



## Współpraca komputera z pneumatycznym czujnikiem ciśnienia krwi

JACEK KOSEK

Politechnika Wroclawska, Instytut Inżynierii Lotniczej, Procesowej i Maszyn Energetycznych,  
50-370 Wrocław, Wybrzeże Wyspiańskiego 27

**Streszczenie.** W referacie przedstawiono współpracę komputera z pneumatycznym czujnikiem do bezinwazyjnego pomiaru fali tętna krwi, czyli przebiegu ciśnienia krwi w czasie. Ciśnienie wyjściowe czujnika przetwarzane jest na sygnał cyfrowy, który po wstępnej filtracji w module zasilającym, przesłany zostaje za pomocą kabla USB do komputera. W komputerze sygnał ulega dalszemu przetworzeniu i analizie. Na ekranie komputera zostaje wyświetlona fala tętna wraz z podstawowymi parametrami.

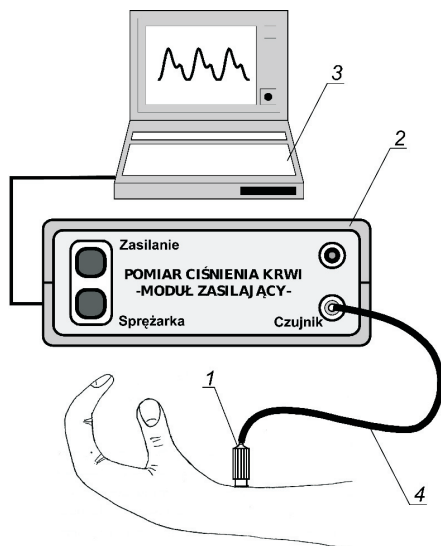
**Słowa kluczowe:** pneumatyczny czujnik ciśnienia krwi, analiza fali tętna krwi, bezinwazyjny pomiar fali tętna krwi, medycyna — pomiary

**Symbole UKD:** 616-072

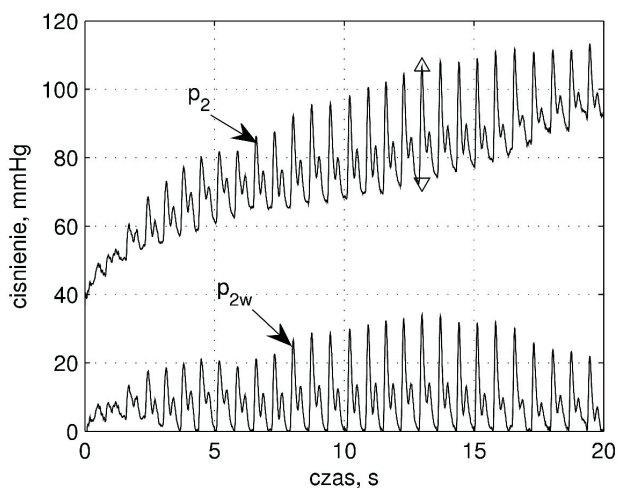
### Wstęp

W Instytucie Inżynierii Lotniczej, Procesowej i Maszyn Energetycznych powstał przyrząd do bezinwazyjnego pomiaru fali tętna krwi czyli przebiegu ciśnienia krwi w czasie [1].

Przyrząd składa się z pneumatycznego czujnika ciśnienia 1 (rys. 1), modułu zasilającego 2 i komputera 3 w roli rejestratora i analizatora fali tętna krwi. Podczas pomiaru czujnik przykłada się do badanej tętnicy, a następnie stopniowo dociska się go do niej. W czasie tego docisku na ekranie komputera pojawia się przebieg fali tętna krwi, której amplituda najpierw narasta a później spada, przy narastającej bez przerwy składowej stałej (przebieg  $p_2$  — rys. 2). Właściwa fala tętna krwi odpowiada przebiegowi o maksymalnej amplitudzie, przy czym zanim będzie można ją wyznaczyć, należy uzyskany przebieg „wyprostować” (przebieg  $p_w$ ), czyli wyciąć



Rys. 1. Przyrząd do bezinwazyjnego pomiaru ciśnienia krwi: 1 — czujnik pneumatyczny; 2 — moduł zasilający; 3 — komputer; 4 — przewód ciśnieniowy



