

**Amadeusz WÓJCIK, Grzegorz PANKANIN**  
POLITECHNIKA WARSZAWSKA, INSTYTUT SYSTEMÓW ELEKTRONICZNYCH  
ul. Nowowiejska 15/19, 00-665 Warszawa

## Sposoby redukcji poboru energii w układzie przetwarzania sygnału dla przepływomierza wirowego

Inż. Amadeusz WÓJCIK

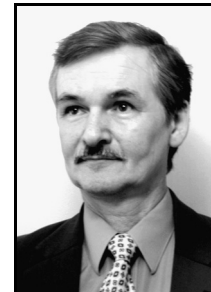
Ukończył studia inżynierskie na Wydziale Elektroniki i Techniki Informatycznych Politechniki Warszawskiej w 2009 r. Obecnie realizuje pracę magisterską na tym samym Wydziale w Instytucie Systemów Elektronicznych.



e-mail: A.Wojcik@stud.elka.pw.edu.pl

Dr hab. inż. Grzegorz PANKANIN

Ukończył studia na Wydziale Elektroniki Politechniki Warszawskiej w 1975 r., doktorat w 1984 r., habilitacja w 2009 r., Członek Zarządu Polskiej Sekcji IEEE, Członek Zarządu POLSPAR, Sekretarz Sekcji Mikrosystemów i Czujników Pomiarowych KMiAN PAN.



e-mail: GP227@ise.pw.edu.pl

### Streszczenie

W pracy przedstawiono koncepcję działania i realizację specjalizowanego układu przetwarzania sygnału dla przepływomierza wirowego o zredukowanym poborze energii. Omówiono zasadę działania przepływomierza wirowego ze szczególnym uwzględnieniem właściwości sygnału pomiarowego. Zrealizowany układ przetwarzania sygnału umożliwia określenie jego częstotliwości nawet w przypadku występowania znacznych zakłóceń. Układ i jego oprogramowanie zoptymalizowano pod kątem oszczędności zużycia energii. Przeprowadzono analizę zużycia energii w poszczególnych fazach pracy i uzyskany wynik zweryfikowano eksperymentalnie.

**Słowa kluczowe:** przepływomierz wirowy, przetwarzanie sygnału pomiarowego, oszczędność energii.

### Reduction in energy consumption in a signal processing system for vortex meter

#### Abstract

A signal processing system for a vortex meter with reduced energy consumption is presented in the paper. The principle of operation of the vortex meter as well as the measuring signal properties are described. The designed signal processing system consists of two parts: analogue and digital ones. The analogue part is composed of two parallel channels. In order to determine the signal frequency reliably, the special software has been applied. On the basis of the signal magnitude and its initially measured frequency, the decision-making algorithm enables determination of the signal frequency. Due to application of the proposed new method of counting the full periods and measuring time (of these full periods), the counting error in frequency measurements can be strongly reduced. The hardware and software of the system has been optimised from the point of view of supply energy savings. The essential favourable factor for energy saving is the cyclic mode of operation. Measurements are taken every 5 minute. It is possible due to the observed fact that the flow rate in real industrial circumstances never changes in the sudden manner. The analysis of energy consumption in separate phases of the system operation has been performed. The obtained results have been experimentally verified. Moreover, it can be stated that the system can operate on one set of batteries over one year.

**Keywords:** vortex meter, signal processing, energy savings.

## 1. Wprowadzenie

Dążenie do ograniczania energii zużywanej przez urządzenia elektryczne i elektroniczne jest powodowane względami zarówno ekologicznymi jak i ekonomicznymi. W przypadku pewnej klasy urządzeń stanowi też warunek ich mobilności. Ograniczenie zużycia energii do poziomu umożliwiającego zastosowanie zasilania bateryjnego pozwala na konstruowanie urządzeń przenośnych, które mogą być instalowane w miejscach bez dostępu do sieci energetycznej.

W przypadku przepływomierzy zagadnienie ograniczania zużycia energii, a w szczególności zapewnienia mobilności było w literaturze stosunkowo rzadko poruszane. Jest to związane częściowo z charakterem pomiarów przepływu – przepływomierze montuje się zazwyczaj na stałe w instalacjach przemysłowych, a konieczność pomiarów za pomocą urządzeń mobilnych stanowiła wąski margines potrzeb. Jednak w sytuacji rozwoju przede wszystkim elementów elektronicznych o małym poborze mocy i łączności bezprzewodowej pojawiły się nowe możliwości i potrzeby realizacji urządzeń zasilanych bateryjnie.

