

## SYSTEM MONITOROWANIA DLA SPEKTROMETRU MASOWEGO CZASU PRZELOTU ( TIME-OF-FLIGHT )

### Streszczenie :

Referat przedstawia system monitorowania czasowej dystrybucji jonów otrzymywanych na wyjściu spektrometru masowego czasu przelotu TOF ( time-of-flight ). Przedstawiono ideę działania systemu oraz podstawowe zależności czasowe istotne dla poszczególnych faz pracy urządzenia ( pomiar, transmisja, analiza, graficzna ekspozycja rezultatów ). Pokazano wpływ organizacji systemu zliczającego, pamięci statycznej, sposobu transmisji danych oraz sposobu wykorzystania pamięci komputera na szybkość działania systemu. Przedstawiono sposoby synchronizacji systemu pomiarowego ze źródłem wzbudzenia ( laser impulsowy ) Przedstawiono możliwości zastosowania systemu w spektrometrii masowej.

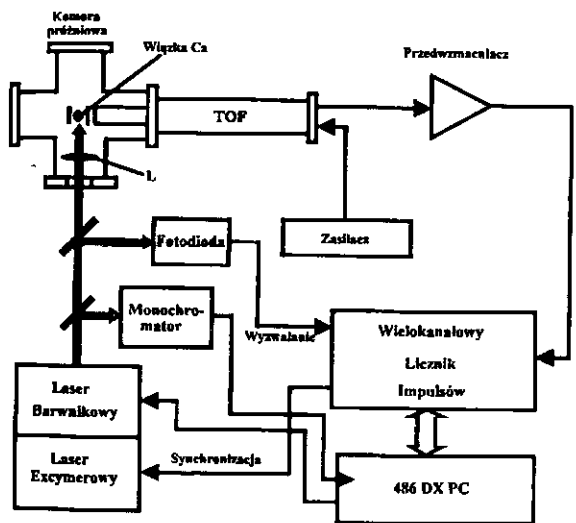
### Abstract :

In this paper the ion time-distribution monitoring system is presented. The system is prepared for time-of-flight mass spectrometers. The idea of operating of the monitoring system and the timing for all phases of the signal processing are presented. Influence of counting system configuration SRAM organization, and data transmission on limits of the monitoring system are discussed. Synchronization of the system with the excitation source is discussed. Examples of applications are included.

### 1. WSTĘP

Schemat blokowy aparatury pomiarowej zawierającej spektrometr czasu przelotu (time-of-flight) przedstawia rys.1. W układzie tym laser excimerowy ( $\lambda = 308\text{nm}$ ) pompuje laser barwnikowy o szerokości wiązki równej  $0.5\text{ cm}^2$  i czasie trwania impulsu 20 ns. Wiązka lasera jest spolaryzowana liniowo i ogniskowana ( $f = 18\text{ cm}$ ) na wiązkę atomowej wapnia. Płaszczyzna polaryzacji wiązki lasera jest równoległa do wiązki atomowej oraz prostopadła do wiązki lasera i kierunku rozchodzenia się jonów i elektronów. Wiązka atomów Ca jest wytwarzana wewnątrz pieca złożonego z dwóch części. Piec umieszczony jest wewnątrz komory próżniowej. Wiązka atomowa jest kolimowana wewnątrz pieca i wychodzi przez otwór w płaszczu wodnym, będącym dodatkowym kolimatorem wiązki. W uproszczony sposób działanie tego układu można przedstawić następująco: każdy impuls lasera, za pomocą układu optycznego, zostaje skierowany do komory próżniowej, gdzie wiązka jest ogniskowana na kolimatorze i doprowadzana w obszar oddziaływania spektrometru czasu przelotu.