Rys. 2. Widok ekranu komputera podczas pomiaru fali tętna krwi

składową stałą. Aby zrealizować powyższy algorytm, trzeba przebieg przesłać do komputera, w którym będzie wykonana większość obliczeń na bieżąco (w czasie rzeczywistym). Dodatkowo na ekranie komputera wyświetlane są wartości ciśnienia skurczowego i rozkurczowego dla pojedynczej fali tętna krwi, która posiada

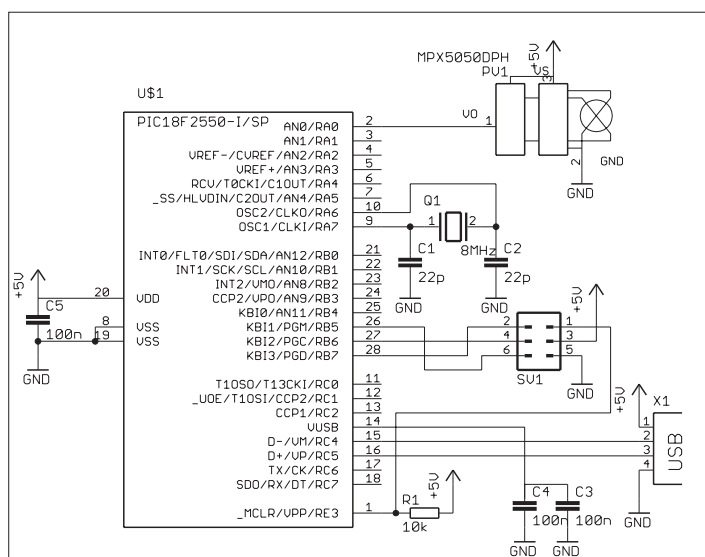
największą amplitudę z dotychczasowo zarejestrowanych. Ciśnieniu skurczowemu odpowiada maksimum fali tętna, natomiast ciśnieniu rozkurczowemu odpowiada minimum fali tętna krwi.

Ciśnienie wyjściowe czujnika 1 jest przetwarzane w przetworniku pneumoelektrycznym, gdzie zamieniane jest na sygnał napięciowy 0-5 V. Napięcie to jest próbkowane przez przetwornik analogowo-cyfrowy (A/C), znajdujący się w mikrokontrolerze, który dodatkowo wstępnie filtruje sygnał. Obrobiony sygnał z mikrokontrolera zostaje wysłany szeregową szyną danych (USB) do komputera. Zadania te wykonywane są w module zasilającym 2 (rys. 1). Natomiast, po przesłaniu sygnału do komputera, ulega on dalszemu przetworzeniu i analizie. Na ekranie komputera wyświetla się falę tętna wraz z podstawowymi parametrami, takimi jak: ciśnienie skurczowe i rozkurczowe oraz stosunek czasu skurczu do czasu rozkurczu i inne [2].

## Interfejs komunikacji czujnika z komputerem

Interfejs komunikacji czujnika z komputerem jest jednym z elementów składowych modułu zasilającego 2 (rys. 1). Schemat ideowy interfejsu przedstawiony jest na rysunku 3. Wyróżnić na nim można:

- przetwornik pneumoelektryczny PV1 typu MPX5050DPH firmy Motorola,
- mikrokontroler U\$1 typu PIC18F2550 firmy Microchip,



Rys. 3. Schemat modułu akwizycji i transmisji USB

- układ generatora taktującego mikrokontroler U\$1 oparty na rezonatorze kwarcowym Q1 i dwóch kondensatorach C1 i C2,
- złącze X1 typu USB dostępne z zewnątrz modułu,
- złącze SV1 do programowania mikrokontrolera U\$1,
- kondensatory C3, C4, C5 zmniejszające wahania napięcia na zasilaniu i szynie USB.

Układ zasilany jest napięciem 5 V dostarczonym przez kabel USB. Ciśnienie wyjściowe czujnika 1 (rys. 1) mierzone jest za pomocą przetwornika pneumoelektrycznego PV1, który posiada kompensację temperaturową oraz wzmacniacz dający sygnał z zakresu 0-5 V. Sygnał ten jest próbkowany przez przetwornik A/C znajdujący się w mikrokontrolerze U\$1.

## Oprogramowanie interfejsu

Oprogramowanie znajdujące się w mikrokontrolerze U\$1 ma do spełnienia kilka zadań:

- przetwarzać napięcie analogowe z przetwornika pneumoelektrycznego 0-5 V za pomocą wbudowanego przetwornika A/C,
- obliczać wartość średnią z kilkudziesięciu próbek (w zależności od trybu pracy),
- organizować dane w tak zwane ramki protokołu,
- wysyłać ramki z określoną częstotliwością,
- obsługiwać port USB.

