

Łukasz ZAWORSKI, Jarosław CZOKÓW, Leszek WYDŹGOWSKI
 UNIwersytet MIKOŁAJA KOPERNIKA, INSTYTUT FIZYKI

Układ scalony do pomiaru czasu w przepływomierzu ultradźwiękowym

Mgr inż. Łukasz ZAWORSKI

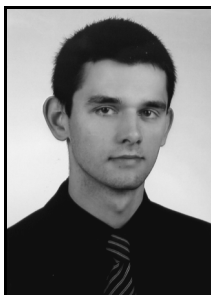
W 2006 r. ukończył studia magisterskie na Wydziale Fizyki, Astronomii i Informatyki Stosowanej Uniwersytetu Mikołaja Kopernika w Toruniu. Obecnie kontynuuje naukę w Studium Doktoranckim przy Instytucie Fizyki UMK. W tym samym roku rozpoczął współpracę z firmą APATOR S.A. Jego obszar zainteresowań naukowych to zagadnienia związane z pomiarem mediów, w szczególności ultradźwiękowy pomiar przepływu cieczy.



e-mail: zavor@fizyka.umk.pl

Mgr inż. Jarosław CZOKÓW

W 2006 r. ukończył studia magisterskie na Wydziale Fizyki, Astronomii i Informatyki Stosowanej Uniwersytetu Mikołaja Kopernika w Toruniu. Obecnie kontynuuje naukę w Studium Doktoranckim przy Instytucie Fizyki UMK. W tym samym roku rozpoczął współpracę z firmą APATOR S.A. Główne zainteresowania naukowe to projektowanie układów scalonych oraz metrologia czasu.



e-mail: jarczok@fizyka.umk.pl

Mgr inż. Leszek WYDŹGOWSKI

W 2004r. ukończył studia magisterskie na Wydziale Fizyki, Astronomii i Informatyki Stosowanej Uniwersytetu Mikołaja Kopernika w Toruniu. Obecnie kontynuuje naukę na studiach doktoranckich przy Instytucie Fizyki UMK. W roku 2002 rozpoczął współpracę z firmą APATOR S.A. Jego obszar zainteresowań naukowych to zagadnienia związane z pomiarem mediów, a w szczególności pomiar energii elektrycznej.



e-mail: lehu@fizyka.umk.pl

Streszczenie

Jedną z zasadniczych części przepływomierza ultradźwiękowego jest układ elektroniczny mierzący czas przejścia impulsu pomiędzy przetwornikami ultradźwiękowymi. Minimalna wartość mierzonego strumienia przepływu zależy od rozdzielczości pomiaru czasu. W referacie przedstawiono metody pomiaru czasu w przepływomierzach ultradźwiękowych wykorzystujących metodę pomiaru odcinka czasowego. W szczególności przedstawiono koncepcję układu scalonego CMOS dedykowanego do pomiaru czasu w przepływomierzach ultradźwiękowych, mających zastosowanie w pomiarach małych strumieni przepływu.

Słowa kluczowe: przepływomierz ultradźwiękowy, konwerter czas-cyfra, metrologia czasu.

Time measuring circuit for ultrasonic flow-meter

Abstract

One of a most important parts of ultrasonic flowmeter is electronic circuit, which measures transit time of the ultrasonic signals. Minimal value of measured flow rate depends on resolution of time-to-digital converter. In this paper methods of time-interval measurement in ultrasonic flowmeter are described. Implementation of chosen method in CMOS technology is discussed. Expected quantization error of time-to-digital converter is 174 ps and expected resolution of transit – time measurement using sing-around method is 15 ps.

Keywords: ultrasonic flowmeter, time-to-digital converter, time measurement.

1. Wstęp

Istnieją dwie podstawowe metody pomiaru strumienia z wykorzystaniem ultradźwięków. Pierwsza grupa przepływomierzy ultradźwiękowych wykorzystuje zjawisko Dopplera. Częstotliwość fali ultradźwiękowej ulega zmianie na skutek odbicia się od cząstek stałych, lub pęcherzyków gazu unoszonych przez medium. Wartość przesunięcia dopplerowskiego częstotliwości zależy od prędkości poruszania się tych obiektów, która jest równa prędkości ośrodka w danym punkcie profilu prędkości. Strumień przepływu wyznaczany jest na podstawie analizy widma odbitego sygnału ultradźwiękowego. Z tej zasady działania wynikają

ograniczenia zastosowania przepływomierzy dopplerowskich do pomiaru przepływu cieczy unoszących cząstki stałe lub pęcherzyki gazu. Druga grupa przepływomierzy ultradźwiękowych, opisana szerzej w poniższym artykule, wykorzystuje efekt względnej zmiany prędkości fali w poruszającym się ośrodku. Zastosowanie tej metody możliwe jest w każdym medium, w którym rozchodzą się fale ultradźwiękowe. Główną zaletą przepływomierzy z tej grupy jest brak ruchomych części zużywających się podczas pracy. Możliwe jest także umieszczenie sond tak, by nie miały bezpośredniego kontaktu z mierzonym medium, co ma znaczenie w pomiarach przepływu cieczy agresywnych.