W artykule opisano opracowany system przetwarzania sygnału pomiarowego dla przepływomierza wirowego. System składa się z części analogowej i cyfrowej. W celu oszczędności energii pobieranej przez system zastosowano rozwiązania sprzętowe jak i programistyczne. Zaimplementowano też „energooszczędnościowy” tryb prowadzenia pomiarów. Dzięki temu uzyskano możliwość pracy systemu przez okres ponad 1 roku bez wymiany baterii.

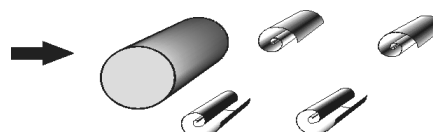
## 2. Przepływomierz wirowy

Zasada działania przepływomierza wirowego polega na wykorzystaniu zjawiska generacji ścieżki wirowej von Karmana na przeszkodzie umieszczonej w poprzek rurociągu prostopadle do kierunku przepływu cieczy [1]. Wiry powstają naprzemiennie po obu stronach przeszkody. Częstotliwość powstawania tych wirów jest liniową funkcją prędkości przepływu zgodnie z zależnością:

$$f = S_T \frac{v}{d} \quad (1)$$

gdzie:  $f$  – częstotliwość powstawania wirów,  $S_T$  – liczba Strouhala,  $v$  – prędkość płynu,  $d$  – wymiar charakterystyczny przeszkody.

Istotną cechą tego zjawiska jest niezależność częstotliwości wirów od właściwości fizycznych medium takich jak lepkość, gęstość czy temperatura, a nawet od tego, czy medium stanowi ciecz czy gaz.



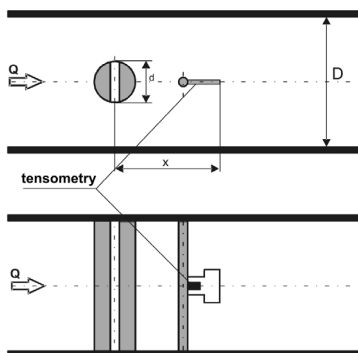
Rys. 1. Ścieżka wirowa von Karmana  
Fig. 1. Karman vortex street

W literaturze światowej można spotkać liczne prace dotyczące konstrukcji elementu generującego wiry [2-6].

Wiry są lokalnymi zaburzeniami prędkości i ciśnienia, które trzeba zdetekować i zamienić na sygnał elektryczny. Temu służy

przetwornik drugiego stopnia – detektor wirów. Działa on na zasadzie detekcji fluktuacji ciśnienia bądź prędkości. Stąd detektory wirów można podzielić na prędkościowe i ciśnieniowe. Również temu zagadnieniu poświęcono wiele prac [3,4,7]. Istotnym problemem okazuje się też usytuowanie detektora wirów względem przetwornika pierwszego stopnia [8, 9].

W zrealizowanym modelu przepływomierza zastosowano przetwornik tensometryczny pletwowy (rys.2.), w którym przepływające wiry powodują okresowe naprężenia pletwy [10]. Obustronnie naklejone na niej tensometry zmieniają swoją rezystancję w takt przepływających wirów.



Rys. 2. Konfiguracja czujnika pomiarowego  
Fig. 2. Meter configuration

Sygnal uzyskany z przetwornika drugiego stopnia musi być następnie przetworzony w ten sposób, aby można było wiarygodnie zmierzyć jego częstotliwość będącą miarą strumienia objętości.

### 3. Układ przetwarzania sygnału i danych pomiarowych

#### 3.1. Uwarunkowania

Sygnal z detektora wirów jest generowany przez zjawisko fizyczne, dlatego posiada on cechy sygnału stochastycznego takie jak fluktuacje okresu oraz amplitudy [11]. Amplituda tego sygnału jest niewielka i jednocześnie zależna od strumienia objętości płynu. Częstotliwość sygnału pomiarowego będąca częstotliwością powstających wirów zawiera się w zakresie od kilku do kilkuset Hz. Sygnal pomiarowy w tym zakresie w sposób istotny zmienia swoje właściwości. O ile dla małych prędkości przepływu sygnał osiąga kształt zbliżony do sinusoidalnego, to wraz ze wzrostem prędkości przepływu cieczy w sygnale mogą pojawić się znaczne składowe niskoczęstotliwościowe leżące w paśmie pomiarowym przepływomierza.

Stwarza to dodatkowe problemy, które trzeba rozwiązać, aby można było w sposób jednoznaczny zmierzyć częstotliwość generowanych wirów i w efekcie wyznaczyć strumień objętości w całym zakresie jego zmienności.