TABELA 1

Zestawienie rozkazów wysyłanych przez komputer do modułu

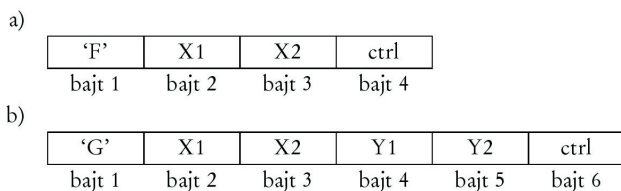
rozkaz (ASCII)	rozkaz (dziesiętnie)	opis rozkazu(ASCII)
'F'	70	wysyłaj dane odczytane z jednego kanału z częstotliwością 200 Hz (domyślny)
'G'	71	wysyłaj dane odczytane z jednego kanału z częstotliwością 100 Hz
'H'	72	wysyłaj dane odczytane z dwóch kanałów z częstotliwością 200 Hz
'I'	73	wysyłaj dane odczytane z dwóch kanałów z częstotliwością 100 Hz
'E'	69	przerwij wysyłanie danych

Komunikacja przez port USB jest oparta na sterowniku CDC (*Connection Device Class*) [3] — umożliwia on emulację portu szeregowego w komputerze. Zdecydowa-

no się na tę technologię ze względu na kompatybilność z wcześniejszymi wersjami urządzenia, które były przyłączone do portu szeregowego. Natomiast protokół przesyłania danych rozbudowano w stosunku do poprzedniej wersji. Komunikacja opiera się na zasadzie Master-Slave. Komputer jest jednostką nadrzędną, która wydaje rozkazy jednostce podrzędnej, którą w tym wypadku jest mikrokontroler. Wydanie rozkazu polega na przesłaniu odpowiedniego znaku poprzez interfejs szeregowy; lista rozkazów znajduje się w tabeli 1.

Rozkaz 'F' jest rozkazem domyślnym. Oznacza to, że w momencie zasilenia modułu, mikrokontroler przełącza się w tryb wysyłania danych z pierwszego kanału z częstotliwością 200 Hz (tak jakby wysyłany był rozkaz 'F').

Dane wysyłane przez mikrokontroler do komputera organizowane są w tak zwane ramki. Wykorzystane są przy tym dwie długości ramek: 4- i 6-bajtowe, w zależności od tego, czy wysyłane są dane z jednego czy dwóch kanałów. Ramki 4- i 6-bajtowe przedstawione są na rysunku 4.



Rys. 4. Ramki wysyłane z modułu do komputera: a) ramka czterobajtowa (jeden kanał); b) ramka sześciobajtowa (dwa kanały)

Pierwszy bajt rozpoczyna ramkę, jeśli jest to litera 'F'. Oznacza to, że ramka będzie 4-bajtowa. Natomiast, jeśli będzie to litera 'G', oznacza to, że ramka będzie miała długość 6 bajtów. Następnie wysyłany jest starszy bajt X1 pierwszego kanału, a zaraz po nim młodszy bajt X2. Jeśli ramka jest sześciobajtowa, wówczas wysyłane są bajty kanału drugiego, najpierw starszy Y1, potem młodszy Y2. Dwa bajty (X1 i X2 lub Y1 i Y2) tworzą szesnastobitową liczbę przechowującą wartość napięcia  $U$  w miliwoltach [mV], czyli 1 V przechowywany jest jako liczba 1000, czyli  $X1 = 3$ , a  $X2 = 232$ . Ostatnim bajtem ramki jest bajt sumy kontrolnej, w którym znajduje się suma poprzednich bajtów. Dzięki temu bajtowi jesteśmy w stanie dowiedzieć się, czy ramka trafiła bez błędów.

Program realizujący powyższe zadania napisany został w języku „C” przy użyciu szablonu sterownika CDC dostarczonego przez producenta mikrokontrolera. Do uzyskania przebiegu o lepszej jakości na jeden wysłany punkt pomiarowy wykonuje się od 10 do 50 próbkowań sygnału, a następnie wyciąga się z nich wartość średnią. Liczba próbek ściśle zależy od możliwości mikroprocesora, ilości

kanałów oraz częstotliwości, z jaką punkty wysyłane są do komputera. W tabeli 2 przedstawiono zestawienie ilości próbek służących do wyznaczenia jednego punktu pomiarowego w zależności od trybu pracy interfejsu, wybranego przez wysłanie odpowiedniego rozkazu.