2. Zasada działania przepływomierza ultradźwiękowego

W układzie odniesienia związanego z nieruchomym obserwatorem efektywna prędkość v_{ef} poruszania się impulsu ultradźwiękowego jest sumą prędkości c rozchodzenia się fal ultradźwiękowych w danym ośrodku i prędkości v ośrodka:

$$\vec{v}_{ef} = \vec{c} + \vec{v}. \quad (1)$$

Czas przejścia pomiędzy przetwornikami ultradźwiękowymi po drodze L (rys. 1a) zgodnie i przeciwnie do kierunku przepływu wynoszą odpowiednio:

$$t_1 = \frac{L}{c + v \cos \alpha}, \quad (2)$$

$$t_2 = \frac{L}{c - v \cos \alpha}, \quad (3)$$

gdzie: α jest kątem pomiędzy wektorem prędkości przepływu a drogą L (rys. 1a).

Stąd prędkość przepływu v można wyznaczyć na podstawie zależności:

$$v = \frac{L}{2 \cos \alpha} \left(\frac{t_2 - t_1}{t_1 t_2} \right). \quad (4)$$

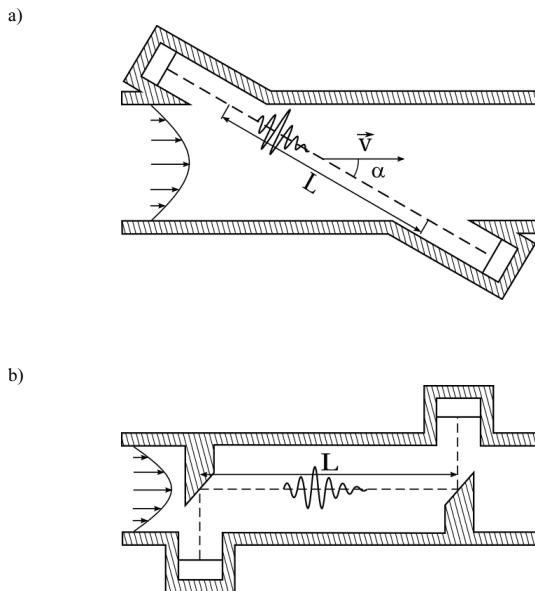
Dla przetworników umieszczonych osiowo (rys. 1b) wzór (4) upraszcza się do:

$$v = \frac{L}{2} \left(\frac{t_2 - t_1}{t_1 t_2} \right). \quad (5)$$

Ponieważ $c \gg v$, iloczyn $t_1 t_2$ można przybliżyć przez L^2/c^2 , a zależność (5) można przekształcić do postaci:

$$v \approx \frac{c^2}{2L} \Delta t, \quad (6)$$

gdzie: $\Delta t = t_2 - t_1$.



Rys. 1. Przepływomierz ultradźwiękowy: a) z sondami umieszczonymi po przekątnej, b) z sondami umieszczonymi osiowo
Fig. 1. Ultrasonic flowmeter a) diagonal path b) axial path

3. Pomiar czasu w przepływomierzach ultradźwiękowych

Wyrażenie (5) jest niezależne od prędkości rozchodzenia się ultradźwięków w ośrodku. Korzystając z tej zależności na podstawie pomiarów czasów t_1 i t_2 możliwe jest wyznaczenie chwilowej prędkości przepływu, uśrednionej po odcinku drogi L , co po uwzględnieniu profilu prędkości pozwala na wyznaczenie strumienia przepływu.

Początek pomiaru czasu określany jest przez moment wysłania impulsu ultradźwiękowego przez przetwornik pełniący rolę nadajnika, a koniec przez odebranie impulsu przez drugą sondę ultradźwiękową.