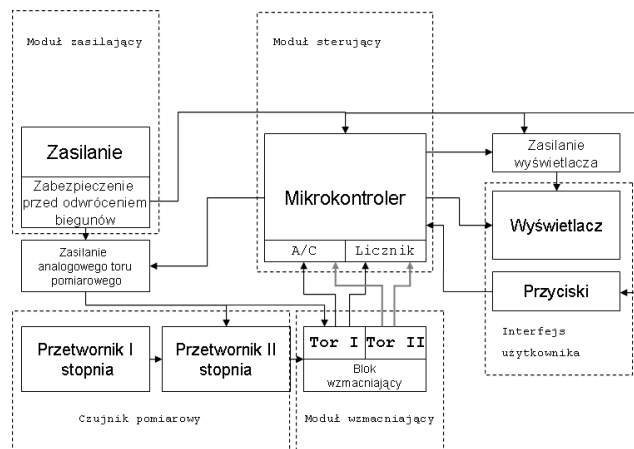
#### 3.2. Schemat blokowy

Schemat blokowy zrealizowanego układu przedstawiono na rys. 3. Rolę modułu sterującego pełni mikrokontroler. W czasie gdy urządzenie nie jest wykorzystywane, zadaniem mikrokontrolera jest wyłączenie pozostałych modułów i oczekiwanie na zgłoszenie żądania wykonania pomiaru. Wykonanie pomiaru może być zgłoszone na dwa sposoby: poprzez otrzymanie sygnału z interfejsu użytkownika lub wewnętrznie przez moduł sterujący (w sytuacji gdy pomiar ma odbywać się cyklicznie). W drugim przypadku w mikrokontrolerze uruchomiony jest zegar, który każdorazowo odlicza czas do kolejnego pomiaru.

Gdy pomiar nie jest wykonywany, mikrokontroler pozostaje w stanie uśpienia. Wyłączone jest zasilanie analogowego toru

pomiarowego oraz wyświetlacza. W stanie tym mikrokontroler nie wykonuje żadnych obliczeń, oczekuje jedynie na zgłoszenie żądania pomiaru.

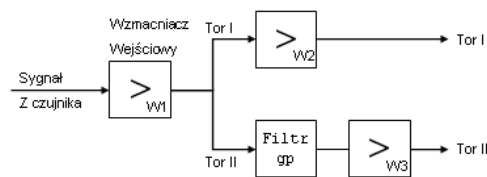
Sekwencja pomiarowa rozpoczyna się od włączenia zasilania modułu wzmacniającego oraz przetwornika II stopnia. Następnie sygnały z bloku wzmacniaczy są odbierane w mikrokontrolerze. Po przeprowadzeniu pomiaru mikrokontroler wyłącza zasilanie toru analogowego. Następuje przetwarzanie danych i wyliczana jest wartość strumienia objętości. Następnie włączone zostaje zasilanie wyświetlacza i przedstawienie wyniku. Mikrokontroler odlicza czas 5 sekund, aby użytkownik mógł zapoznać się z wynikiem, po czym wyłącza zasilanie wyświetlacza i powraca do stanu uśpienia. Aby zmniejszyć pobór prądu przez wyświetlacz oraz analogowy tor pomiarowy wykorzystano bloki odcinające dopływ prądu w chwilach, gdy moduły te nie są wykorzystywane.



Rys. 3. Schemat blokowy układu  
Fig. 3. Block diagram

#### 3.3. Pomiar częstotliwości

Ze względu na charakterystyczne właściwości sygnału z detektora wirów (p.3.1) zastosowano układ redundancyjny zawierający w części analogowej dwa toru pomiarowe. Schemat blokowy części analogowej układu przetwarzania sygnału przedstawiono na rys. 4.



Rys. 4. Część analogowa układu przetwarzania sygnału  
Fig. 4. Signal processing system – analogue part

Sygnal z detektora wirów zostaje wstępnie wzmacniony w układzie W1 i jest podawany na wejście dwóch toru pomiarowych. Tor I dedykowany jest niskim częstotliwościom sygnału (małe prędkości przepływu). Po wzmacnieniu przez wzmacniacz szerokopasmowy W2 sygnał zostaje podany na wejście przetwornika A/C oraz na wejście przerzutnika Schmitta.

Z kolei tor II przeznaczony jest dla sygnałów uzyskiwanych przy większych prędkościach przepływu, przy których składowa niosąca informację o prędkości przepływu może być zakłócona składową niskoczęstotliwościową. Z tego powodu na wejściu toru II zastosowano filtr górnoprzepustowy tłumiący te zakłócenia. Podobnie jak dla toru I sygnał z toru II zostaje równolegle przetworzony na falę prostokątną przez przerzutnik Schmitta jak i sprobkowany przez przetwornik A/C.

