Cyfrowy miernik częstotliwości z możliwością przesyłania wyników pomiaru przez sieć Internet

Digital Frequency Meter Sending The Measurement Results Via the LAN Network

Wojciech Kołton, Politechnika Śląska
Paweł Kielan, Politechnika Śląska

Abstract

The paper introduces a simple measuring server builded on the popular AVR microcontroller, providing the voltage and frequency measure.

The final proposed work is that the implementation of the NUT / OS witch influence to measurement algorithms and causes measurement errors. In addition, data transmission over the Internet can make such long delays, which prevent this medium in real-time measurement systems.

Streszczenie

W artykule tym zostanie przedstawiony prosty serwer pomiarowy zbudowany na popularnym mikrokontrolerze AVR, umożliwiający pomiar napięć oraz częstotliwości.

Dodatkowo przedstawione zostaną badania transmisji danych w sieci Internet, ze szczególnym uwzględnieniem ograniczeń (opóźnienia, straty pakietów) stosowania tego medium transmisyjnego w systemach pomiarowych czasu rzeczywistego.

W artykule opisano również system NUT/OS, który został zaimplementowany w zaprojektowanym mierniku częstotliwości oraz jaki ma wpływ na zakłócenia pracy algorytmów pomiarowych, i tym samym na błędy pomiarowe.

1. Wprowadzenie

W zastosowaniach pomiarowych coraz większą popularność zdobywają sieci komputerowe służące, jako medium do przekazywaniu pomiarów na odległość. Zaletą takiego rozwiązania jest możliwość wykorzystania taniej i sprawdzonej infrastruktury sieciowej, która często już istnieje. Rolę urządzenia monitorującego pełnią tu zazwyczaj komputery wyposażone w interfejs użytkownika, podczas gdy urządzeniami pomiarowymi mogą być proste układy mikroprocesorowe z zaimplementowanym stosem TCP/IP[1,2] i podłączonymi odpowiednimi kartami pomiarowymi. W celu poszerzenia wiedzy w tym zakresie, autorzy opracowali miernik częstotliwości, z możliwością przesyłania pomiarów przez Internet.

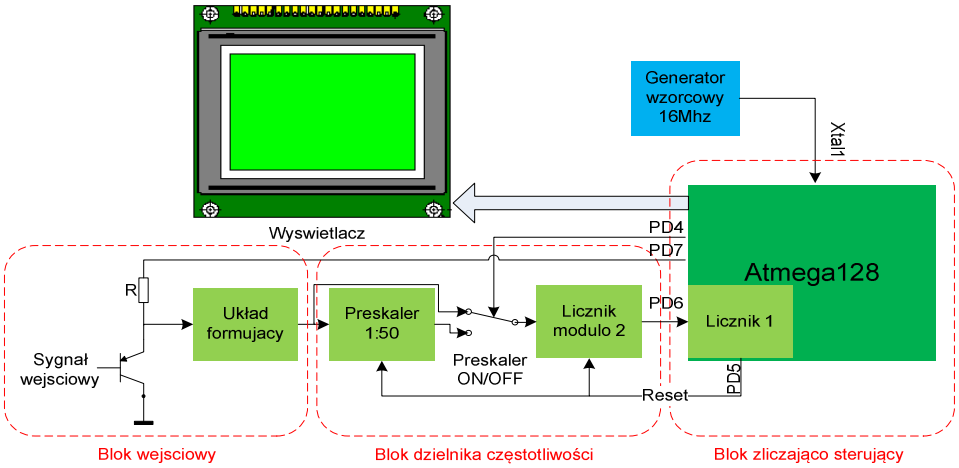
2. Projekt częstościomierza z możliwością przesyłania danych przez internet

W zaprojektowanym częstościomierzu, którego schemat blokowy przedstawiony jest na Rys. 1 można wyróżnić trzy zasadnicze bloki funkcyjne:

Blok wejściowy - zbudowano z tranzystora wysokiej częstotliwości pracującego w układzie wspólnego kolektora, oraz z układu formującego, którego zadaniem jest uformowanie przebiegu prostokątnego pozbawionego zakłóceń, o takim samym okresie jak sygnał wejściowy.

