości,
- wersję II opartą na pomiarze zmiany ciśnienia w przekroju wlotowym spirali maszyny i odniesieniu tej zmiany do ciśnienia wynikającego z poziomu wody w zbiorniku górnym elektrowni.

Na podstawie tych badań stwierdzono, że pomiary natężenia przepływu przepływomierzem ultradźwiękowym różniły się od pomiarów zastosowanymi wersjami metody Gibsona o nie więcej niż 2% – dla wszystkich punktów pomiarowych badanych hydrozespołów. Przykład porównania wyników pomiaru natężenia przepływu metodą ultradźwiękową i jedną z wersji metody Gibsona przedstawia rysunek 7. Warto podkreślić jest fakt, że różnice między zastosowanymi wersjami metody były niewielkie, nie przekraczały 0,3%.

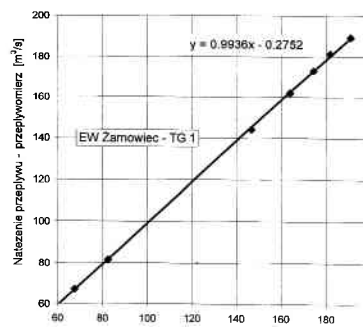


Rys. 6. Wyniki badań laboratoryjnych. Przebiegi pomierzonych różnic ciśnienia w rurociągu oraz wyznaczone metodą Gibsona przebiegi natężenia przepływu.

W 1999 r. metodę zastosowano w badaniach energetycznych jednego z hydrozespołów w ESP Żydowo, zarówno podczas pracy turbinowej jak i pompowej. Z kolei, w tych badaniach zastosowany układ pomiarowy umożliwił wyznaczenie natężenia przepływu następującymi sposobami:

- na podstawie bezpośredniego pomiaru różnicy ciśnień  $\Delta p$  w rurociągu,
- na podstawie różnicy ciśnień  $\Delta p$  wyznaczanej z oddzielnego pomiaru ciśnienia w przekroju wlotowym maszyny i ciśnienia wynikającego z poziomu wody górnej ( $p_z$  i  $p_g$ ).

Mimo, że pomiar pierwszym sposobem był bardziej dokładny (wyższa klasa przetwornika oraz pomiar bezpośredni), to jednak różnice między tymi sposobami były znikome, nie przekraczały 0,2-0,4%, zarówno dla ruchu turbinowego jak i pompowego.



Rys. 7. EW Żarnowiec – hydrozespół nr 1. Porównanie wyników pomiaru natężenia przepływu metodą Gibsona i ultradźwiękową.

<sup>3</sup> Badania przeprowadzono na stanowisku badawczym przygotowanym w ramach projektu badawczego KBN Nr 7 T07C 022 13.

## Metoda Winter-Kennedy'ego (różnicy ciśnień w spirali turbiny)

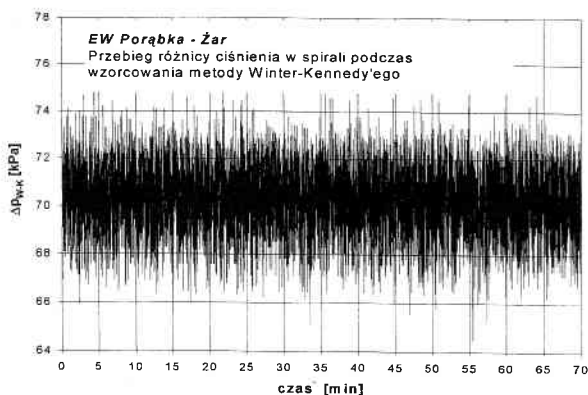
Pomiar przepływu metodą Winter-Kennedy'ego opiera się na zależności natężenia przepływu  $Q$  od różnicy ciśnienia  $\Delta p_{WK}$  pomiędzy zewnętrzną i wewnętrzną stroną spirali maszyny w postaci

$$Q = k \Delta p_{WK}^n,$$

w której  $k$  jest stałym współczynnikiem, wyznaczonym doświadczalnie na podstawie wzorcowania a  $n$  – wykładnikiem potęgowym, teoretycznie równym 0,5. Współczynnik  $k$  wyznacza się na podstawie pomiarów przepływu metodą bezwzględną. Różnica ciśnienia jest wywołana siłą odśrodkową w związku z zakrzywieniem strugi cieczy w spirali. Metodę stosuje się tylko dla maszyn w ruchu turbinowym, głównie w następujących celach:

- rozszerzenia zakresu lub uzupełnienia pomiarów w przypadku, gdy metoda podstawowa bezwzględna jest bardzo kosztowna, wymaga długiego czasu badań, czy też nie nadaje się do zastosowania w pewnym zakresie parametrów ruchowych,
- wyznaczenia poprawnej zależności między otwarciem kierownicy i kątem położenia łopatek wirnika turbin Kaplana, tzw. optymalnej zależności kombinatoryjowej.

