ĆWICZENIE NR 5

CZUJNIKI CIŚNIENIA I POMIARY CIŚNIENIA

(opracował Eligiusz Pawłowski)

Cel i zakres ćwiczenia

Celem ćwiczenia jest zapoznanie się z problematyką pomiaru ciśnienia, budową i właściwościami czujników ciśnienia oraz praktyczne przebadanie wybranych modeli czujników: MPX 5050 DP, AR 002-3 (APAR), MAN SD-30 (KOBOLD) oraz analogowego manometru wskazówkowego KFM.

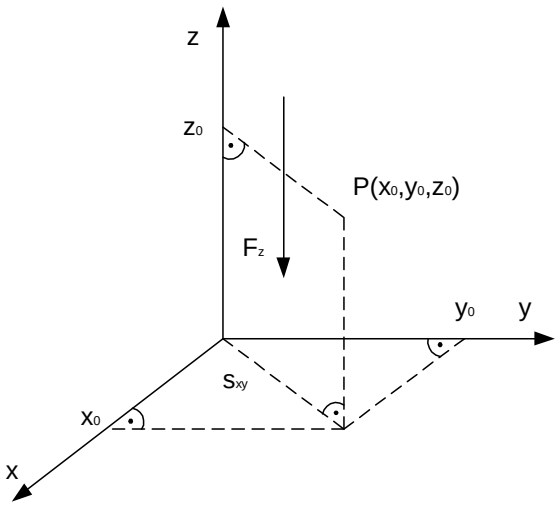
1. WSTĘP

1.1. Podstawowe definicje

Ciśnienie p jest wielkością skalarną opisującą stan gazów lub cieczy liczbowo równą stosunkowi siły wywieranej przez gaz do pola powierzchni na którą ta siła oddziałuje w kierunku prostopadłym. W celu zdefiniowana pojęcia ciśnienia rozpatrujemy pewną powierzchnię S_{xy} równoległą do płaszczyzny XY danego układu kartezjańskiego współrzędnych XYZ, tak jak przedstawiono to na Rys.1. Gaz lub ciecz znajdujący się nad powierzchnią S_{xy} oddziałuje na nią z pewną siłą F. Rozpatrujemy składową siły F_z działającą wzdłuż osi Z, czyli prostopadłą do powierzchni S_{xy}.

Ciśnienie p jest równe ilościowo granicy ilorazu siły F_z normalnej (prostopadłej) do pola powierzchni S_{xy}, na które działa ta siła:

$$p = \lim_{\Delta S \to 0} \frac{\Delta F_z}{\Delta S_{xy}} = \frac{dF_z}{dS_{xy}} \ . \tag{1}$$



Rys. 1. Definiowanie ciśnienia w kartezjańskim układzie współrzędnych

Jeśli rozkład siły na powierzchni jest równomierny, to ciśnienie p jest to siła F działająca prostopadle na jednostkę powierzchni S:

$$p = \frac{F}{S} \ . \tag{2}$$

W każdej metodzie pomiaru ciśnienia dokonujemy pomiaru względem pewnego ciśnienia odniesienia. Ciśnienie odniesienia jest to ciśnienie występujące pod powierzchnią S_{xy} na Rys. 1. Jeżeli ciśnieniem odniesienia jest ciśnienie próżni (które jest równe zero), wówczas mówimy o pomiarze ciśnienia absolutnego (bezwzględnego). W taki właśnie sposób wykonuje się pomiary ciśnienia atmosferycznego, ciśnieniem odniesienia jest w tym przypadku właśnie ciśnienie próżni. W większości przypadków dokonujemy jednak pomiarów ciśnienia względnego, przyjmując zazwyczaj jako ciśnienie odniesienia wartość ciśnienia atmosferycznego. Jeżeli mierzone ciśnienie ma wartość większą od ciśnienia atmosferycznego mówimy o nadciśnieniu, jeżeli mniejszą – o podciśnieniu.