Blok dzielnika częstotliwości - składa się z preskalera 1:50 oraz licznika modulo dwa, które połączone w szereg zmniejszają częstotliwość wejściową 100 krotnie. Zadaniem licznika modulo 2 jest uzyskanie sygnału prostokątnego o wypełnieniu 50%. Jest to konieczne ze względu budowy licznika 1. Licznik ten nie zbudowano z przerzutników tylko z rejestrów, których wartości zależą od próbkowanych z częstotliwością generatora wzorcowego stanów na wejściu PD6. Dodatkowo trzeba zaznaczyć, że maksymalna częstotliwość podawana na wejście licznika 1 przy, której będzie on prawidłowo pracował nie może być większa od połowy częstotliwości generatora wzorcowego. Wynika to z kryterium Nyquista.

Blok zliczająco sterujący - składa się z mikrokontrolera Atmega 128[3,4], który za pomocą wewnętrznego licznika 1 oraz licznika modulo2 tworzą licznik 17 bitowy zliczający zewnętrzne impulsy. Ponadto mikrokontroler generuje wzorcowe czasy bramkowania, po zakończonym pomiarze resetuje licznik modulo 2 wraz z preskalerem, oraz obrabia dane pomiarowe i wyświetla je na wyświetlaczu.

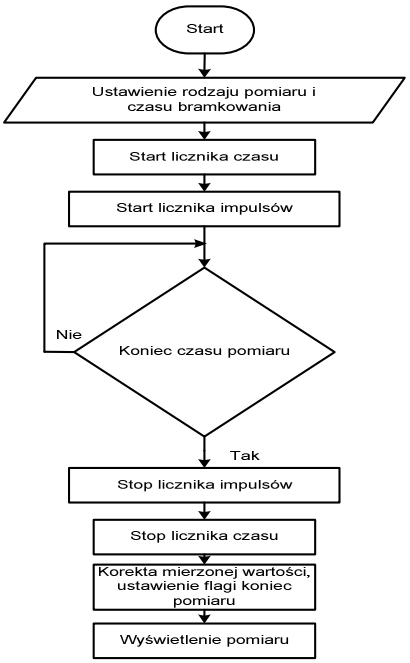


Rys.1. Schemat blokowy częstościomierza.
Fig.1. Block diagram of digital frequency meter.

2.1. Algorytm pomiaru częstotliwości

W opracowanym cyfrowym mierniku częstotliwości, zaimplementowano dwa algorytmy pomiaru częstotliwości, oparte o system przerwań:

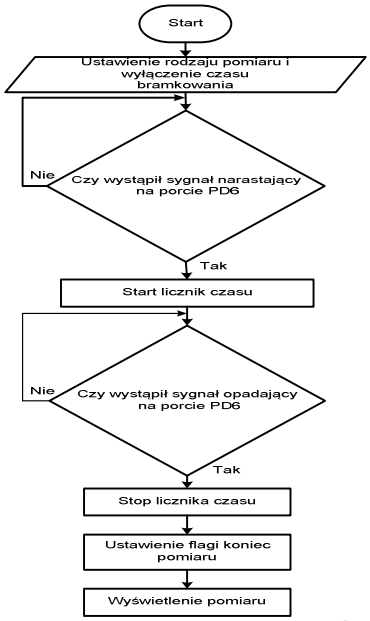
Metoda bezpośrednia – wykorzystywane są tu dwa przerwania: (OVERFLOW1, COMPARE3B/C)



Rys.2. Algorytm działania metody bezpośredniej.
Fig.1. Algorithm direct metod.

