

Jan ŁUBKO, Leszek MARKIEWICZ
Leszek WOLIŃSKI, Rudolf WOJNAR

Instytut Elektroniki, Zakład Elektroniki Biomedycznej
Politechniki Śląskiej

STANOWISKO DO POMIARÓW SPIROMETRYCZNYCH

Streszczenie. W artykule zostały przeanalizowane pod względem przydatności do pomiarów spirometrycznych trzy grupy czujników przepływu: czujniki termoanemometryczne, czujniki ciśnieniowe i czujniki turbinowe. Następnie opisane zostało stanowisko laboratoryjne do pomiarów spirometrycznych, szczególnie przydatne podczas kształcenia studentów. W opisanym stanowisku został wykorzystany tensometryczny czujnik ciśnienia i pneumatograf Fleischa. System zawiera mikrokomputer jednokładowy, przetwornik A/D oraz układy pozwalające na transmisję danych do komputera IBM PC przez złącze RS-232. Oprogramowanie pracuje w środowisku Windows, co pozwala na czytelne obrazowanie wyników badania w trakcie jego przeprowadzania.

Struktura programu mikrokomputera 8051 pozwala na zmianę parametrów systemu (częstotliwość próbkowania), a budowa mechaniczna urządzenia pozwala na zmianę parametrów toru pneumatycznego. Takie rozwiązanie jest szczególnie przydatne w kształceniu studentów.

Przyczynami, dla których opisany system nie może być wykorzystany w zastosowaniach medycznych, są: duża inercja zastosowanych czujników, problemy związane ze sterylizacją, duże zużycie energii przez pneumatograf Fleischa.

THE SPIROMETRIC MEASUREMENT SYSTEM

Summary. In this paper three groups of flow sensors were introduced: thermoanemometric sensors, pressure sensors, turbine sensors and analyzed in respect of use in spirometric measurements. Then we present laboratory station for spirometric measurements which is very useful for student's discoveries. In described system tensometric pressure sensor and Fleisch's pneumotachograph are used. It includes microcontroller with AD converter used to transmit the converted measurements to a PC through RS-232 connection. System software works in Windows environment and allows presentation of results during examination.

Microcontroller 8051 program structure allows to change parameters of signal processing, that is particularly useful when examining the influence of sample frequency on obtained results. Mechanic construction allows proving of pneumatic line parameters influence on measurements errors.

The reasons making the presented spirometer inadequate for medical examination are: big inertia of used sensor, sterilization problems, big energy consumption to heat the Fleisch's pneumotachograph.

DER LABORSTAND ZU DEN SPIROMETRIC MESSUNGEN

Zusammenfassung. Im Aufsatz wurden drei Gruppen der Wächter: thermoanemometrische Wächter, Druckwächter, Turbinewächter vorgestellt und es wurde in der Beziehung der Anwendung in den Spirometric-Messungen analysiert. Dann wurde der Laborstand zu den Spirometric Messungen vorgezeigt. Der ist für die studentischen Entdeckungen sehr brauchbar. In beschriebenem System wurden die dehnungsmeßstreiflichen Druckmeßdosen und Fleisch's Pneumatograf gebraucht. Dieses System enthält Mikrokontrolleur und Analog-Digital-Umsetzer zur Übertragung der durchkonvertischen Messungen zum PC-Computer durch RS-232 Verbindung. Software arbeitet in der Windows-Umgebung und ermöglicht die Präsentation der Ergebnisse in der Zeit der Untersuchung. Mikrokon-

trolleur 8051 erlaubt die Parameteränderung der Signalbearbeitung, was brauchbar in der Zeit des Muster-Frequenz-Einflusses auf die erlangten Resultate ist. Mechanische Konstruktion erlaubt die Einstellung des Parametereinflusses der Pneumatiklinie auf die Meßungsfehler. Die Gründe, die verursachen, daß der präsentierte Spirometer nicht fähig für Untersuchungen ist, sind folgend: die große Trägheit der gebrauchten Wächter, die Probleme der Sterilisation, der große Stromverbrauch zum Wärmen des Fleisch's Pneumotachgrafs.