Ze względu na konstrukcję korpusu sondy ultradźwiękowe zamocowane są w zagłębieniach, w których prędkość przepływu v cieczy jest w przybliżeniu równa zero. W przypadku sond umieszczonych osiowo droga fali ultradźwiękowej przebiega przez obszar w którym wektor prędkości przepływu jest prostopadły do wektora prędkości poruszania się ultradźwięków. Z tego powodu mierzone są czasy t_1' i t_2' zawierające dodatkowe opóźnienia t_{d1} i t_{d2} . Przy wyznaczaniu czasów t_1 i t_2 należy także uwzględnić czasy propagacji sygnału przez układ elektroniczny, przewody i sondy ultradźwiękowe t_{el1} i t_{el2} . Podsumowując, czasy t_1 i t_2 opisane są następującymi wzorami:

$$t_1 = t_1' - t_{el1} - t_{d1}, \quad (7)$$

$$t_2 = t_2' - t_{el2} - t_{d2}. \quad (8)$$

Pomiar czasów t_1' i t_2' jest możliwy korzystając z jednej pary przetworników, które po pomiarze czasu t_1 zamieniają się funkcjami, lub wykorzystując dwie pary przetworników ultradźwiękowych, które mierzą oba czasy przejścia jednocześnie, na dwóch drogach.

Rozdzielczość, jaką powinien się charakteryzować układ mierzący czas określona jest przez wymiary przepływomierza oraz przez zakres mierzonych przepływów.

W dużych przepływomierzach przemysłowych, ze względu na dużą prędkość przepływu medium (rzędu 1 m/s) różnica czasów jest rzędu dziesiątych części mikrosekundy i może być łatwo zmierzona. Dla pomiaru bardzo małych przepływów, rzędu $0,01 \text{ m}^3/\text{h}$, różnica czasów Δt wynosi około 2 ns. Szacowana rozdzielczość układu mierzącego czas powinna wynosić 15 ps.

Aby zwiększyć rozdzielczość pomiaru czasów t_1 i t_2 stosowana jest metoda „sing-around” [1]. W tej metodzie pomiar realizowany jest w następujący sposób: początek pomiaru czasu t_{K1} określony jest przez wysłanie impulsu ultradźwiękowego przez nadajnik. Po odebraniu pierwszego wysłanego impulsu, układ elektroniczny automatycznie wyzwała wysłanie kolejnego. Taki cykl powtarzany jest od kilkudziesięciu do kilkuset razy, a koniec pomiaru czasu t_{K1} określony jest przez odebranie przez odbiornik ostatniego impulsu. Następnie przetworniki zamieniane są funkcjami i w analogiczny sposób mierzony jest czas t_{K2} dla impulsów poruszającego się po drodze L w przeciwnym kierunku. Czasy t_1 i t_2 mogą być wyznaczone na podstawie czasów t_{K1} i t_{K2} :

$$t_1 = \frac{t_{K1}}{K} - t_{p1}, \quad (7)$$

$$t_2 = \frac{t_{K2}}{K} - t_{p2}, \quad (8)$$

gdzie: K jest liczbą powtórzeń pętli nadawania-odbioru, a t_{p1} i t_{p2} są poprawkami uwzględniającymi dodatkowe opóźnienia.

Rozdzielczość pomiaru czasów t_1 i t_2 jest K razy większa niż rozdzielczość układu mierzącego czasy t_1' i t_2' . Dodatkową zaletą metody „sing-around” jest uśrednienie błędów przypadkowych pochodzących od szumu sygnału i fluktuacji przepływu. Wadą jest K krotnie wydłużenie czasu pomiaru.

Znając wartość prędkości c , do wyznaczenia prędkości przepływu można skorzystać z wyrażenia (6). W tej sytuacji wymagany jest tylko pomiar różnicy czasów Δt , co skraca wymagany zakres pomiarowy przetwornika czas – cyfra w porównaniu do bezpośredniego pomiaru czasów t_1 i t_2 . W tym przypadku oba przetworniki jednocześnie nadają sygnał, po czym przechodzą w tryb odbioru. Pierwszy wykryty impuls określa początek, a drugi – koniec pomiaru czasu. W [2] przedstawiono układ scalony dedykowany do pomiaru różnicy czasów Δt , wykorzystujący metodę podobną do „sing-around”, także pozwalającą na osiągnięcie rozdzielczości większej niż błąd kwantyzacji przetwornika czas - cyfra. Kondensator ładowany jest P -krotnie przez czas Δt , a następnie mierzony jest czas rozładowania kondensatora R razy mniejszym prądem (metoda analogowej ekspansji czasu). Pozwoliło to na osiągnięcie rozdzielczości 10 ps i błędu przypadkowego 15 ps, czas pomiaru jest jednak znacznie wydłużony.