Przerwanie OVERFLOW1 występuje w chwili przepełnienia licznika 1 zliczającego zewnętrzne impulsy. Pozostałe dwa przerwania COMPARE3B, COMPARE3C służą do odmierzania czasu bramkowania. Dla czasu bramkowania 10s i 1s wykorzystywane jest przerwanie COMPARE3C a dla czasu bramkowania 0,1s i 0,01s przerwanie COMPARE3B. W pierwszym projekcie miernika częstotliwości do pomiaru czasu bramkowania użyto Timer 2, ponieważ ma on najwyższy priorytet przerwań w śród timerów i powinien dawać największą dokładność pomiaru przy jednoczesnym korzystaniu z przetwornika ADC. Rozwiązanie to nie sprawdzało się ze względu na zaimplementowany system operacyjny NUT/OS[5]. System ten wykorzystuje przerwanie Timera 1, które mimo, że ma niższy priorytet od przerwań Timera 2 powoduje jego nieprawidłową pracę, a w rezultacie wydłużenie czasu bramkowania. Na Rys. 2. Przedstawiono algorytm działania metody bezpośredniej.

Metoda pośrednia - wykorzystuje przerwania: COMPARE1B/A, OVERFLOW3. Algorytm metody pośredniej przedstawiono na Rys. 3.



Rys.3. Algorytm działania metody pośredniej.
Fig.3. Algorithm indirect metod.

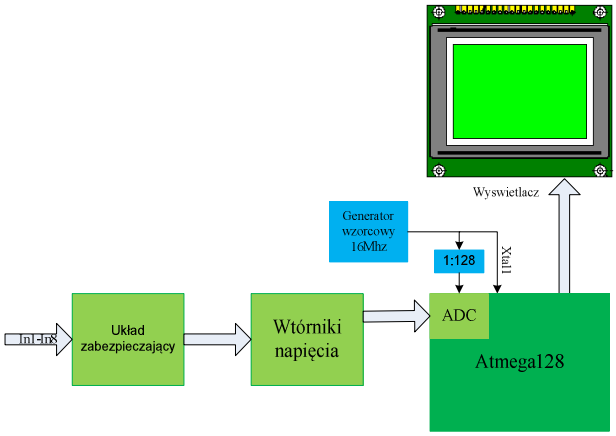
Zastosowanie licznika modulo 2 zbudowanego na przemytniku typu D wyzwalanym sygnałem narastającym umożliwia rozpoczęcie pomiaru czasu w chwili wystąpienia sygnału narastającego na porcie

PD6, a zakończenie w chwili wystąpienia sygnału opadającego. Zastosowanie tego algorytmu umożliwia pomiar dokładnie jednego okresu, a nie ponad całego w przypadku natychmiastowego włączenia pomiaru czasu.

Metoda pośrednia jest tak samo wrażliwa na przerwania Timera 1 jak metoda bezpośrednia. W przypadku tej metody niema możliwości korekcji zliczanych impulsów wzorcowych, powoduje to przekłamania niektórych pomiarów.

2.2. Opis woltomierza i oscyloskopu

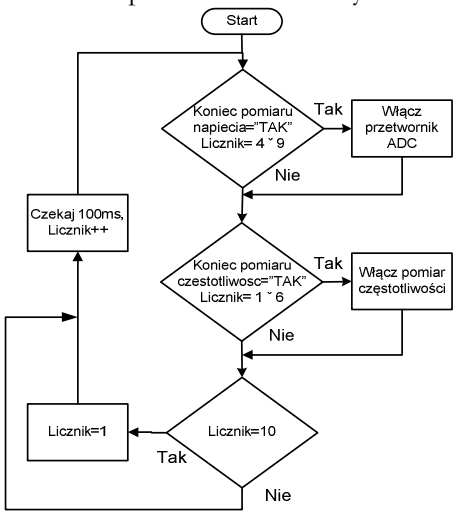
Układ pomiaru napięcia, którego schemat blokowy przedstawiony jest na Rys. 4., wykorzystuje wewnętrzny przetwornik analogowo cyfrowy ADC mikrokontrolera. Jest to przetwornik o maksymalnej rozdzielczość 12 bitów. W projekcie zostało wykorzystanych tylko 8 bitów, co daje rozdzielczość pomiaru 20mV przy napięciu odniesienia 5V. Dane pomiarowe są wysyłane za pomocą protokołu TCP lub UDP do klienta, gdzie można śledzić przebieg 8 napięć jednocześnie, lub jednego spróbowanego z częstotliwością 9,6kHz. Układ zabezpieczający stanowią diody ograniczające wysokie i ujemne napięcia wejściowe.