1.2. Jednostki ciśnienia

Z postaci równania (2) wynika, że jednostką ciśnienia jest iloraz jednostki siły i jednostki powierzchni. Wobec tego, w układzie SI jednostką ciśnienia jest jeden niuton na jeden metr kwadratowy ($1N/1m^2$), której nadano nazwę paskal (Pa):

$$1\text{Pa} = \frac{1\text{N}}{1\text{m}^2}.$$

Ponieważ 1Pa jest jednostką małą, często w praktyce używa się jego wielokrotności:

$$1\text{hPa} = 10^2\text{Pa},$$

$$1\text{MPa} = 10^6\text{Pa}.$$

Ze względów praktycznych (wystarczający jest zapis wartości całkowitych bez części ułamkowej) w prognozach pogody zazwyczaj ciśnienie atmosferyczne wyraża się w hPa (np. 1013hPa). W praktyce spotyka się również jednostkę 1bar, która jest wielokrotnością paskala:

$$1\text{bar} = 10^5\text{Pa} = 100\ \text{kPa} = 0{,}1\text{MPa}$$

W jednostce tej również podaje się czasami wartość ciśnienia atmosferycznego, przy czym stosuje się podwielokrotność 1mbar, odpowiadającą 1hPa (np. 1013mbar).

W literaturze spotykanych jest wiele innych jednostek, które również stosowane są w praktyce ze względów historycznych oraz jako pochodne jednostek miar stosowanych w krajach anglosaskich.

Historycznie najstarszą jednostką ciśnienia używaną do dzisiaj jest 1mmHg (jeden milimetr słupka rtęci). Rodowód tej jednostki wywodzi się z doświadczenia Torricielli'ego, polegającego na odwróceniu rurki o długości 1m wypełnionej rtęcią w taki sposób, że rtęć częściowo wypływa z rurki do naczynia, tworząc w górnej części próżnię (Rys. 2). Wysokość słupka rtęci, zależna od ciśnienia zewnętrznego (atmosferycznego), była miarą ciśnienia atmosferycznego. Do dnia dzisiejszego wiele przyrządów medycznych i meteorologicznych jest wyskalowanych w milimetrach słupka rtęci, ponadto w prognozach pogody oprócz wartości ciśnienia podawanego w hPa lub mbar podaje się również ciśnienie w mmHg.

Pomiędzy 1mmHg oraz 1Pa w przyjętych przez fizyków termodynamicznych warunkach odniesienia obowiązuje zależność:

$$1\text{mmHg} = 133{,}322\text{Pa}.$$

Jednostkę 1mmHg w temperaturze 1^oC nazwano torem:

$$1\text{Tor} = 1\text{mmHg}.$$

Jedną z najczęściej spotykanych jednostek pozaukładowych jest atmosfera techniczna at, definiowana jako ciśnienie, które wywołuje 1 kilogram siły kG działając na powierzchnię $1cm^2$. Kilogram siły kG jest siłą z jaką Ziemia przyciąga masę 1kg. Stąd łatwo można obliczyć, że:

$$1at = 98066,5Pa = 980,665hPa.$$

Bliską co do wartości atmosferze technicznej at jest atmosfera fizyczna atm, której wartość jest równa tzw. normalnemu ciśnieniu atmosferycznemu, za które uznaje się ciśnienie 760 mmHg na poziomie morza w temperaturze 0^oC i na 45^o równoleżniku szerokości geograficznej:

$$1atm = 1,0333227at = 760Tr = 1013,25hPa = 101325N/m^2 .$$

Warto zauważyć, że jednostka 1bar jest liczbowo bardzo bliska atmosferze fizycznej atm:

$$1atm = 1013,25hPa \approx 10^5Pa = 1bar.$$

W krajach anglosaskich popularną jednostką ciśnienia jest PSI, odpowiadającą ciśnieniu jednego funta na cal kwadratowy (Pounds per Square Inch):

$$1bar = 100kPa \approx 14,5PSI$$

W Tabeli 1. przedstawione zostały różne jednostki ciśnienia oraz ich wzajemne relacje.