1. Wstęp

1.1. Pojęcia podstawowe

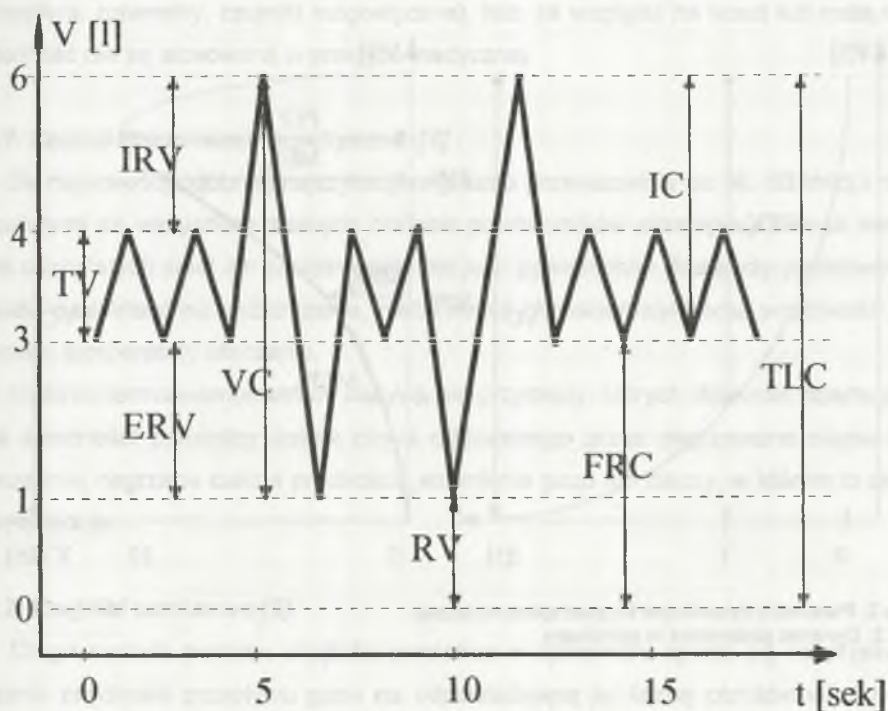
Oddychanie jest ogółem zjawisk, które dotyczą wymiany gazowej między organizmem a otoczeniem. Nauka o fizjologii człowieka dzieli oddychanie na cztery główne procesy:

- wentylację: ruch powietrza z otoczenia do płuc i jego dystrybucja do obszarów, gdzie odbywa się wymiana gazowa,
- przepływ krwi: czynny ruch mieszanej krwi żyłnej do płuc i jej rozdział do rejonów właściwej dyfuzji,
- dyfuzję: bierne ruchy cząstek O_2 i CO_2 pomiędzy powietrzem pęcherzykowym a napływającą krwią do płuc,
- kontrolę oddychania: centralna regulacja wielkości wentylacji w zależności od potrzeb metabolicznych organizmu.

1.1.1. Spirometria [1], [2], [3]

Stanowi najstarszą i podstawową metodę badania czynnościowego układu oddechowego. Pomiarów objętości i pojemności płuc dokonuje się za pomocą spirometru, którego zasadniczą obecnie częścią jest przepływomierz (spirometry otwarte). Pozwala on na rejestrację wielkości przepływu powietrza podczas badania. Na podstawie przepływu obliczana jest objętość (on line) wdychania lub wydychania przez pacjenta.