Rys.4. Schemat blokowy układu pomiaru napięcia.
Fig.4. Block diagram of voltmeter.

2.3. Pomiar częstotliwości i napięć

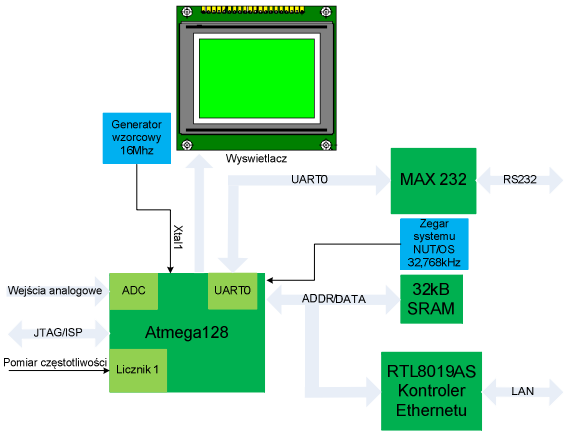
W przypadku pomiarów realizowanych w pętli niestabilność mierzonej częstotliwości, jak również generatora wzorcowego powoduje szybkie zmiany ostatnich cyfr wyniku pomiarowego (mała czytelność), dlatego też zrezygnowano z tej metody. W przypadku pomiaru wysokich częstotliwości metoda pośrednia powoduje zbyt częste wywoływanie podprogramu obsługi przerwania licznika 1, i w konsekwencji brak reakcji mikrokontrolera na pozostałe sygnały zewnętrzne. Ten sam problem tyczy się przetwornika analogowo cyfrowego, który przy ciągłej pracy dostarcza nowego wektora pomiarów, co 55ms. Taka częsta aktualizacja powoduje częste wysyłanie pakietów do klientów, zapychanie pamięci SRAM i w konsekwencji nie stabilną prace systemu NUT/OS. Rozwiązaniem tego problemu jest włączanie pomiaru, co 0.5 sekundy. Licznikiem odmierzającym interwały czasowe jest Timer 2. W przypadku załączania pomiarów nie jest istotna dokładność odmierzanego czasu aż tak bardzo ja przy pomiarze częstotliwości. Z tego powodu Timer 2 został wykorzystany do tego zadania. Algorytm realizujący powyższe zadanie przedstawiona na Rys. 5.



Rys.5. Algorytm załączający pomiary.
Fig.5. Algorithm switching on measurements.

2.4. Serwer pomiarowy TCP/IP

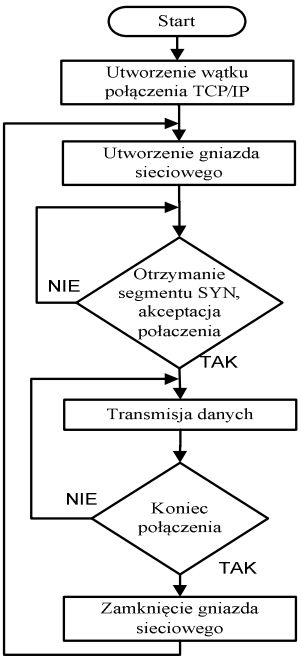
Przesyłanie danych pomiarowych jest oparte na zasadzie klient-serwer. Serwer pomiarowy (Rys. 6) zbudowano na mikrokontrolerze AVR, w którym zaimplementowano prosty system czasu rzeczywistego NUT/OS.