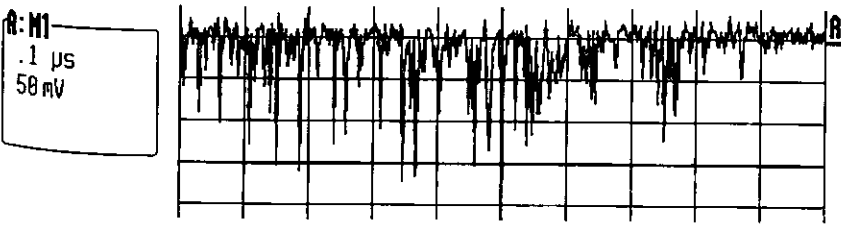
W wyniku oddziaływania z wiązką Ca następuje proces wielofotonowej jonizacji. Następnie w skutek działania zewnętrznych pól elektrycznych, jony są wypychane do spektrometru zakończonego detektorem (płytki mikrokanałowe), w którym sygnał jonowy jest powielany i zamieniany na szereg impulsów elektrycznych. Używany spektrometr czasu przelotu (TOF) COMSTOCK model 101 wraz z wielokanałowym systemem pomiarowym, pracującym w czasie rzeczywistym pozwala na rejestrację impulsów, reprezentujących jony  $Ca^+$  w funkcji czasu lub energii. Współpracujący z systemem pomiarowym komputer może analizować dane z wielokanałowego licznika w czasie rzeczywistym (w pełnym zakresie) do częstotliwości źródła (lasera impulsowego) równej 10 Hz.



Rysunek 1. Schemat blokowy systemu do pomiaru czasu przelotu jonów.

## 2. ZASADA DZIAŁANIA SYSTEMU POMIAROWEGO

Głównym elementem prezentowanego systemu monitorowania dla spektrometru czasu przelotu jest wielokanałowy licznik impulsów pracujący w czasie rzeczywistym - RTMS.[1,2] Zadaniem systemu pomiarowego jest rejestrowanie impulsów, pojawiających się na wyjściu detektora spektrometru masowego, którym są płytki mikrokanałowe. Sygnał reprezentujący jony stanowi zazwyczaj ciąg impulsów o bardzo nierównomiernym rozkładzie czasowym, co przedstawiono na rys.2.



Rysunek 2. Impulsy reprezentujące jony obserwowane na wyjściu przedwzmacniacza.

Prawdopodobieństwo  $P_n(\tau)$  zaobserwowania  $n$  impulsów na wejściu systemu zliczającego w bramce czasowej  $\tau$  opisuje rozkład Poisson'a

$$P_n(\tau) = \frac{(\rho\tau)^n}{n!} \exp(-\rho\tau), \quad (1)$$

gdzie  $\rho$  - częstość pojawiania się impulsów.

W ogólności częstość pojawiania się impulsów nie jest stała w analizowanym przedziale czasu. Jednakże można założyć, że  $\rho_k = \text{constans}$  dla pojedynczego kanału czasowego  $k$  o szerokości  $\tau$  jeżeli  $\tau \rightarrow 0$ . Ilość zliczeń  $N_c$  zależy od wartości oczekiwanej ilości impulsów na wejściu licznika  $N_i = \rho\tau$  oraz rozdzielczości licznika  $\Delta t$  [3]

$$N_c = N_i \exp(-\rho \Delta t). \quad (2)$$

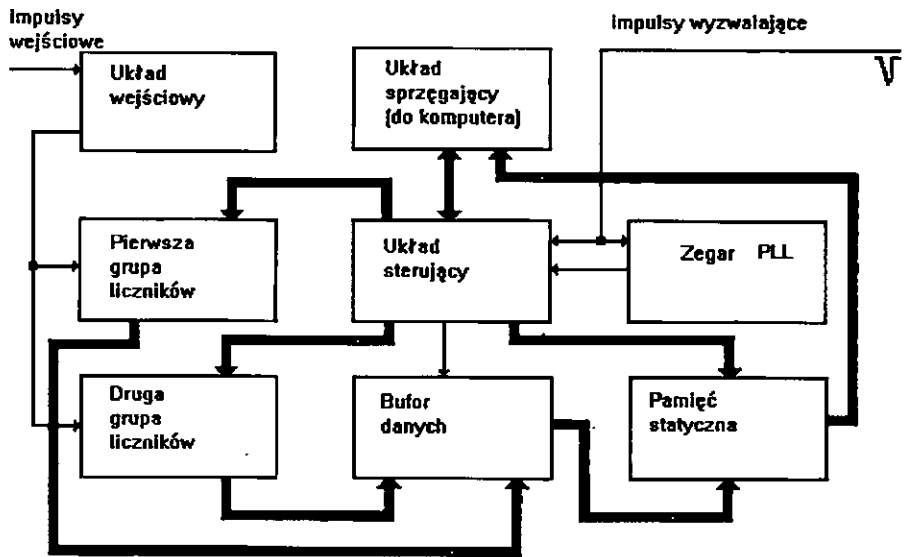
Można wykazać, że dla poprawnej pracy systemu zliczającego maksymalna częstość impulsów w kanale czasowym  $k$  musi być ograniczona [5] do