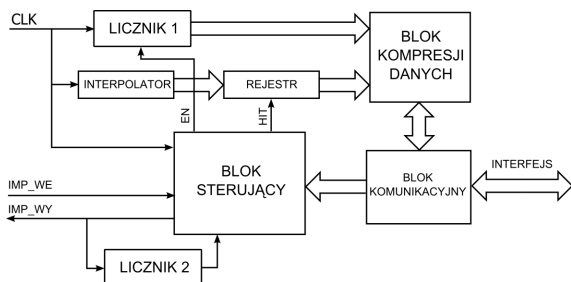
Innym podejściem do pomiaru czasu w przepływomierzu jest zastosowanie metod cyfrowych. W tym przypadku sygnał z odbiornika, od określonej chwili czasu po nadaniu, jest przetwarzany do postaci cyfrowej i rejestrowany. Dwa ciągi próbek, odpowiadające sygnałom dla impulsu poruszającego się w obie strony są poddawane operacjom matematycznym mającym na celu wyznaczenie różnicy czasów Δt . Ze względu na dobre wyniki osiągane dla przebiegów o małym stosunku sygnału do szumu, metody cyfrowe stosowane są głównie dla ośrodków charakteryzujących się dużym tłumieniem fal ultradźwiękowych, np. w pomiarach przepływu gazu [3].

4. Projektowany układ pomiarowy

Zadaniem przedstawionego projektowanego układu scalonego jest pomiar czasu przejścia impulsu ultradźwiękowego w przepływomierzu. Do zwiększenia rozdzielczości pomiaru czasu pojedynczego przejścia impulsu wykorzystano metodę „sing-around”.

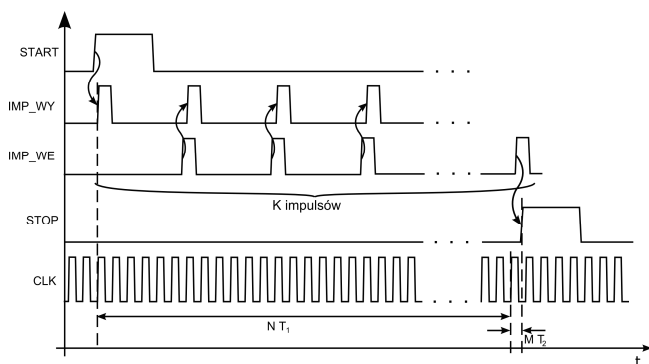
Układ projektowany jest w technologii CMOS AMS 0.35 μm . Na rys. 2 przedstawiony jest jego schemat blokowy. Od układu mierzącego odcinek czasowy wymaga się jednocześnie dużego zakresu pomiarowego (rzędu kilkudziesięciu ms) oraz rozdzielczości pomiaru (rzędu kilkuset ps). Zgrubny pomiar realizowany jest za pomocą licznika 1 zliczającego liczbę N okresów T_1 zegara CLK, tak jak w klasycznej metodzie licznikowej (rys. 3). Aby osiągnąć rozdzielczość pomiaru większą niż okres zegara CLK, który wynosi ~ 5.5 ns, zastosowana została linia opóźniająca

z odczepami [4]. Przy jej użyciu dokonywana jest interpolacja pomiędzy sąsiednimi impulsami sygnału zegarowego CLK (interpolator na rys. 2), co pozwala zmierzyć odcinek czasu od zbocza narastającego sygnału zegarowego do zbocza narastającego sygnału STOP z rozdzielczością T_2 interpolatora większą od okresu T_1 zegara CLK.



Rys. 2. Schemat blokowy
Fig. 2. Block diagram

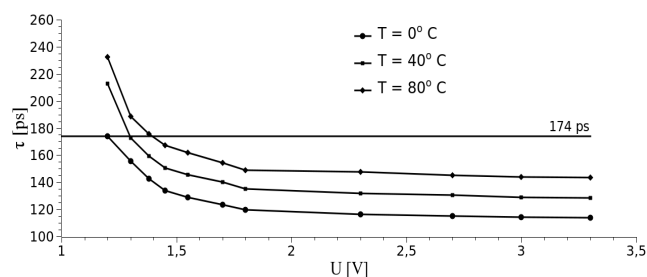
Linia opóźniająca składa się z 32 komórek opóźniających o opóźnieniu 174 ps. Aby uniezależnić opóźnienie linii od temperatury pracy oraz wahań napięcia zasilającego, linia jest stabilizowana w pętli DLL [5]. Wyniki symulacji zależności opóźnienia τ pojedynczej komórki od napięcia sterującego, dla różnych temperatur, przeprowadzone w środowisku CADENCE, przedstawiono na rys. 4. Symulacje wykazały, że założone opóźnienie komórki może zostać utrzymane w zakresie temperatur od 0°C do 80°C . W celu osiągnięcia zakładanej rozdzielczości pomiaru czasu pojedynczego przelotu (ok. 15 ps), konieczny jest pomiar co najmniej piętnastu przelotów. Dla przykładowego, przebadanego korpusu przepływomierza, w którym droga ultradźwięków wynosi w przybliżeniu 25 cm, otrzymano średni czas przelotu 180 us. Narzuca to wymaganie zakresu pomiarowego bliskiego 3 ms. Zastosowanie 22-bitowego licznika zliczającego okresy zegara CLK, pozwoli na osiągnięcie zakresu pomiarowego wynoszącego ponad 20 ms. Większy zakres pomiarowy niż wymagany, pozwoli na wybór optymalnej liczby przelotów podczas testowania samego prototypu.