Pomiar metodą Winter-Kennedy'ego jest tani i wystarczająco dokładny pod warunkiem, że stosuje się przetworniki wysokiej jakości. Zwiększeniu dokładności pomiaru sprzyja stosowanie komputerowego systemu akwizycji danych pomiarowych. System taki umożliwia dokładne uśrednianie mierzonej różnicy ciśnienia o znacznej fluktuacji – rys. 8.



Rys. 8. EW Porąbka-Żar. Przebieg zmiany różnicy ciśnienia w spirali podczas pomiaru przepływu metodą Winter-Kennedy'ego.

## Wnioski

W pracy przedstawiono wybrane doświadczenia w wykonywaniu pomiaru natężenia przepływu w warunkach eksploatacyjnych elektrowni wodnych metodami: młynkową, wolumetryczną, Gibsona i Winter-Kennedy'ego. Szczególną uwagę zwrócono na zagadnienia nie ujęte w odpowiednich normach oraz na wpływ komputerowej akwizycji i obróbki danych pomiarowych na jakość pomiaru. Najważniejsze wnioski wypływające z tych doświadczeń można scharakteryzować następująco:

1. Wykorzystanie komputera do całkowania wyznaczonego pola prędkości w metodzie młynkowej oraz do zliczania impulsów młynków powoduje zwiększenie dokładności pomiaru i zmniejszenie jego uciążliwości.
2. W metodzie wolumetrycznej stwierdzono pozytywne wyniki pomiaru zmiany poziomu zwierciadła wody w zbiorniku za pomocą wysokiej klasy przetwornika różnicy ciśnień, zamiast wcześniej stosowanej aparatury ze sprężonym powietrzem. Włączenie przetwornika do komputerowego systemu akwizycji i ob-

róbki danych umożliwia eliminację falowania wody zakłócającego pomiar.

3. Na podstawie analizy teoretycznej wykazano, że sposób wyznaczania składowej różnicy ciśnień pochodzącej od oporów hydraulicznych w metodzie Gibsona zgodnie z normą międzynarodową IEC 41 i amerykańską ASME PTC 18 nie jest poprawny – nie uwzględnia bowiem zmiany kierunku przepływu cieczy w przewodzie zamkniętym. Zaproponowano stosowną poprawkę, której słuszność potwierdzono doświadczalnie.
4. Na dokładność pomiaru metodą Winter-Kennedy'ego bardzo duży wpływ ma komputerowe uśrednianie mierzonej różnicy ciśnień o dużej fluktuacji.

## Literatura

- [1] Adamkowski A.: *Pomiar natężenia przepływu metodą Gibsona w Elektrowni Wodnej Bielkowo*, V Sesja Naukowo-Techniczna „Elektrownia Wodna w Systemie Elektroenergetycznym”, Solina-Myczkocze, 1998.
- [2] Adamkowski A., Steller J.: *Performance and diagnostic tests on hydraulic gensets in Polish hydro power plants*. Trans. IF-FM, No. 105, 1999, pp. 47-66
- [3] Adamkowski A., Janicki W.: *Wyniki badania wpływu upustowego strumienia cieczy maszyny wirowej na przebieg uderzenia hydraulicznego*, Zeszyt Naukowy IMP PAN, nr 513/1472/2000, Gdańsk 2000, str. 44.
- [4] Berny R., Slota R.: *HYDRO 11 integrated system for hydrometric data processing and discharge calculation in open channels and closed conduits*, Międzynarodowa Konferencja HYDROFORUM'2000, Czorsztyn, 18-20.10.2000, str. 247-274.
- [5] Brand, F.: *Die messtechnische Ausrüstung für Untersuchungen in hydraulischen Anlagen*, Voith Forschung und Konstruktion, H. 30 (1984), Aufsatz 7.2.
- [6] Gibson, N.R.: *The Gibson method and apparatus for measuring the flow of water in closed conduits*, ASME Power Division, 1923, pp. 343-392.
- [7] Gibson, N.R.: *Experience in the use of the Gibson method of water measurement for efficiency tests of hydraulic turbines*, ASME Journal of Basic Engineering, 1959, pp. 455-487.
- [8] Michałowski S., Plutecki J.: *Energetyka wodna*, WNT Warszawa, 1975.
- [9] Steller J., Janicki W., Wasilewski J.: *Akwizycja i obróbka danych podczas pomiaru natężenia przepływu metodą młynkową*, Międzynarodowa Konferencja HYDROFORUM'2000, Czorsztyn, 18-20.10.2000, str. 275-286
- [10] Troskołański A.: *Hydrometry*, Pergamon Press Ltd., 1960.
- [11] IEC 41 (1991), International Standard: *Field acceptance tests to determine the hydraulic performance of hydraulic turbines, storage pumps and pump-turbines*.
- [12] ISO 748 (1997), International Standard: *Measurement of liquid flow in open channels*.
- [13] ISO 3354 (1988), International Standard: *Measurement of clean water flow in open closed conduits*.
- [14] ASME PTC 18 – 1992, An American National Standard: *Hydraulic Turbines. Performance Test Codes*.