$$\rho_{\max} \leq \frac{0,35}{\Delta t}. \quad (3)$$

W konsekwencji

$$P_{n>1}(\tau) \rightarrow 0 \text{ przy } \tau \rightarrow 0. \quad (4)$$

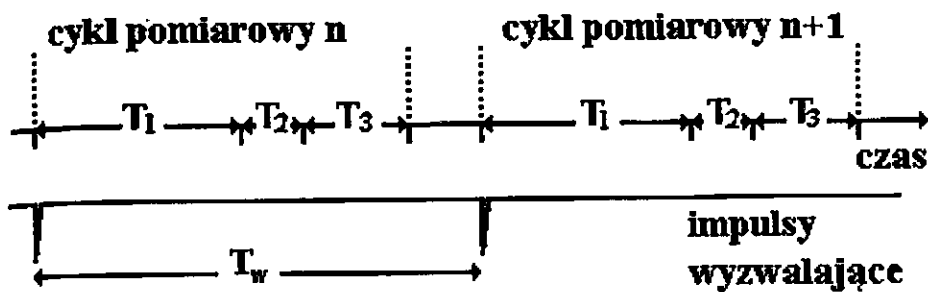
Powyższy warunek ogranicza pojemność stosowanych liczników do jednego bitu, co znacznie upraszcza konstrukcję systemu. Schemat systemu pomiarowego, zawierającego dwie grupy po  $K$  liczników jednobitowych przedstawiono na rys. 3.



Rysunek 3. Schemat systemu pomiarowego dla spektrometru czasu przelotu.

Analizowany odcinek czasu (2,62 ms) jest podzielony na 524288 następujących po sobie kanałów czasowych o szerokości 5 ns, podczas których rejestrowane są impulsy. Ilość liczników w grupie uwarunkowana jest czasem jaki jest potrzebny dla zapisu danych do pamięci (w systemie zastosowano dwie pamięci UM61256A o czasie dostępu 12 ns i organizacji 32K x 8 bitów) oraz szerokością pojedynczej bramki czasowej (5 ns). Pomiar wykonywany jest cyklicznie (zwykle  $10^3 - 10^5$  cykli pomiarowych). Każdy cykl pomiarowy

składa się z trzech faz : 1 - pomiar (czas trwania  $T_1$ ), 2 - transfer danych do komputera (czas trwania  $T_2$ ), 3 - analiza i ekspozycja rezultatów (czas trwania  $T_3$ ). Rys. 4. przedstawia relacje czasowe podczas jednego cyklu pomiarowego. W czasie trwania cyklu pomiarowego, pracują dwie grupy liczników C1 - C8 oraz C9 - C16.



Rysunek 4. Relacje czasowe w zakresie jednego cyklu pomiarowego.

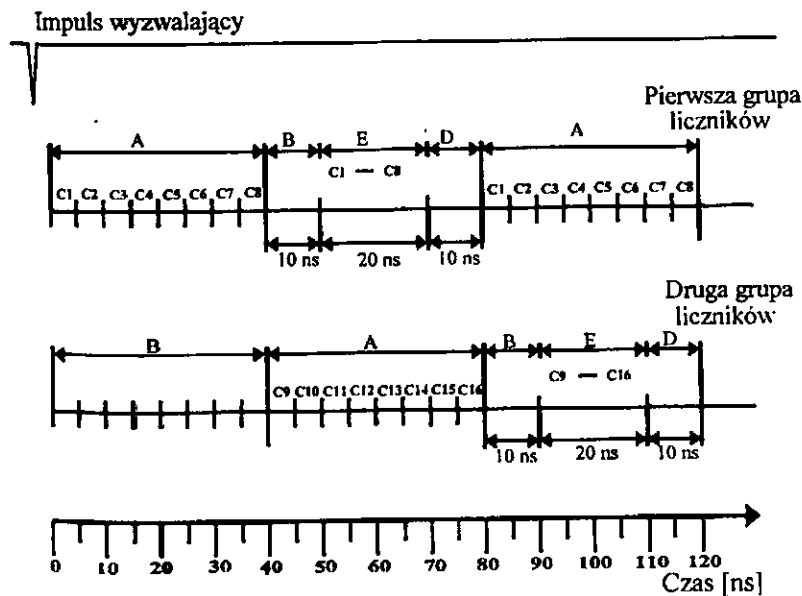
Układ pracuje w czasie rzeczywistym jeżeli :