Tabela 1. Najczęściej spotykane jednostki ciśnienia

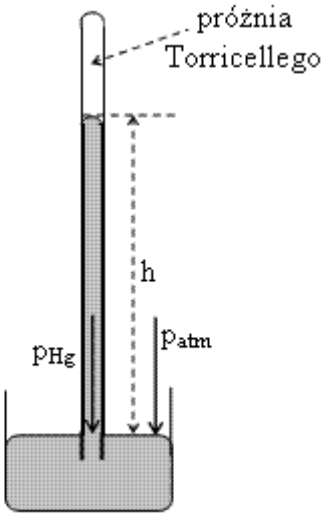
Przeliczenie na:		**kPa**	**bar**	**mmHg (Tor)**	**mmH_2O**
Jednostka:	**kPa**	**1**	0,01	7,5006	101,973
	bar	100	**1**	750,06	10197,3
	mmHg (Tor)	0,13332	$1,3332 \cdot 10^{-3}$	**1**	13,5951
	mmH_2O	0,09806	$98,06 \cdot 10^{-6}$	0,07355	**1**
	Pounds per square inch PSI	6,8948	$68,948 \cdot 10^{-3}$	51,715	703,09
	In. H_2O	0,2491	0,002491	1,8683	25,400
	In. Hg	3,3864	0,033864	25,400	345,32
	atm	101,325	1,01325	760	10332,3
	at	98,0665	0,980665	735,559	10000

2. POMIARY CIŚNIENIA

2.1. Zasady pomiaru ciśnienia

Od dawnych czasów „łupanie w kościach” i „rwanie w stawach” było naturalnym miernikiem zmian pogodowych jakie miały wkrótce nastąpić. Wszyscy podlegamy naciskowi powietrza, które otacza całą kulę ziemską. Przy powierzchni ciała dorosłego człowieka wynoszącej około $2m^2$ nacisk powietrza osiąga wartość rzędu 20 ton. Nie odczuwamy tego, gdyż wewnętrzne ciśnienie występujące w każdej z komórek naszego organizmu równoważy tę wielkość, jednocześnie jesteśmy w stanie odczuć zmiany ciśnienia na poziomie 1 %. Przy niższym ciśnieniu atmosferycznym osoby wrażliwe (meteopaci) odczuwają senność i bóle głowy. Przez lata ludzie nie uświadamiali sobie istnienia ciśnienia atmosferycznego. Włoski fizyk i matematyk Evangelista Torricielli (1608-1647) w roku 1643 wykazał doświadczalnie istnienie ciśnienia atmosferycznego za pomocą wynalezionego przez siebie barometru rtęciowego (co zostało uwiecznione w nazwie jednostki ciśnienia atmosferycznego Tor).

Uproszczoną konstrukcje barometru rtęciowego Torriciellego przedstawia Rys. 2. Doświadczenie to polegało na odwróceniu zasklepionej na jednym końcu rurki szklanej wypełnionej rtęcią i zanurzeniu jej w naczyniu wypełnionym rtęcią. Torricielli zauważył, że poziom rtęci w rurce ustala się na pewnej wysokości *h* względem powierzchni rtęci w naczyniu głównym. Wysokość słupka rtęci *h* okazała się zależna od wielkości ciśnienia zewnętrznego (atmosferycznego) p_{atm}, które w stanie równowagi było równe ciśnieniu słupka rtęci p_{Hg}. Przestrzeń nad rtęcią w rurce nazwano próżnią Torricielli'ego. Doświadczenie to zostało wykorzystane do budowy barometrów rtęciowych.



Rys. 2. Ilustracja doświadczenia Torricielli'ego, konstrukcja pierwszego barometru rtęciowego

Współcześnie do pomiarów ciśnienia stosuje się czujniki o różnych konstrukcjach. Przyrządy oparte na konstrukcji barometru Torriciell'ego są bardzo kłopotliwe w stosowaniu i niebezpieczne ze względu na trujące właściwości rtęci, dlatego praktycznie nie są już stosowane. Obecnie produkowane i stosowane czujniki ciśnienia wykorzystują właściwości sprężystej membrany płaskiej poddanej ciśnieniu gazu z jednej lub dwóch stron. Odkształcenie membrany jest miarą mierzonego ciśnienia (ściślej biorąc różnicy ciśnień).

Jeżeli membranę płaską kolistą o promieniu *R* zamocuje się sztywno i różnica ciśnień (p-p_0) działających na powierzchnię membrany będzie różna od zera, to membrana ulegnie odkształceniu w sposób przedstawiony na Rys.3a.