Zadaniem mikrokontrolera jest równoległe zliczanie impulsów z obydwu torów oraz przetwarzanie i zapisywanie w pamięci RAM cyfrowej reprezentacji sygnałów analogowych również z obu torów. Wszystkie operacje są przeprowadzane w tym samym czasie tak, aby zminimalizować czas przebywania układu w stanie aktywnym a tym samym ograniczyć całkowity pobór prądu.

Istotnym elementem działania systemu mikroprocesorowego jest tryb decyzyjny dotyczący wyboru wyniku pomiaru częstotliwości. Jest on wspomagany posiadaniem przez system informacji również o amplitudzie sygnału pomiarowego. Jeśli amplituda jest dostatecznie duża ( $> 0,6V$ ) to mogą być wykorzystane najprostsze sposoby wyznaczania częstotliwości oparte o zliczanie impulsów. W pierwszej kolejności jest analizowany wynik uzyskany w torze II, gdzie występuje filtr górnoprzepustowy o częstotliwości granicznej ok. 40 Hz. Jeśli uzyskany wynik jest większy niż 40 Hz, to jest on uznawany jako poprawny. Natomiast gdy jest mniejszy niż 40 Hz, to analizuje się wynik z toru I i jeśli uzyskana wartość częstotliwości zawiera się w granicach  $<5Hz; 40Hz>$ , to jest ona uznawana za poprawną. W sytuacji, gdy częstotliwość sygnału jest mniejsza niż 5 Hz bądź jego amplituda nie osiąga wartości 0,6V, wykorzystuje się bardziej złożone metody przetwarzania. W tym celu korzysta się z cyfrowej reprezentacji sygnałów z obu torów pomiarowych zgromadzonym w pamięci mikrokontrolera dzięki zastosowaniu przetwarzania analogowo-cyfrowego. Zaimplementowane w oprogramowaniu mikrokontrolera: cyfrowy przerzutnik Schmitta i dyskretna transformata Fouriera pozwalają na skuteczne wyznaczanie częstotliwości nawet w przypadku sygnałów o słabej jakości. Wykorzystanie dyskretnej transformaty Fouriera jest związane z większą złożonością obliczeniową, a więc i dłuższym czasem pracy układu w stanie aktywnym, ale stanowi swiste „koło ratunkowe”, gdy inne metody zawiodą. Wyniki testowania systemu przedstawione w [12] pokazują, że efektywny błąd pomiaru częstotliwości nie przekracza w zasadzie 0,25%. Jedyne, w przypadku konieczności skorzystania z algorytmu DFT (gdzie sygnał jest bardzo słabej jakości) błąd dla bardzo małych częstotliwości może wzrosnąć do 4%.

#### 4. Redukcja zużycia energii

W celu maksymalnego ograniczenia zużycia energii przez układ pomiarowy, wykorzystano trzy różne drogi prowadzące do osiągnięcia tego celu, a mianowicie:

- okresowe wykonywanie pomiarów,
- wykorzystanie elementów o małym poborze prądu,
- wyłączanie modułów urządzenia, które w danym momencie nie są wykorzystywane.

Z punktu widzenia poboru prądu, praca układu może być podzielona na 4 fazy: fazę czuwania, fazę pomiaru, fazę przetwarzania i fazę wyświetlania. Podczas fazy czuwania jedyny znaczący prąd pobiera mikrokontroler. Pozostałe układy są odłączone od zasilania. W fazie pomiaru oprócz mikrokontrolera (2,7 mA) włączone zostaje zasilanie przetwornika tensometrycznego (2 mA) oraz układu wzmacniacza (2,5 mA). W fazie przetwarzania prąd jest pobierany jedynie przez mikrokontroler, natomiast w fazie wyświetlania decydujący wpływ na pobór prądu ma wyświetlacz. Przez pozostały czas mikrokontroler może przebywać w fazie uśpienia.

Tab. 1. Zużycie energii przez układ  
Tab. 1. Energy consumption by the system

	oszacowanie			pomiar		
	I	t	Q	I	t	Q
	A	s	mAs	A	s	mAs
faza czuwania	5 $\mu$	300	1,5	12 $\mu$	300	3,6
faza pomiaru	7,2 m	5	36	8,8 m	5	44
faza przetwarzania	2,7 m	5	13,5	2,7 m	3,55	9,8
faza wyświetlania	50 $\mu$	5	0,25	100 $\mu$	5	0,5
<b>Razem</b>			<b>51,3</b>			<b>57,9</b>

Do oszacowania poboru prądu przez układ przyjęto następujące założenia:

- pomiar wykonywany jest co 5 minut w czasie 1 s,

- oczekiwanie na ustalenia napięć wynosi 4 s,
- czas przetworzenia wyniku wynosi 5 s,
- czas wyświetlania wyniku wynosi 5 s.