Rys.6. Schemat blokowy serwera TCP/IP.
Fig.6. Block diagram of TCP/IP serwer.

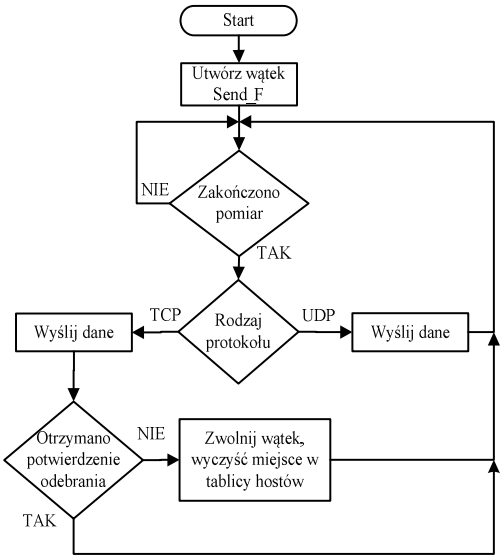
Do nawiązywania polaczeń z hostami służy 10 wątków TCP_thread (Rys. 7) odpowiedzialnych za połączenie z 10 klientami. W chwili utworzenia gniazda sieciowego wątek czeka na otrzymanie segmentu SYN, stanowiącego prośbę o nawiązanie połączenia. Jeśli serwer je zaakceptuje odsyła bieżące

ustawienia pomiaru częstotliwości i przetwornika ADC. Host połączony ma możliwość zmiany tej konfiguracji. Wątek utrzymuje połączenie do momentu otrzymania segmentu FIN, następnie tworzy gniazdo sieciowe i oczekuje na nowego klienta. Konfiguracja części pomiarowej i wybór protokołu jest przesyłana za pomocą protokołu TCP, ponieważ gwarantuje on dostarczenie niezmienionych ustawień do serwera.



Rys.7. Algorytm wątku ustalającego połączenie.
Fig.7. Algorithm thread sending frequency.

Za wysyłanie danych zawierających pomiar częstotliwości i wektor próbek napięcia odpowiedzialne są dwa wątki Send_F (Rys. 8) i Send_U. Wysyłają one dane do klientów, na podstawie tablicy hostów uzupełnianej przez wątek TCP_thread adresami hostów podłączonych do serwera.



Rys.8. Algorytm wątku wysyłającego pomiar częstotliwości.
Fig.8. Algorithm thread sending frequency.

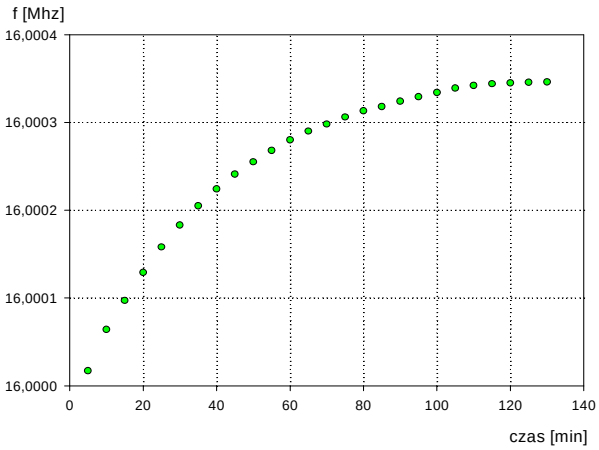
Dodatkowo podczas wysyłania poprzez protokół TCP sprawdzana jest obecność wszystkich klientów. Jeśli któryś nie jest obecny, kończy połączenie i zwalnia wątek TCP_thread dla innego klienta. Jest to ważne, ponieważ segment FIN kończący połączenie nie zostanie wysłany, przez hosta, który uległ awarii, został zresetowany lub aplikacja łącząca się z serwerem nie została poprawnie napisana. W przypadku wysyłania danych protokołem UDP niema możliwości sprawdzenia obecności hosta, ponieważ jest to protokół bezpołączeniowy.