Oznaczając przez *w(r)* odkształcenie membrany w odległości *r* od jej środka, otrzymujemy zależność:

$$w(r) = (p - p_0) \cdot \left(1 - \frac{r^2}{R^2}\right)^2 \cdot F_m \tag{3}$$

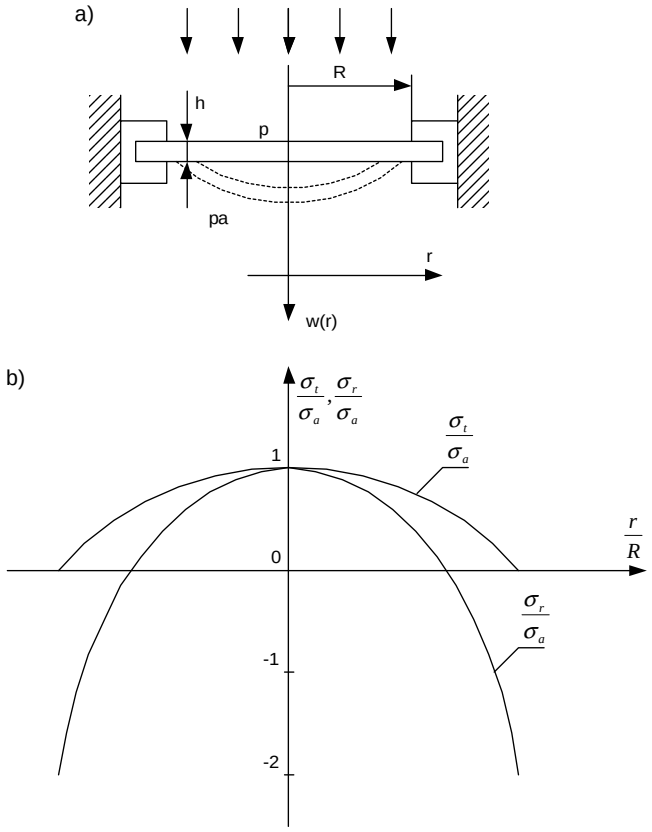
gdzie *Fm* jest stałą membrany zależną od jej wymiarów, modułu sprężystości E_γ i liczby Poissona ν:

$$F_m = \frac{3 \cdot \left(1 - \nu^2\right) \cdot R^2}{16 \cdot E_\gamma \cdot h^3} \tag{4}$$

W wyniku odkształcenia membrany *w(r)* na jej powierzchni pojawiają się naprężenia σ posiadające dwie składowe:

- składową skierowaną zgodnie z promieniem membrany – radialną σ_r,
- składową styczną do okręgu o promieniu r nazywaną składową tangencjalną σ_t.

Na Rys. 3b przedstawiono rozkład względnych naprężeń radialnych i tangencjalnych wzdłuż promienia membrany, odnosząc je do wartości naprężenia σ_a występującego w środku membrany. Charakterystyki te mają kształt odwróconych parabol o wierzchołku w punkcie (*0,1*), przy czym charakterystyka względnego naprężenia tangencjalnego przyjmuje tylko wartości dodatnie, zaś charakterystyka względnego naprężenia radialnego przyjmuje wartości zarówno dodatnie jak i ujemne. Fakt ten ma istotne znaczenie przy konstrukcji niektórych typów tensometrycznych przetworników ciśnienia. Umożliwia to takie rozmieszczenie tensometrów, aby tensometry znajdujące się w sąsiednich gałęziach mostka były poddane działaniu naprężeń o różnych znakach (przykład na Rys. 6), co powoduje zwiększenie czułości i zapewnia kompensację temperaturową.



Rys. 3. Membrana płaska w czujniku ciśnienia: a – odkształcona w wyniku działania ciśnienia $p>p_0$, b – rozkład naprężeń radialnych σ_r i tangencjalnych σ_t na powierzchni membrany

Poszczególne rodzaje czujników ciśnienia różnią się materiałem, z którego wykonana jest membrana oraz sposobem pomiaru odkształcenia membrany. Czujniki mogą być wykonane klasycznymi technologiami wykorzystującymi mechanikę precyzyjną współpracującą z układami elektronicznymi lub w technologii zwanej mikro-elektro-mechaniczne systemy (MEMS – *Micro-Electro-Mechanical-Systems*).

Jako materiał na membranę obecnie stosuje się:

- metale (głównie w konstrukcjach klasycznych),
- krzem (technologie głębokiego anizotropowego trawienia krzemu),
- ceramikę (układy hybrydowe, krzemowo - ceramiczne).