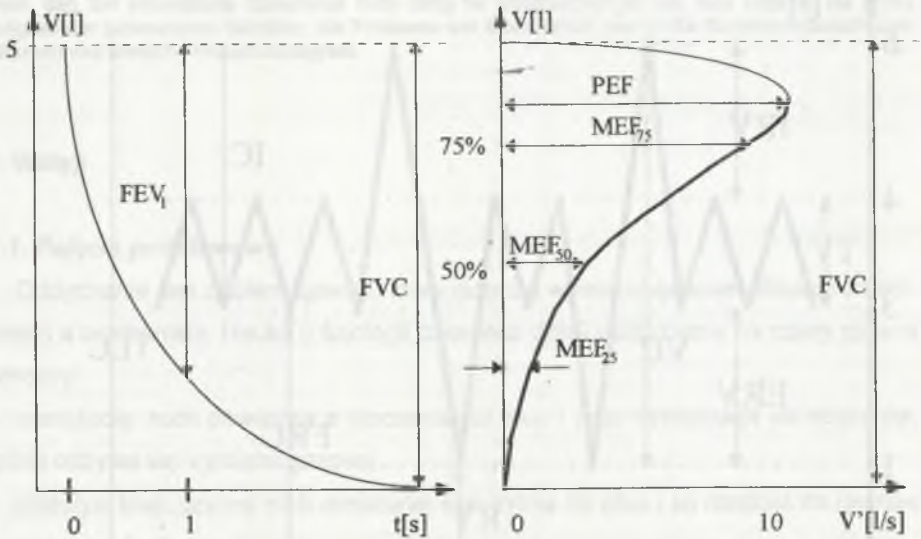
Ze względu na potrzebę standaryzacji badań spirometrycznych wyróżniono następujące parametry statyczne: IRV (inspiratory reserve volume), ERV (expiratory reserve volume), TV (tidal volume), FRC (functional residual capacity), RV (residual volume), TLC (total lungs capacity), VC (vital capacity).



Rys.1. Statyczne parametry spirometryczne
 Fig.1. Static parameters in spirometry

W trakcie badania istotna jest również dynamika oddychania. To, jak szybko płuca są w stanie zmieniać swą objętość, świadczy o ich kondycji. Większość schorzeń układu oddechowego w początkowym stadium możliwa jest do wykrycia właśnie podczas prób dynamicznych.

Dużą powtarzalność i tym samym największe zastosowanie praktyczne mają następujące parametry: FVC (forced vital capacity), FEV₁ (forced expiratory volume), PEF (peak expiratory flow), MEF_{25, 50, 75} (maximal expiratory flows).



Rys.2. Parametry dynamiczne krzywej spirometrycznej
Fig.2. Dynamic parameters in spirometry

2. Przegląd czujników i metod pomiaru przepływu gazu

Podstawowym elementem wchodzącym w skład każdego nowoczesnego spirometru jest czujnik przepływu objętościowego powietrza. Od jego dokładności, szybkości i niezawodności zależy jakość całego urządzenia. Należy też wziąć pod uwagę ograniczenia medyczne. Najistotniejsza jest kwestia zabezpieczenia lekarza i osoby badanej przed porażeniem prądem elektrycznym. Drugą, nie mniej ważną sprawą, jest konieczność sterylizacji. Wszystkie części narażone na kontakt z pacjentem muszą być pozbawione wszelkich ustrojów chorobotwórczych.

Wyróżnia się 3 główne grupy czujników stosowanych w spirometrii:

- termoanemometryczne,
- turbinowe,
- ciśnieniowe.

Poza wymienionymi istnieją także inne rozwiązania (np. wykorzystujące zjawisko Dopplera, rotametry, czujniki magnetyczne), lecz ze względu na koszt lub małą dokładność nie są stosowane w praktyce medycznej.

2.1. Czujniki termooanemometryczne [4]

Są najprawdopodobniej najszybszymi (pasmo przenoszenia do ok. 10 kHz) i najczulszymi ze wszystkich znanych obecnie przetworników przepływu. Jednak mimo tak oczywistych zalet ich zastosowanie nie jest powszechne. Mają trzy podstawowe wady: podatność na uszkodzenia, nieliniowość charakterystyki oraz wrażliwość na zmiany temperatury otoczenia.

Ogólnie termooanemometrami nazywa się przyrządy, których działanie oparte jest na zależności pomiędzy ilością ciepła oddawanego przez nagrzewane ciało lub wcześniej nagrzane ciało a prędkością strumienia gazu lub cieczy, w którym to ciało się znajduje.

2.2. Czujniki turbinowe [5]

Druga metoda pomiaru objętości powietrza w spirometrii opiera się na przetwarzaniu prędkości przepływu gazu na odpowiadającą jej liczbę obrotów wirnika umieszczonego w osi kanału pomiarowego. Liczniki wirnikowe służą przede wszystkim do dokładnego mierzenia objętości przemieszczającego się płynu. Wyróżniają się zarówno zwartą budową, prostotą wykonania, jak też niskim kosztem produkcji. Jednak istnieją poważne ograniczenia w zastosowaniu tego rodzaju czujników do dynamicznych badań oddechowych. Jest to spowodowane obecnością części ruchomych.