TABELA 2

Zestawienie trybu pracy interfejsu z ilością próbek służących do uśrednienia jednego punktu pomiarowego

Rozkaz	Ilość próbek
'F'	25
'G'	50
'H'	10 (na pojedynczy kanał)
'I'	20 (na pojedynczy kanał)

## Oprogramowanie komputera

Interfejs znajdujący się w module zasilającym wysyła wartości napięcia  $U$ , zorganizowane w ramki, poprzez uniwersalną szynę szeregową (USB) do komputera. W tym celu w komputerze musi być zainstalowany sterownik CDC (*connection device class*). Sterownik ten emuluje port szeregowy w komputerze. W komputerach z systemem operacyjnym Windows 2000/XP/VISTA sterownik ten jest już standardowo zainstalowany; wymagana jest jedynie instalacja odpowiedniego pliku: „Pomiar\_Cisnienia.inf”. Natomiast w komputerach z systemem Linux wszystko odbywa się automatycznie. Poza sterownikiem, w komputerze trzeba uruchomić program rejestrujący i analizujący falę tętna krwi. Program został napisany przy użyciu programu Matlab.

Program wykonuje zadania w czasie rzeczywistym. Zadania te zostały podzielone na trzy niżej wymienione poziomy:

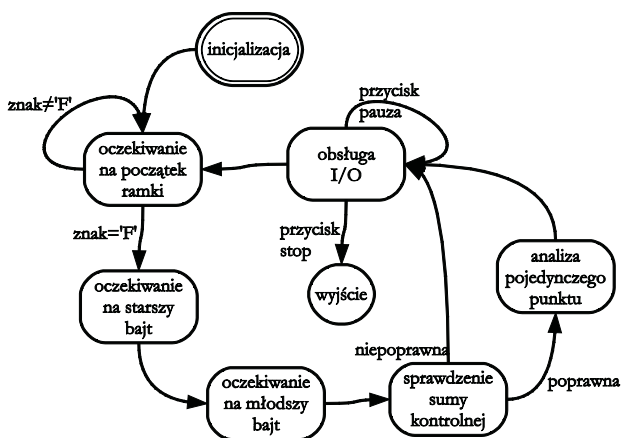
1. Zadania niskiego poziomu — główna pętla programu.
2. Analiza pojedynczej wartości — wywoływana przez pętlę główną programu po poprawnie odebranych każdym punkcie.
3. Analiza pojedynczej fali tętna krwi — wywoływana po każdorazowym wykryciu narostu ciśnienia.

Analiza przebiegu ciśnienia krwi odbywa się na bieżąco (w czasie rzeczywistym) w pętli głównej, po każdorazowym otrzymaniu wartości napięcia wywoływana jest funkcja: „analiza\_punktu”, która ma za zadanie wykryć ciśnienie skurczu i wywołać funkcję „analiza\_cyklu”.

## Pętla główna programu komputerowego

Na rysunku 5 przedstawiono graf ilustrujący działanie pętli głównej programu. Pętla zaprojektowana jest z użyciem wzorca projektowego maszyny stanu (pętla „for” i instrukcja „switch”). Program zaczyna się od „inicjalizacji”, czyli:

- przygotowania zmiennych,
- utworzenia i wyświetlenia głównego okna,
- ustawienia parametrów portu szeregowego.



Rys. 5. Graf przedstawiający zachowanie pętli głównej programu

Maszyna stanów taktowana jest strumieniem danych z portu szeregowego. Bezpośrednio po inicjalizacji maszyna wchodzi w stan „oczekiwanie na początek ramki”. W tym stanie pozostaje do momentu otrzymania pierwszego znaku ramki, którym w tym wypadku jest znak ‘F’. W następnych dwóch stanach odczytane są dwa bajty (starszy i młodszy) wartości napięcia w [mV]. Następnym stanem jest: „sprawdzenie sumy kontrolnej”; polega on na obliczeniu jej wartości w następujący sposób:

$$F' + X1 + X2 + ctrl, \quad (1)$$

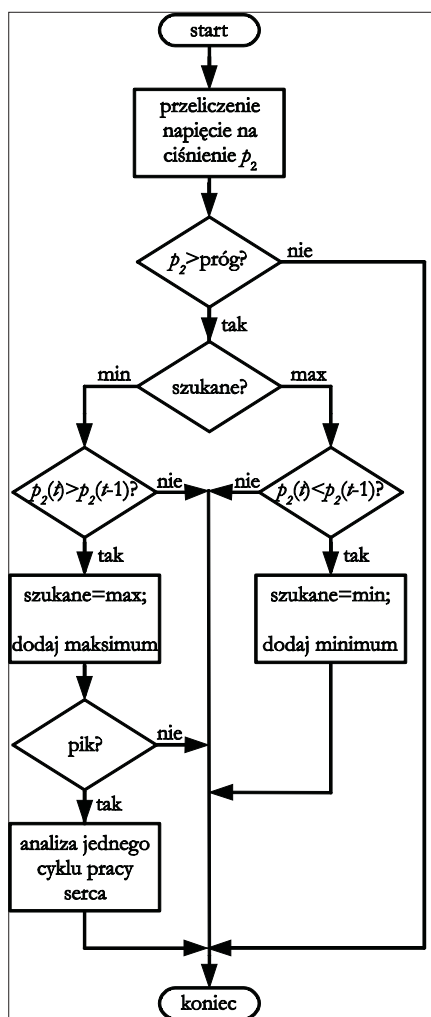
gdzie:  $F'$  — pierwszy bajt ramki (początek ramki),  
 $X1$  — drugi bajt ramki (starszy bajt wartości napięcia),  
 $X2$  — trzeci bajt ramki (młodszy bajt wartości napięcia),  
 $ctrl$  — czwarty bajt ramki (suma kontrolna — bajtowe dopełnienie do zera).

Jeśli suma (1) jest równa zero, wówczas wywoływana jest funkcja „analiza\_punktu”, po której następuje stan „obsługa I/O”, natomiast jeśli suma (1) jest

różna od zera, stan „analiza\_punktu” jest pomijany. Stan „obsługa I/O” wykonuje kilka zadań związanych z interfejsem użytkownika, mianowicie:

- sprawdzanie stanu przycisków,
- odświeżanie ekranu co 50 ms,
- wyczyszczenie okna wykresu w momencie osiągnięcia prawej krawędzi przez wykres.

W zależności od stanu przycisków, program kończy pracę (przycisk stop) albo pozostaje w tym stanie (przycisk pauza), albo przechodzi do stanu „oczekiwanie na początek ramki”.



Rys. 6. Algorytm działania funkcji: „analiza\_punktu”



## Analiza punktu pomiarowego

Algorytm analizy pojedynczego punktu przedstawiono na rysunku 6. Jego podstawowe zadania to:

- przeliczenie napięcia na ciśnienie,
- sprawdzenie, czy czujnik jest dociśnięty do skóry pacjenta,
- wykrywanie i rejestrowanie minimów i maksimów lokalnych,
- wykrywanie ciśnienia skurczowego,
- wywoływanie funkcji „analiza\_cyklu”, gdy zostanie wykryte ciśnienie skurczowe.

### Obliczanie ciśnienia składa się z dwóch etapów:

Etap 1. Wyznaczenie wartości napięcia z dwóch bajtów ( $X_1$  i  $X_2$ ) za pomocą wzoru:

$$U = 256 \cdot X_1 + X_2, \quad (2)$$

gdzie:  $U$  — wartość napięcia w [mV].

Etap 2. Przeliczenie napięcia  $U$  na wartość ciśnienia zgodnie ze wzorem:

$$p_2 = 0,0473 \cdot U + 6,352, \quad (3)$$

gdzie:  $p_2$  — ciśnienie mierzone.

Jeśli ciśnienie  $p_2$  jest mniejsze od wartości progowej równej 20 mmHg, wówczas program wychodzi z funkcji, gdyż czujnik nie został dociśnięty do skóry i program nie rejestruje, nie wyświetla i nie analizuje przebiegu ciśnienia. Natomiast jeśli ciśnienie jest większe od 20 mmHg rejestruje się je i sprawdza, czy obecna wartość jest minimum lub maksimum lokalnym — jeśli tak, to również zapamiętywane jest to ekstremum. W przypadku kiedy jest to maksimum, dodatkowo sprawdza się, czy jest to maksimum związane z ciśnieniem skurczowym. Sprawdzenie polega na odjęciu od obecnego maksimum funkcji ciśnienia poprzedniego minimum. Jeśli wartość ta przekracza 15 mmHg, wywoływana jest funkcja „analiza\_cyklu”.