W tabeli 1. przedstawiono zestawienie szacowanego i zmierzonego zużycia energii przez układ przetwarzania sygnału i danych w poszczególnych fazach jego pracy.

#### 5. Podsumowanie

Dzięki zastosowaniu rozwiązań zarówno programistycznych jak i doborowi odpowiednich podzespołów udało się w znaczący sposób ograniczyć pobór energii do zasilania układu. Szczególnie efektywna okazała się koncepcja włączania poszczególnych bloków układu wyłącznie na czas niezbędny do realizacji konkretnych zadań. Osobnym problemem jest interpretacja wskazań urządzenia, gdy pracuje ono jako licznik płynu. Trzeba jednak zauważyć, że przepływ w rzeczywistych instalacjach nie zmienia się gwałtownie, a więc na podstawie wyników pomiarów wykonywanych cyklicznie z pewnym odstępem czasu można z zadowalającą wiarygodnością wnioskować o objętości płynu.

Warto też podkreślić, że zrealizowany system pomiarowy umożliwia pomiar parametrów przepływu nawet w przypadku, gdy sygnał pomiarowy jest słabej jakości. Dzięki zaimplementowanemu w systemie rozwiązaniu sprzętowemu (dwa równoległe tory analogowe, dwa liczniki, dwa przetworniki analogowo-cyfrowe), programistycznym, a także zastosowaniu metody pomiaru częstotliwości eliminującej w zasadzie błąd dyskretyzacji, uzyskano bardzo dobrą dokładność i wiarygodność uzyskanych wyników. W efekcie pogodzone oszczędne zużycie energii przez system ze znaczną złożonością realizowanych przez niego funkcji.

*Praca naukowa finansowana przez MNiSzW ze środków na naukę w latach 2009-2011 jako projekt badawczy nr 3600/T02/2009/36.*

#### 6. Literatura

- [1] Pankanin G. L.: The Vortex Flowmeter: Various Methods of Investigating Phenomena – Measurement Science and Technology 16 No 3 (2005) R1-R16 (Review article).
- [2] Cousins T., Foster S.A., Johnson P.A.: A linear and accurate flowmeter using vortex shedding, Proc. Power Fluid for Process Control Symposium, Inst. Measurement and Control, Guildford 1973, UK, pp. 45-46.
- [3] Miller R.W., De Carlo J.P., Cullen J.T.: A vortex flowmeter – calibration results and application experience, Proc. Flow-Con 1977, Brighton, UK.
- [4] Lomas D.J.: Vortex flowmetering challenges the accepted techniques, Control & Instrumentation, July/August 1975.
- [5] Igarashi T.: Flow characteristics around a circular cylinder with a slit (1st report, Flow control and flow patterns), Bulletin of the JSME, No 154, (1978), pp. 656-664.
- [6] Popiel, C.O., Robinson D.I., Turner J.T.: Vortex shedding from a circular cylinder with a slit and concave rear surface, Applied Scientific Research, 51, 1993, pp. 209-215.
- [7] Menz B.: Vortex flowmeter with enhanced accuracy and reliability by means of sensor fusion and self-validation, Measurement 22 (1997) pp. 123-128.
- [8] Zheng D., Zhang T., Hu Y.: Experimental Investigations of the Location of a Piezoelectric Probe in a Vortex Flow Sensor, Meas. & Science Technology, 18 (2007) pp. 3777-3783.
- [9] Pankanin G.L.: Influence of Vortex Meter Configuration on Measure Signal Parameters, Proc. of IEEE Instrumentation & Measurement Technology Conference, Irvine, California, 1993, pp. 337-34.
- [10] Pankanin G.L.: Optimization of Vortex Meter with Separate Sensor – Proc. of International Conference on Flow Measurement of Commercially Important Fluids, London 1990, UK.
- [11] Amadi-Echendu J.E., Zhu H.: Signal Analysis Applied to Vortex Flowmeters, IEEE Trans. on Instr. and Meas., vol. 41, No 6, Dec. 1992, pp. 1001-1004.
- [12] Pankanin G., Wójcik A.: Pomiar częstotliwości sygnału pomiarowego z czujnika przepływomierza wirowego – Elektronika: konstrukcje, technologie, zastosowania, 2009. z. 8. ss. 232-235.

otrzymano / received: 09.08.2010  
przyjęto do druku / accepted: 01.10.2010

artykuł recenzowany