2.3. Czujniki ciśnieniowe

Ogólna zasada działania wszystkich konstrukcji tego typu polega na pomiarze różnicy ciśnień przed i za przeszkodą, jaką napotyka na swojej drodze strumień powietrza. Metoda ta jest najprostszą i najbardziej rozpowszechnioną spośród wszystkich dotąd poznanych [5]. Istnieje ogromna różnorodność stosowanych rozwiązań. Najpopularniejsze to:

- 1) kryza segmentowa,
- 2) dysza ISA,
- 3) dysza Venturiego,

Do celów medycznych, gdzie wymagany jest mały błąd, dąży się do uzyskania jak najbardziej liniowych charakterystyk wyjściowych czujnika. Najprostszym i jednocześnie najskuteczniejszym sposobem jest takie ukształtowanie strugi, aby nie dopuścić do powstania turbulencji w całym zakresie mierzonych wartości. W tym celu stosuje się urządzenia zwane pneumatografami (np. Fleischa).

Analizując przydatność omawianych czujników ciśnieniowych, należy stwierdzić, że są to stosunkowo proste, niezawodne, dokładne i najlepiej opracowane w literaturze spośród wszystkich poznanych do tej pory. Ich parametry w porównaniu z ceną stawiają je w rzędzie najbardziej użytecznych i przez to najpopularniejszych w zastosowaniach medycznych.

Szczególnie czujniki z przepływem laminarnym, charakteryzujące się dużą dynamiką, wysoką wrażliwością, bardzo małymi stratami ciśnienia i przede wszystkim liniowością mogą być interesujące pod kątem zastosowań w spirometrii.

2.4. Tensometryczne czujniki ciśnienia

Do zalet tensometrów należy głównie zaliczyć niski koszt wytwarzania, małą histerzę, niewrażliwość na wstrząsy oraz możliwość dobrego kompensowania wpływów temperatury. Wady wiążą się z trudnością wzorcowania i zależą już od konkretnych zastosowań. Dla czujników niskich ciśnień jest to głównie wąski zakres przenoszonych częstotliwości.

Samą zasadę działania można opisać prostymi równaniami [6]:

$$\frac{\Delta R}{R} = K \cdot \varepsilon,$$

gdzie:

ΔR [Ω] - bezwzględna zmiana oporu drutu,

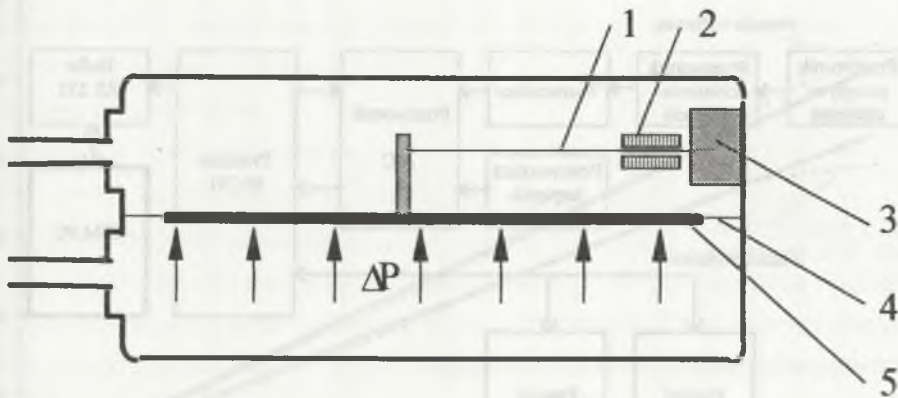
R [Ω] - opór początkowy

K - współczynnik tensoczułości zależny od materiału i technologii wykonania,

$\varepsilon = \frac{\Delta l}{l}$ [m / m] - odkształcenie względne tensometru.

Ze wzoru wynika, że otrzymywany sygnał elektryczny $\frac{\Delta R}{R}$ jest tym większy (a więc tym lepiej mierzalny), im większe jest mierzone odkształcenie oraz im większy jest współczynnik K. Odkształcenie nie może być dowolnie powiększane, gdyż ogranicza je wytrzymałość i liniowa charakterystyka stosowanego materiału.