Rys. 3. Diagram czasowy sygnałów wewnętrznych
Fig. 3. Time diagram of internal signals

Komunikacja projektowanego układu scalonego z resztą systemu pomiarowego odbywa się za pośrednictwem bloku komunikacyjnego. Jednym z zadań tego bloku jest przekazanie do układu sterującego sygnału inicjującego rozpoczęcie sekwencji pomiarowej. Sygnał ten został przedstawiony poglądowo na rys. 3 jako START. Po jego odebraniu układ sterujący zmienia stan na linii EN, synchronicznie z zegarem CLK, rozpoczynając tym samym proces zliczania okresów zegara CLK. Jednocześnie zostaje wygenerowany impuls wyjściowy IMP_WY, także zsynchronizowany z zegarem CLK, który ma za zadanie, za pośrednictwem układów wyjściowych, wzbudzić przetwornik ultradźwiękowy.

W konsekwencji tego, po czasie odpowiadającym czasowi przelotu fali ultradźwiękowej przez korpus przepływomierza, na wejściu IMP_WE, pojawia się impuls oznaczający dotarcie impulsu ultradźwiękowego do drugiego z przetworników. Po odebraniu tego impulsu układ sterujący wysyła kolejny impuls pobudzający przetwornik. Dzieje się tak do momentu aż licznik 2 zliczy zadaną ilość przelotów sygnału ultradźwiękowego K . Liczba przelotów K może zostać zadana za pośrednictwem bloku komunikacyjnego. Ostatni impuls na wejściu IMP_WE powoduje wyzwolenie sygnału HIT, zatrzymującego stan linii opóźniającej znajdującej się w interpolatorze. Jednocześnie zostaje zatrzymane zliczanie okresów zegara CLK poprzez zmianę stanu na linii EN. Zmiana ta dokonuje się również synchronicznie z sygnałem zegarowym CLK, aby zatrzymanie licznika nastąpiło, gdy znajduje się on w stanie stabilnym. Po zakończeniu pomiaru stan licznika N i interpolatora M odczytywane są za pośrednictwem bloku kompresji danych i bloku komunikacyjnego.



Rys. 4. Zależność opóźnienia τ komórki opóźniającej od napięcia sterującego U dla różnych temperatur T
Fig. 4. Propagation delay of delay cell as a function of control voltage for different temperatures

5. Podsumowanie

Symulacje potwierdziły, że przedstawiony projekt układu elektronicznego umożliwia pomiar czasu z rozdzielczością 174 ps. Zastosowanie metody „sing-around” pozwala na osiągnięcie zakładanej rozdzielczości pomiaru czasu pojedynczego przelotu impulsu, równej 15 ps. Rozdzielczość taka pozwala na sprostanie wymogom dokładności pomiaru stawianym przepływomierzom ultradźwiękowym mierzącym małe strumienie przepływu. Dalsze prace nad projektem toczą się dwutorowo i dotyczą zarówno projektowanego układu scalonego, jak również konstrukcji pozostałej części układu elektronicznego przepływomierza ultradźwiękowego.

6. Literatura

- [1] Hidekazu Asada, US Patent 3 710 621, Sing-around type ultrasonic measuring instrument
- [2] F. Riedel, R. Eusemann, A high resolution Time-to-Digital converter for ultrasonic flow measurement, Proceedings of the 25th European Solid-State Circuits Conference, 1999
- [3] N. Roosnek, Novel digital signal processing techniques for ultrasonic gas flow measurements, Flow Measurement and Instrumentation (11), 2000
- [4] J. Kalisz, Review of methods for time interval measurements with picosecond resolution, Metrologia (41), 2004
- [5] R. Baker, CMOS Circuit Design, Layout and Simulation, John Wiley and Sons Inc, 2005