Do pomiaru odkształcenia membrany stosowane są:

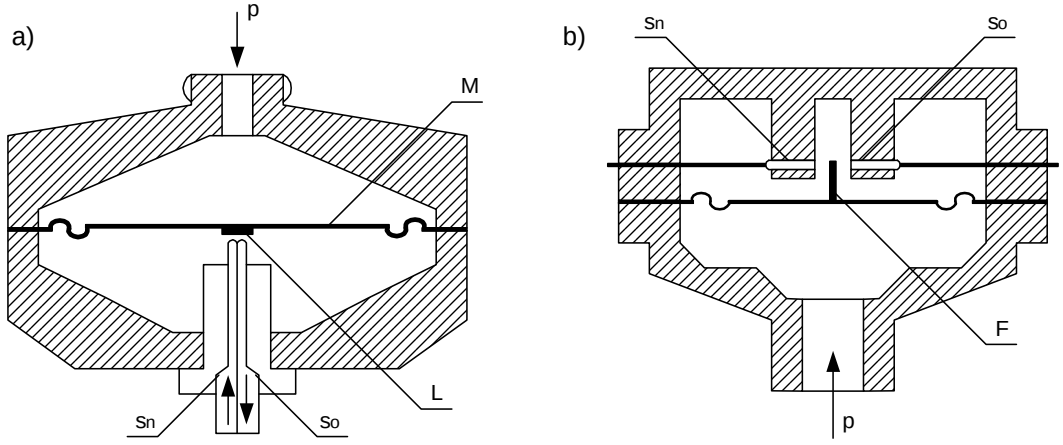
- światłowodowe czujniki przesunięcia,
- indukcyjne czujniki przesunięcia,
- pojemnościowe czujniki przesunięcia,

- tensometryczne czujniki odkształcenia,
- piezorezystancyjne czujniki odkształcenia,
- piezoelektryczne czujniki siły.

Współcześnie główny udział w rynku mają czujniki półprzewodnikowe wykonywane w jednym krysztale krzemu, w którym wytrawiono krzemową membraną wraz z przetwornikami tensometrycznymi i układem elektronicznym wzmacniającym i obrabiającym wstępnie sygnał pomiarowy. W submilimetrowej skali przyrządów elektronicznych takie materiały jak krzem wykazują bardzo dużą odporność na zmęczenie, co jest bardzo rzadko spotykane w skali makro. Dzięki temu membrana krzemowa może być zginana praktycznie nieskończenie długo, w wyniku czego czujnik taki jest bardzo trwały. Na wyjściu otrzymuje się sygnał cyfrowy lub analogowy do wyprowadzenia na przetwornik analogowo-cyfrowy, najczęściej o liniowej zależności wielkości wyjściowej od ciśnienia. Do produkcji tego typu przyrządów wykorzystuje się najczęściej technologie mikro-elektro-mechaniczne MEMS. Coraz częściej spotkać można tez czujniki wykonane w technologii SOS (*Silicon on Sapphire*), łączącej krzem z ceramiką.

2.2. Konstrukcje czujników ciśnienia

Na Rys. 4. przedstawiono dwie konstrukcje przetworników ciśnienia z membraną płaską, w których przemieszczenie membrany wywołane mierzonym ciśnieniem zostaje przetworzone na zmianę strumienia świetlnego przetworników światłowodowych. Przemieszczenie membrany M można dobrać tak, aby punkt pracy przetwornika światłowodowego znajdował się na liniowej części charakterystyki przetwarzania. Wtedy, uwzględniając niewielkie przemieszczenie środka membrany otrzymuje się liniowe przetworzenie ciśnienia na zmianę strumienia świetlnego. Na Rys.4b przedstawione zostało rozwiązanie, w którym przemieszczenie membrany jest przetworzone na zmianę strumienia świetlnego w przetworniku światłowodowym przesłonowym, w którym przesłona F ogranicza strumień świetlny wychodzący ze światłowodu nadawczego (s_n), w taki sposób, że strumień dochodzący do światłowodu odbiorczego (s_o) jest modulowany przemieszczeniem membrany. W ogólnym przypadku charakterystyka przetwarzania takiego przetwornika jest nieliniowa, ale poprzez odpowiednie ukształtowanie przesłony można uzyskać również charakterystykę liniową.