Podstawową częścią przetwornika niskiego ciśnienia jest sztywna membrana (5), szczelnie połączona z obrzeżem cienką folią gumową (4). Nad nią umocowana jest belka (1), pracująca w układzie zginanym. Odkształca się ona pod wpływem siły przenoszonej z membrany, tak jak przedstawia to rysunek 3.



Rys.3. Schemat czujnika tensometrycznego
Fig.3. The typical construction of tensometric transducer

Tensometry (2) są naklejone po obu stronach belki, blisko punktu jej zamocowania (3). Tam właśnie występują największe naprężenia i zmiany długości. Układ taki odznacza się tym, że nawet niewielka różnica ciśnień powoduje stosunkowo duże ugięcie elementu sprężystego.

Zależność wiążąca sygnał wyjściowy z mierzonym ciśnieniem oraz parametrami konstrukcyjnymi przetwornika (przy pominięciu nieznaczącej sztywności folii gumowej i zakładając pracę układu w granicach sprężystości belki) ma postać [6]:

$$\frac{\Delta R}{R} = K \cdot \frac{2}{3} \cdot \frac{\pi D^3}{E \cdot bh^2} \cdot \Delta p,$$

gdzie:

b, h [m] - szerokość i grubość zginanej belki,

D [m] - średnica membrany,

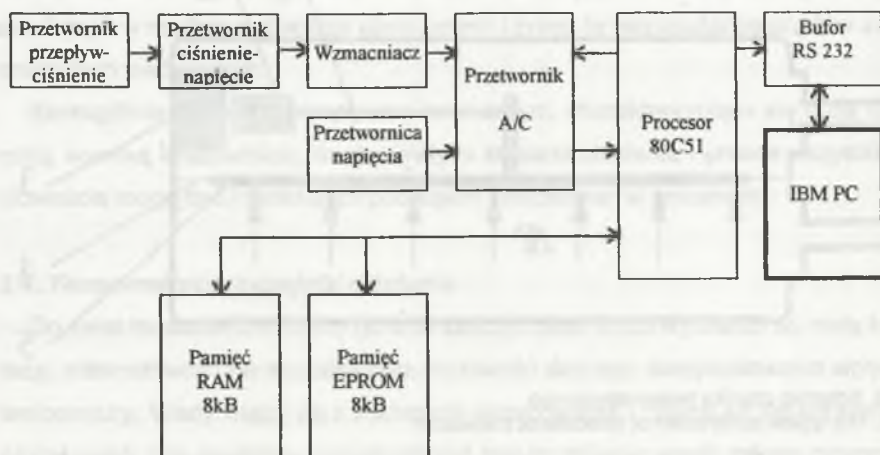
Δp [Pa] - mierzona różnica ciśnień,

E [kg/m²] - moduł Younga,

K - współczynnik materiałowy tensometru,

$\Delta R/R$ [Ω/Ω] - względna zmiana oporu.

3. Ogólny schemat blokowy modułu pomiarowego



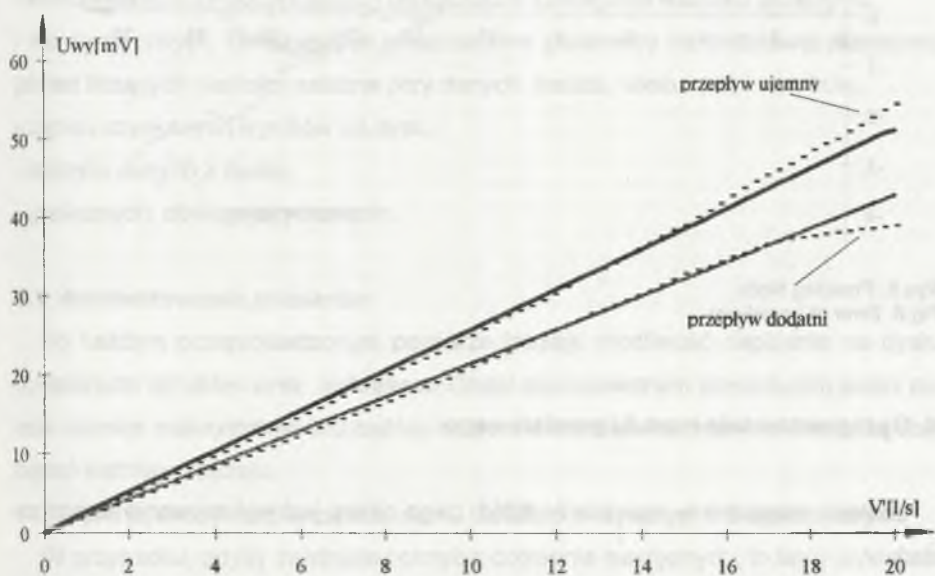
Rys.4. Podział modułu pomiarowego na bloki funkcjonalne
Fig.4. Schematic diagram of the measuring unit