3. Badania

3.1. Badanie generatora częstotliwości wzorcowej

Generator wzorcowy został zbadany pod względem jego stabilności w funkcji czasu pracy. Z przeprowadzonych badań wynika, że generator osiąga stabilną prace po dwóch godzinach ciągłej pracy. Zmiana częstotliwości po tym okresie nie przekracza ±2 Hz. Częstotliwość generatora wzorcowego został zmierzony w 3 etapach:

- 100 pomiarów zaraz po włączeniu
- 100 pomiarów po godzinnej pracy
- 100 pomiarów po dwu godzinnej pracy



Rys.7. Wykres zmian częstotliwości generator w funkcji czasu pracy.
Fig.7. Diagram of frequency change in time.

Na podstawie pomiarów obliczono:

- Średnia wartość mierzonej częstotliwości

$$\bar{f} = \frac{1}{n}\sum_{i=1}^{n} f_i \qquad (1)$$

- Odchylenie standardowe, będące miarą stabilności generatora

$$\sigma = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^{n}\left(f_i - \bar{f}\right)^2}{n-1}} \qquad (2)$$

gdzie:

$\bar{f}$ - wartość średnia mierzonej częstotliwości

f_i - i-ty wynik pomiaru częstotliwości

n - ilość pomiarów

σ - odchylenie standardowe

Tab. 1. Wyniki pomiarów generatora częstotliwości wzorcowej

Czas pracy	$\bar{f}$ [Hz]	σ [Hz]
0h	15999985	3,93
1h	16000281	1,62
2h	16000344	1,551

Główną wadą generatora wzorcowego jest jego wrażliwość na zmiany temperatury. Aby temu zapobiec układy tego typu są stabilizowane termostatami, które zapewniają szybkie osiągniecie temperatury nominalnej pracy i utrzymanie jej na stałym poziomie. W przypadku projektu miernika częstotliwości z możliwością przesyłania danych przez Internet, stabilizacja termiczna realizowana jest przez izolacje termiczna generatora od otoczenia.

3.2. Badanie miernika częstotliwości

Badanie miernika częstotliwości zostało przeprowadzone po ustaleniu się częstotliwości generatora wzorcowego. Polegało ono na porównywaniu częstotliwości zmierzonej przez zaprojektowane urządzenie ze wskazaniem częstościomierza wzorcowego.

3.2.1. Pomiar częstotliwości metodą bezpośrednią

Z przeprowadzonej serii badań (Tab. 2 i 3) wynika, że metoda bezpośrednia nie nadaje się do mierzenia częstotliwości „małych". Maksymalny błąd kwantowania przy ich pomiarze może przekraczać sam pomiar. Wartość tego błędu nie jest możliwa do przewidzenia, dlatego przy częstotliwościach do kilku kiloherców należy stosować metodę pośrednią.

Tab. 2. Wyniki pomiarów dla czasu bramkowania 0,1s

Częstotliwość nastawiona [kHz]	Wynik pomiaru [kHz]	$(\delta_{kw})_{max}$[%]
0,001	-	-
0,010	0,01	100000
0,100	0,10	10000
10,000	10,00	100
100,001	100,00	10
1000,014	1000,00	1
10000,146	10000,15	0,1

Dla wysokich częstotliwości występują różnice między pomiarami, ale mieszczą się one w zakresie błędu pomiarowego. Maksymalna mierzona częstotliwość miernika wynosi 14Mhz. Nie jest ona ograniczona przez pojemność liczników, lecz przez częstotliwość próbkowania portu wejściowego licznika 1.