$$T_w > \sum_{i=1}^3 T_i \quad (5)$$

gdzie:  $T_i$  - czas trwania poszczególnej fazy cyklu pomiarowego,

$T_w$  - okres sygnału wyzwalającego.

Obydwie grupy liczników zliczają naprzemiennie. Zależności czasowe podczas fazy pomiaru ilustruje rys.5.



Rysunek 5. Zależności czasowe podczas fazy pomiaru.

Każda faza pomiaru składa się z czterech subfaz: A - zliczanie, B - opóźnienie, E - wpis do pamięci, D - zerowanie liczników oraz inkrementacja licznika adresu. Subfazy A oraz B, E i D następują po sobie cyklicznie (w obrębie jednej grupy liczników).

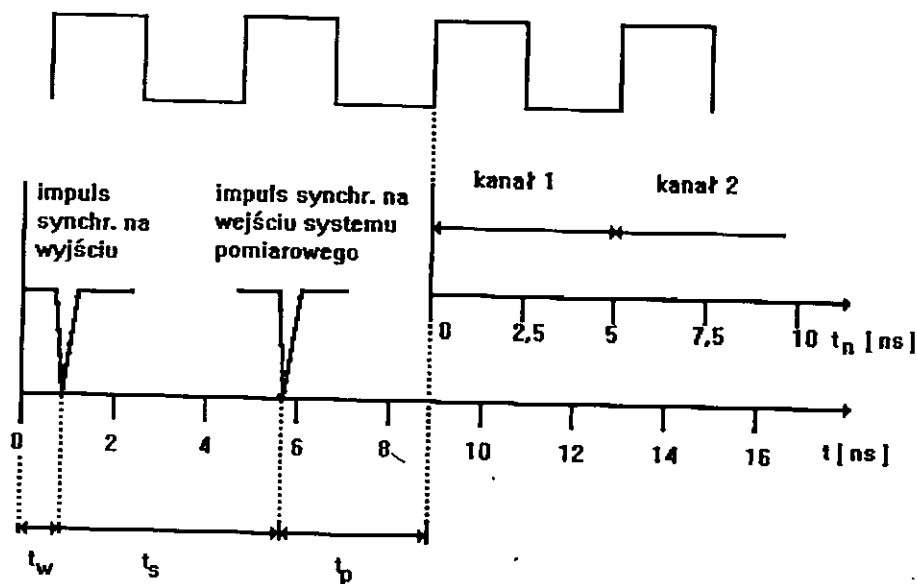
### 3. SYNCHRONIZACJA SYSTEMU ZE ŹRÓDŁEM WZBUDZENIA

Istnieją dwa sposoby synchronizacji systemu pomiarowego ze źródłem wzbudzenia :

1 - system pomiarowy jest synchronizowany przez źródło wzbudzenia,

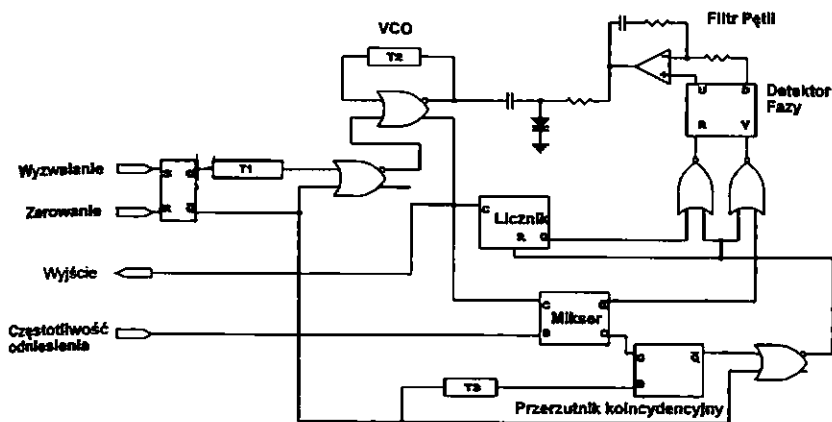
2 - źródło wzbudzenia jest synchronizowane przez system pomiarowy.