Sygnałem wejściowym jest strumień powietrza przepływający przez czujnik, który wytwarza spadek ciśnienia, przekazywany z kolei torem pneumatycznym do przetwornika manometrycznego, różnicowego. Analogowa wartość napięcia jest zamieniana na postać cyfrową w konwerterze A/C. Częstotliwość próbkowania może być zmieniana programowo i wynosi maksymalnie 40Hz. W pamięci RAM przechowywany jest program komunikacyjny oraz zegar wyzwalaający przetwornik. Pamięć ROM nie jest używana podczas normalnej pracy. Kod w niej zawarty umożliwia ładowanie programów do RAM modułu pomiarowego z IBM i ich inicjowanie.

Dekoder adresów ma za zadanie aktywizację poszczególnych elementów modułu tak, aby nie nastąpił konflikt na magistrali danych. Przetwornica wytwarza napięcie ujemne niezbędne do prawidłowej pracy przetwornika a/c. Bufor służy jako przeziennik napięć TTL na standard RS232.

3.1. Czujniki przepływu i ciśnienia

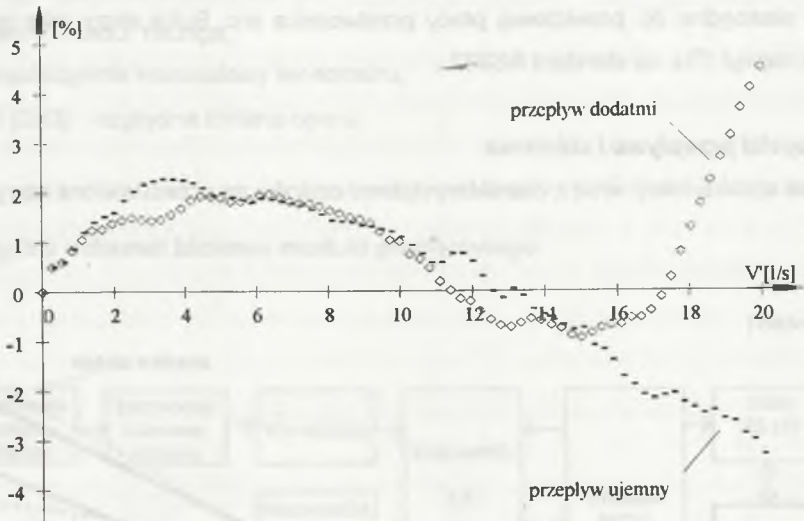
Proste aproksymacji wraz z charakterystykami czujnika są przedstawione na rys.5.



Rys.5. Charakterystyka wzorcowania czujnika przepływu
Fig.5. The transfer characteristics of flow sensor

Jak można zauważyć, wzmocnienie różni się w zależności od kierunku przepływu. Wynika to z niesymetryczności wykonania tensometrów, jak również z nierównego ich naklejenia na zginaną belkę w czujniku ciśnienia. Natomiast utrata liniowości dla dużego, dodatniego strumienia jest spowodowana pracą elementów zginanych przetwornika już poza granicą sprężystości.

Przebieg błędu $\delta = 100 \cdot \frac{y_{lin} - y_{rzecz}}{y_{rzecz}}$ w całym mierzonym przedziale jest wykreślony na rys.6.