Tab. 3. Wyniki pomiarów dla czasu bramkowania 10s

Częstotliwość nastawiona [Hz]	Wynik pomiaru [Hz]	$(\delta_{kw})_{max}$[%]
1,0	1,1	10000
10,4	10,0	1000
1000,0	1000,1	10
10000,5	10000,3	1
100001,5	100001,4	0,1
1000015,4	1000015,4	0,01
10000155,2	10000155,0	0,001

3.2.2. Pomiar częstotliwości metodą pośrednią

Metoda pośrednia okazała się lepsza niż metoda bezpośrednia przy pomiarze małych częstotliwości (Tab. 4.). Błędy pomiarowe są znacznie mniejsze.

Tab. 4. Wyniki pomiarów dla metody pośredniej

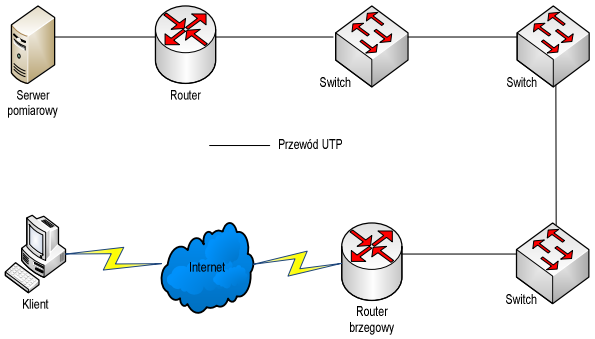
Częstotliwość nastawiona [Hz]	Wynik pomiaru [Hz]	$(\delta_{kw})_{max}$[%]
0,01	0,01	0,000004
0,1	0,10	0,00004
10	10,01	0,004
100	100,03	0,04
1002	1003,23	0,4
5000	5001,04	1

Maksymalną zmierzoną częstotliwością jest 5kHz, którą można zwiększyć do 500kHz stosując preskaler.

3.2.3. Badanie transmisji danych w sieciach komputerowych

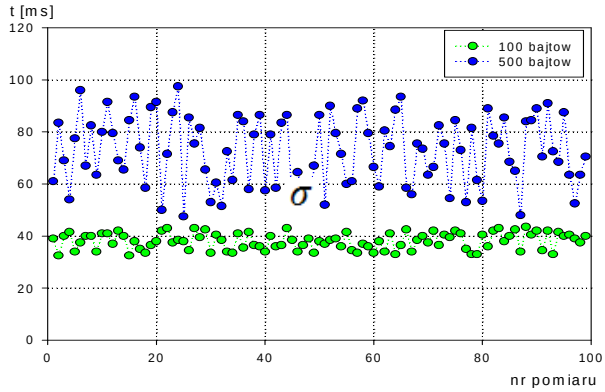
Przesyłanie szybko zmiennych danych pomiarowych za pośrednictwem sieci Internet, gdzie ważne jest jak najszybsze określenie stanu mierzonych wielkości może zostać poważnie ograniczone przez opóźnienia na łączu. Ich przyczyną są urządzenia znajdujące się na drodze przesyłu. Opóźnienia wnoszone przez medium są nieznaczne. Znacznie trudniej jest wyznaczyć opóźnienia aktywnych urządzeń sieciowych, które są uzależnione od: rodzaju sprzętu, szybkości łącza, aktualnego ruchu w sieci. Kolejnym czynnikiem decydującym o szybkości transferu jest protokół.

Idea pomiarów opóźnień dla protokołu TCP oraz UDP polega na wysłaniu danych o zadanej wielkości zawierających aktualny czas. Serwer po odebraniu ich natychmiast je odsyła klientowi a ten odejmuje od aktualnego czasu, czas zapisany w pakiecie wysłanym i dzieli go przez dwa. Pomiaru opóźnień dokonano dla konfiguracji Rys. 8.