Sposób drugi nie zawsze jest możliwy do zrealizowania z uwagi na sposób wyzwalania źródła wzbudzenia (lasera impulsowego). Sposób synchronizacji systemu pomiarowego (z wewnętrznym wzorcem czasu o częstotliwości 200 MHz), przez źródło wzbudzenia ilustruje rys. 6.



Rysunek 6. Synchronizacja systemu pomiarowego przez źródło wzbudzenia.

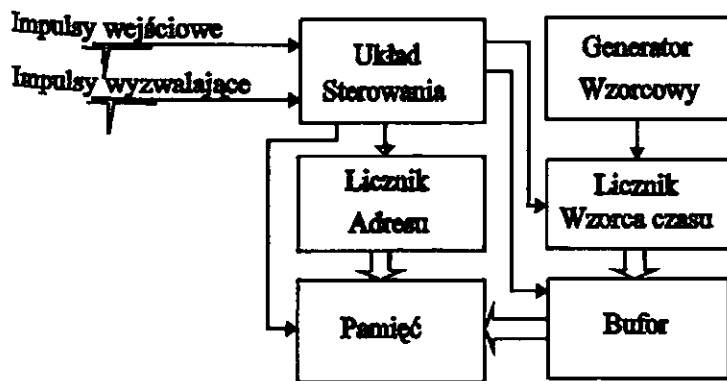
Opóźnienie  $t_s$  ma charakter błędu systematycznego, i może być skompensowane. Suma błędów przypadkowych  $t_w$  (detektor) oraz  $t_p$  (błąd wyzwalania systemu) w przypadku braku kompensacji czasu  $t_p$  jest porównywalna z okresem wewnętrznego wzorca czasu  $T$ . Tak duży błąd synchronizacji prowadzi do zmiany efektywnej funkcji bramki czasowej, zmniejszając jednocześnie rozdzielczość systemu pomiarowego. Błąd synchronizacji może być znacznie ograniczony poprzez pomiar odcinka czasu  $t_p$  metodą interpolacji lub synchronizację wewnętrznego wzorca czasu impulsem wyzwalającym. Schemat wewnętrznego wzorca czasu (generatora PLL) synchronizowanego impulsem wyzwalającym [4] jest przedstawiony na rys. 7.



Rysunek 7. Schemat wysokostabilnego zegara PLL synchronizowanego impulsem zewnętrznym.