Rys.6. Przebieg błędu
Fig.6. Error of transducer

4. Oprogramowanie modułu pomiarowego

Zostało napisane w asemblerze 8051. Jego celem jest wykonywanie trzech zadań:

- wyzwalanie przetwornika A/C,
- odczyt danych,
- transmisja wyników do IBM PC.

W pętli głównej programu jest generowany sygnał trwający dwa cykle, rozpoczynający konwersję A/C. W kolejnym kroku odliczane jest opóźnienie we wbudowanym liczniku TIMER1. Jego wielkość bezpośrednio decyduje o częstotliwości pomiarów. W trakcie procedury opóźnienia pojawia się sygnał STATUS z przetwornika, świadczący o gotowości wystawienia wyniku na szynę danych. Zbocze narastające sygnału powoduje zapoczątkowanie obsługi przerwania zewnętrznego INTO w procesorze (odliczanie nie jest przerywane). Algorytm przerwania wysyła adres (4000hex) mniej znaczącego bajtu B2 w przetworniku i przesyła odczytaną wartość do rejestru.

Po zakończeniu transmisji następuje powrót do pętli głównej programu i oczekiwanie na koniec odliczania opóźnienia. Przepelnienie licznika TIMER1 powoduje skok na początek programu i cała opisana procedura jest powtarzana.

5. Charakterystyka oprogramowania spirometru w IBM PC

Cały algorytm programu składa się z następujących zbiorów procedur:

- komunikacyjnych, odczytujących przez złącze szeregowo wartości przepływu,
- matematycznych, obliczających poszczególne parametry na podstawie przepływu, jak też liczących wartości należne przy danych: wadze, wieku, płci i wzroście,
- zapisu uzyskanych wyników na dysk,
- odczytu danych z dysku,
- graficznych, obsługujących ekran.

5.1. Archiwizowanie pomiarów

Po każdym przeprowadzonym pomiarze istnieje możliwość zapisania na dysku uzyskanych wyników wraz wykresem. Dzięki zastosowanym procedurom jeden pomiar zajmuje maksymalnie 570 bajtów, co pozwala zachować odpowiednio dużą ilość badań każdego rodzaju.

Dla jednej osoby można zapisać do 10 badań; 5 statycznych i 5 dynamicznych.

W przypadku, gdyby zaistniała potrzeba dopisania następnych, to testy wykonane najwcześniej będą automatycznie kasowane.

LITERATURA

1. Quanjer H.: Standardized lung function testing, *Clinical respiratory Physiology*, 19, 1983
2. Quanjer H., Helms P., Blure J., Gaultier Cl.: Standardization of lung function tests in paediatrics, *The European Respiratory Journal*, 2, 1989
3. Morris J.F., Koski W.A., Breese J.W.: Normal Values and Evaluation of Forced and Expiratory Flow, *American Review of Respiratory Disease*, 112, 1975

4. Biernacki Z.: Struktura błędów w pomiarach parametrów przepływu gazu, Wydawnictwo Politechniki Częstochowskiej, Częstochowa 1990
5. Romer E.: Miernictwo przemysłowe, PWN, Warszawa 1978
6. Strybalski W.: Przetworniki tensomeryczne, konstrukcja, projektowanie, użytkowanie, WNT, Warszawa 1971

Recenzent: Prof. dr hab. inż. Lech Tomawski

Wpłynęło do Redakcji 15.12.1994 r.

Abstract

In this paper we present laboratory station for spirometric measurements. The station is very useful for student's discoveries but it is inadequate for medical examination. The reasons making the presented spirometer inadequate for medical examination are: big inertia of used sensor, sterilization problems, big energy consumption to heat the Fleisch's pneumotachgraf. Also three groups of flow sensors were introduced: thermoanemometric sensors, pressure sensors, turbine sensors and analyzed in respect of use in spirometric measurements. In described system tensometric pressure sensor and Fleisch's pneumotachgraph are used. It includes microcontroller with AD converter used to transmit the converted measurements to a PC trough RS-232 connection. System software works in Windows environment and allows presentation of results during examination.

Microcontroller 8051 program structure allows to change parameters of signal processing, that is particularly useful when examining the influence of sample frequency on obtained results. Mechanic constraction allows proving of pneumatic line parameters influence on measurements errors.