## Analiza pojedynczej fali tętna

Funkcja „analiza\_cyklu” jest wywoływana w momencie wykrycia ciśnienia skurczowego. Funkcja ta wykonuje wiele zadań związanych z analizą tętna krwi, a jej działanie można zapisać w następujących krokach:

1. Zapisanie obecnej wartości ciśnienia skurczowego.
2. Wyszukanie minimum funkcji ciśnienia  $p_2$ , pomiędzy obecnym a poprzednim zapisanym ciśnieniem skurczowym (wartość ta jest ciśnieniem rozkurczowym).
3. Zapisanie wartości ciśnienia rozkurczowego.
4. Na podstawie dwóch ostatnio zapisanych punktów ciśnienia rozkurczowego wyznaczone jest równanie (współczynniki:  $c_0$  i  $c_1$ ) prostej przechodzącej przez te punkty.
5. Obliczenie „wyprostowanej” fali tętna polega na odjęciu od zarejestrowanej funkcji ciśnienia  $p_2$ , wartości wyliczonych z równania prostej:

$$p_{2w}(t) = p_2(t) - (c_0 \cdot t + c_1).$$

6. Wyświetlenie „wyprostowanej”  $p_{2w}$  fali tętna.
7. Sprawdzenie, czy obecny przebieg posiada maksimum amplitudy — jeśli tak, to odświeża wartość ciśnienia skurczowego i rozkurczowego wyświetlanego na ekranie oraz zaznacza te wartości na wykresie.

Należy zwrócić uwagę, że para współczynników  $c_0$  i  $c_1$  jest indywidualna dla każdej pojedynczej fali tętna.

## Podsumowanie

Współpracę komputera z pneumatycznym czujnikiem ciśnienia krwi można podzielić na dwie części. Pierwsza to przesłanie wartości ciśnienia  $p_2$  zmierzonego czujnikiem do komputera, natomiast druga to przetworzenie i analiza tego ciśnienia. Przesłanie sygnału polega na przetworzeniu sygnału ciśnieniowego na postać cyfrową, a następnie za pomocą USB wysłaniu do komputera. W tym zadaniu główny ciężar spoczywa na mikrokontrolerze, który musi dbać o prawidłowe działanie przetwornika A/C, wyliczać średnią z pomiarów, organizować ramki protokołu i obsługiwać sterownik USB, natomiast komputer tylko odbiera dane. Natomiast jeśli bierzemy pod uwagę przetwarzanie i analizę sygnału, to za całość odpowiedzialny jest komputer, który wyposażony jest w dużo szybszy procesor.

Podczas projektowania układu elektronicznego starano się tak dobierać podzespoły i oprogramowanie, żeby możliwa była łatwa rozbudowa oraz możliwość miniaturyzacji, co jest w dalszych planach.

Artykuł wpłynął do redakcji 14.04.2008 r. Zweryfikowaną wersję po recenzji otrzymano w kwietniu 2008 r.

#### LITERATURA

- [1] M. WERSZKO i in., *Przyrząd do bezinwazyjnego pomiaru fali tętna krwi*, VII Sympozjum — Modelowanie i Pomiary w Medycynie, Krynica, 2005, 107-110.
- [2] M. WERSZKO, K. TOMCZUK, R. WERSZKO, *Nowe konstrukcje pneumatycznego czujnika ciśnienia krwi*, *Pomiary Automatyka Kontrola*, nr 5, 2006, 73-76.
- [3] Microchip inc., *Migrating Applications to USB from RS-232 UART with Minimal Impact on PC Software*, Application Note: AN956, <http://ww1.microchip.com/downloads/en/AppNotes/00956b.pdf>

J. KOSEK

#### **Cooperation between computer and pneumatic blood pressure sensor**

**Abstract.** Cooperation between computer and pneumatic sensor for noninvasive blood pressure monitoring is described. Pressure sensor output is digitized and sent to computer over USB cable after initial filtration in power module. Signal undergoes in a computer for further processes and analysis. Screen displays blood pressure waveform and its basic parameters.

**Keywords:** pneumatic blood pressure sensor, blood pressure waveform analysis, noninvasive blood pressure measurement, medicine — measurements

**Universal Decimal Classification:** 616-072