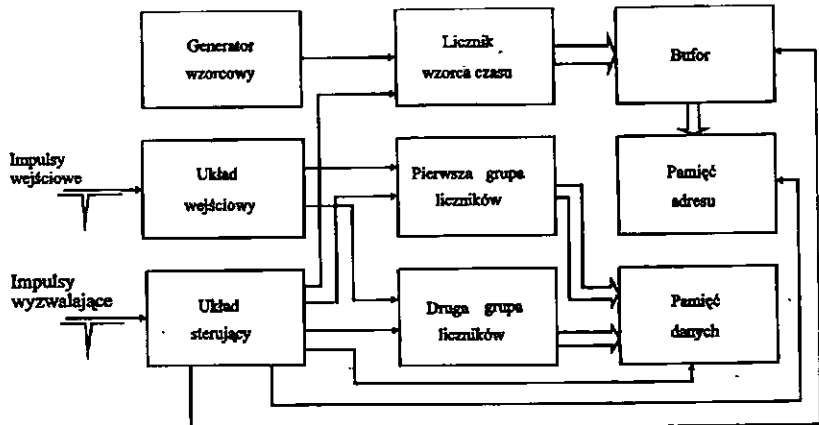
#### 4. OPTIMALIZACJA KONFIGURACJI PAMIĘCI STATYCZNEJ

Oprócz ilości i pojemności liczników w grupie duży wpływ na konstrukcję systemu zliczającego ma szybkość, sposób zarządzania i konfiguracja pamięci statycznej. Na wybór sposobu zarządzania pamięcią w cyfrowych systemach czasu rzeczywistego ma wpływ wiele czynników. Najważniejszymi z nich są parametry sygnału wejściowego. Jeżeli częstość impulsów wejściowych  $p$  oraz częstotliwość impulsów wyzwalających jest mała, wtedy można rejestrować czas pojawienia się impulsu wejściowego, zliczając impulsy z generatora wzorcowego jak przedstawiono na rys.8. lub interpolując wielkość odcinka czasowego w przypadku wymaganej dużej rozdzielczości czasowej systemu pomiarowego. Stosowanie interpolatora prowadzi do zmniejszenia wartości częstości impulsów wejściowych do 20 MHz. W przypadku kiedy częstości sygnału mogą w niektórych przedziałach czasu osiągać wartość 200 MHz, wówczas stosowany jest system zliczania impulsów wejściowych w bramce czasowej (z bramką przesuwaną typu box-car [6], lub wielokanałowy - RTMS [1,2]).



Rysunek 8. Schemat zarządzania pamięcią statyczną dla prostego systemu zliczającego.

W układzie tym pamięć podzielona jest na dwa bloki, przy czym zapis danych następuje do obydwu bloków jednocześnie. Jeden blok pamięci zawiera dane z dwóch grup liczników, a drugi adres reprezentujący czas pojawienia się zliczonych impulsów. W układzie tym zapis danych następuje tylko wtedy gdy aktywna grupa liczników zliczyła przynajmniej jeden impuls, przy czym adres reprezentujący czas wskazuje zawsze czas dla pierwszego licznika w grupie. System wielokanałowy przeznaczony do pracy w czasie rzeczywistym przy niskiej częstotliwości impulsów wyzwalających (do 10 Hz) przedstawiono na rys. 3. W układzie tym mamy podział całej pamięci na dwa banki pracujące naprzemiennie. Podczas cyklu pomiarowego impulsy wejściowe zliczane są przez dwie grupy liczników. Podczas gdy jedna grupa liczników zlicza impulsy wejściowe, zawartość drugiej jest zapisywana do pamięci. Sytuacja ta się powtarza do całkowitego zapelnienia pamięci. Taki podział pamięci i zastosowanie liczników do rejestracji sygnału uniezależnia częstotliwość zliczania impulsów od zastosowanego typu pamięci. Ilość liczników stosowanych w każdej grupie wyznacza rodzaj stosowanej pamięci (ze względu na czas zapisu). Przy założeniu, że pojedyncza bramka czasowa trwa 5 ns a pamięć ma czas dostępu 20 ns to minimalna ilość liczników wynosi 6 (daje to 20 ns na wpis do pamięci i 10 ns na wyzerowanie liczników i inkrementację adresu pamięci). Powoduje to, że pamięć powinna być minimum 6-bitowa. Jeśli zastosujemy pamięć 8-bitową, najlepszym rozwiązaniem jest zastosowanie 8 liczników. Daje to pełniejsze wykorzystanie pamięci i zwiększenie czasu jaki może układ poświęcić na wpis stanu liczników do pamięci. Podczas cyklu pomiarowego licznik adresowy pamięci zwiększa się o jeden dopiero po zapisie danych do obu banków pamięci co oznacza, że można zbudować układ tak, aby umożliwić odczyt danych jednocześnie z obu banków pamięci. Taki sposób odczytu pamięci skraca o połowę czas transferu danych z systemu do komputera. Jeżeli impulsy wejściowe nie są równomiernie rozmieszczone w czasie (np. w spektrometrii masowej czasu przelotu), wówczas duży obszar pamięci zawiera „bajty zerowe” a czas potrzebny na transmisję tych danych do komputera i ich analizę niepotrzebnie ogranicza częstotliwość impulsów wyzwalających. Konfiguracja systemu dla takiego przypadku została przedstawiona na rys. 9. Wadą takiego rozwiązania jest prezentacja rezultatów analizy dopiero po zakończeniu procesu zliczania.