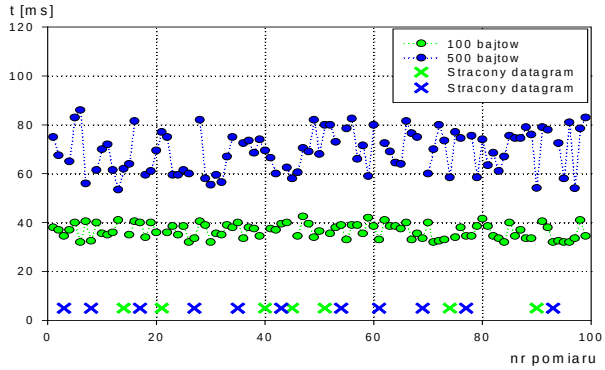


Rys.8. Konfiguracja sieci użyta w badaniach.
Fig.8. Configuration of researching network.

Dla otrzymanych wyników obliczono średnie czasy opóźnień *t* oraz ich odchylenia standardowe.



Rys. 9. Opóźnienia transmisji danych protokołu TCP.
Fig.9. Delays in transmission data – TCP protocol.



Rys. 10. Opóźnienia transmisji danych protokołu UDP
Fig.10. Delays in transmission data – UDP protocol.

Przesyłanie danych pomiarowych za pośrednictwem Internetu w przypadku protokołu UDP nie daje gwarancji przesłania wszystkich datagramów. Ilość straconych informacji wzrasta wraz z ilością przesyłanych danych (Rys 10). Protokół TCP zapewnia dostarczenie wszystkich pakietów do odbiorcy, kosztem większych opóźnień (Rys. 9).

4. Podsumowanie

Ostatecznym rezultatem pracy jest działający prototyp miernika częstotliwości z możliwością przesyłania danych przez Internet. Urządzenie dodatkowo umożliwia pomiar napięć na 8 kanał, a także umożliwia próbkowanie jednego z wybranych kanałów z częstotliwością 9,6 kHz, tym samym założenia projektowe zostały spełnione.

Przeprowadzone badania obejmowały sprawdzenie poprawności mierzonej częstotliwości, oraz transmisji danych za pośrednictwem Internetu. W przypadku pomiaru częstotliwości dokonano porównania zmierzonej wielkości ze wskazaniem miernika laboratoryjnego. Wyniki pomiarów zaprojektowanego urządzenia mieściły się w granicy błędu. Wyniki pomiarów uzyskane dla protokółów TCP i UDP cechowały się dutym rozrzutem wokół wartości średniej, zależnym od wielkości przesyłanych danych, odległości między serwerem a klientem i obciążeniem sieci. Z tego powodu trudne jest ustalenie czasu transmisja danych w sieci Internet. Fakty te powodują, że sieci ethernetowe nie znajdują zastosowania w systemach pomiarowych czasu rzeczywistego. Są natomiast stosowane gdzie czas transmisji danych nie jest tak restrykcyjnie przestrzegane.

Literatura

1. T. Parker: *TCP/IP*, Wydawnictwo Helion, Gliwice 1997, ISBN: 83-86718-55-2.
2. D.E. Comer: *Sieci komputerowe TCP/IP zasady*, protokoły i architektura, WNT, Warszawa.
3. R. Baranowski: *Mikrokontrolery AVR w praktyce*, Wydownictwo BTC, ISBN: 83-60233-02-0.
4. Dokumentacja techniczna układu Atmega 128: „http://www.atmel.com/dyn/resources/prod_documents/doc2467.pdf"
5. T. Włostowski: *Ethernut i Avr-y,* Elektronika Praktyczna nr 12/2006r. do 6/2007r.

Adres służbowy Autorów:

Mgr inż. Wojciech Kołton
Mgr inż. Paweł Kielan
Politechnika Śląska
Wydział Elektryczny
Katedra Mechatroniki
ul. Akademicka 10A
44-100 Gliwice
tel. (032) 237 28 03
fax (032) 237 28 03

email: wojciech.kolton@polsl.pl
email: pawel.kielan@polsl.pl

Artykuł finansowany ze środków na naukę jako projekt badawczy N N510 238638