Rysunek 9. Schemat systemu wielokanałowego dla dużej częstotliwości impulsów wyzwalających.

Od wielkości pamięci w systemie zależy ilość pamięci operacyjnej jaką musi zarezerwować komputer do przechowywania danych. Pamięć w komputerze podzielona musi być na dwa bloki: blok buforujący do przechowywania nie przeanalizowanych danych z systemu i blok na dane po analizie komputerowej. Jeśli np. system z rys. 3 zawiera 256k kanałów kanałów czasowych i zastosowano w nim liczniki jednobitowe to daje to 32kB pamięci operacyjnej na bufor danych i jeśli dane dla jednego kanału czasowego będą zawierały 2 bajty (maksymalnie 65535 zliczeń na kanał) to potrzebne jest 512kB pamięci. Po każdym pomiarze dane po przesłaniu do komputera są analizowane. W przeciwnym wypadku, zgromadzone dane dla 1000 cykli pomiarowych zajmą obszar pamięci równy 32MB. Czas potrzebny na transmisję danych do komputera zależy w dużym stopniu od szybkości magistrali zewnętrznej komputera (AT-Bus). W przeważającej wielkości przypadków magistrala ta jest taktowana zegarem 8MHz, choć zdarzają się również magistrale pracujące przy częstotliwości 10 i 12MHz. W komputerach PC instrukcja odbioru danych trwa dwa okresy sygnału zegarowego. Daje to dla magistrali 8MHz czas 250 ns. Dla przesłania 32kB danych do komputera potrzeba wtedy ok. 4 ms. Czas analizy jednego 16 bitowego słowa danych wejściowych dla różnych procesorów zawiera tabela 1.

	80486 SX 25MHz	80486DX 50MHz	Pentium 100MHz
Czas analizy 16 bitów	158.37 $\mu$ s	104.53 $\mu$ s	48.62 $\mu$ s
Czas analizy dla 32k danych	687.41 ms	473.82 ms	166.06 ms

Tabela 1. Czasy analizy danych dla różnych typów procesorów.

Najwięcej czasu w cyklu pomiarowym zajmuje analiza danych. Transfer danych zajmuje stosunkowo mały okres czasu i nie jest to parametr krytyczny przy budowie typu systemu. W rozważaniach tych pominięto czas potrzebny na ekspozycję danych pomiarowych. Układ z rys. 2 zapewnia odświeżanie ekranu po każdym cyklu pomiarowym (w czasie rzeczywistym). Jest to niewątpliwie zaletą tego rozwiązania. Dla pozostałych układów analiza danych i ich prezentacja na ekranie nastąpi dopiero po kilku cyklach pomiarowych. Jednakże przy małej liczbie impulsów pomiarowych układ może pracować z większą częstotliwością impulsów wyzwających ze względu na fakt powolnego zapełniania się pamięci w systemie.

Pracę zrealizowano w ramach grantu KBN, Nr 8T10C 028 10

## LITERATURA

- [1] Zieliński M., Karasek K., Dygdała R.S., Rev. Sci. Instrum. 67, (3325 - 3331), 1996.
- [2] Zieliński M., Karasek K., Płóciennik P. and Dygdała R. S. : Digital acquisition of the signals in atomic physics experiments, EGAS (382 -383), July 1996, Gratz.
- [3] Jenkins A. Gould R. W. and Gedcke D., Quantitative X-Ray Spectrometry; Marcel Dekker, New York, 1995.
- [4] Chu D. C., Allen M. S., Foster A. S., Universal counter resolves picoseconds in time interval measurements, Hewlett-Packard Journal, August, (2-7), 1978.
- [5] Zieliński M., Płóciennik P., Karasek K. and Dygdała R. S., Counting errors in the real-time multichannel scaler. 1; Double-pulse protection and dead-time reduction, praca będzie opublikowana w : Rev. Sci. Instr.
- [6] Dygdała R.S., Fuso F., Arimondo E. and Zieliński M., Modular digital box-car for applications in pulsed laser spectroscopy, Rev. Sci. Instr. June, 66, (3507 - 3512) 1995.