Rys. 4 Przykłady konstrukcji przetworników ciśnienia bezwzględnego ze sprężystą membraną metalową i z detekcją światłowodową przemieszczenia za pomocą: a – przetwornika odbiciowego, b – przetwornika przesłonowego

Przetworniki światłowodowe są niewrażliwe na działanie fal elektromagnetycznych i stąd zakres zastosowań tych przetworników ogranicza się do sytuacji pomiarowych, w których

występują bardzo silne pola elektromagnetyczne. Są one jednak wrażliwe na zmiany temperatury – wówczas termiczna deformacja obudowy i membrany może być powodem dodatkowego przemieszczenia membrany i tym samym dodatkowego błędu.

Na Rys. 5. przedstawiono dwie konstrukcje przetworników ciśnienia z pojemnościowym czujnikiem przemieszczenia membrany. W czujnikach tych przemieszczenie membrany spowodowane mierzonym ciśnieniem przetwarzane jest na zmianę pojemności. Membrana stanowi jedną elektrodę kondensatora – druga elektroda znajduje się nad membraną i ma najczęściej kształt kołowy. Odwrotność pojemności utworzonego w ten sposób kondensatora jest równa:

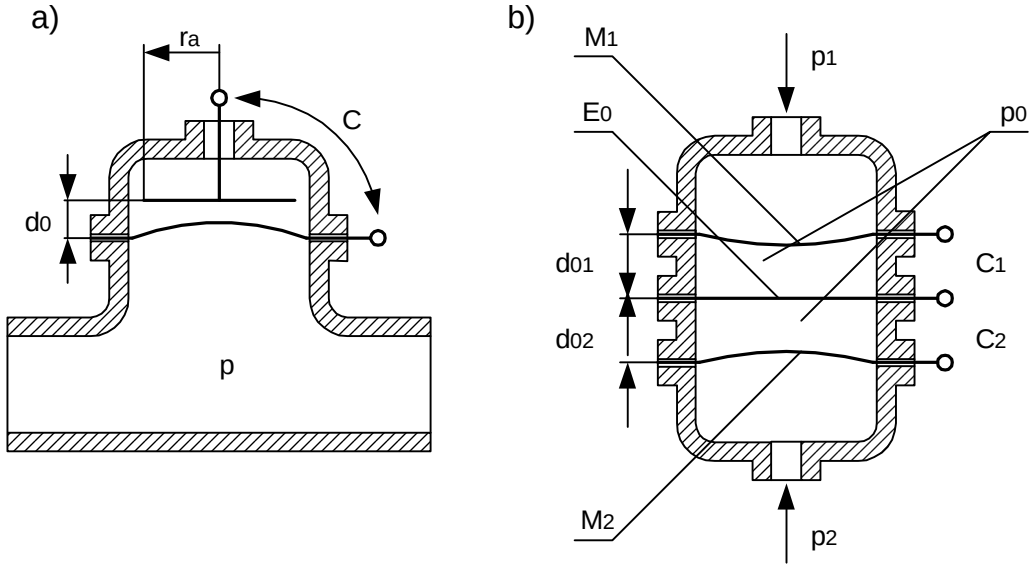
$$\frac{1}{C} = \frac{d_0 + A \cdot F_m \cdot (p - p_0)}{\varepsilon \cdot \varepsilon_0 \cdot \pi \cdot r_a^2}, \tag{5}$$

przy czym przyjmuje się współczynnik A zależnie od ilorazu promieni równy:

$$\frac{r_a}{R} = 1 \rightarrow A = 1$$

$$\frac{r_a}{R} = 0{,}5 \rightarrow A = 0{,}8$$

Wartości pojemności *C* są rzędu kilkuset pikofaradów, natomiast jej zmiany powstałe pod wpływem zmian ciśnienia rzędu kilkunastu pikofaradów. W związku z tym na zmianę pojemności silnie wpływają takie wielkości jak: temperatura, zmiana stałej dielektrycznej pod wpływem wilgoci itp. Zmniejszenie wpływu wilgoci można otrzymać wypełniając przestrzeń nad membraną olejem izolacyjnym – wprowadza się wtedy pomiędzy elektrody dielektryk znacznie mniej wrażliwy na wpływ wilgoci.



Rys. 5 Schematy pojemnościowych przetworników ciśnienia z membraną metalową: a – z kondensatorem pojedynczym, b – z kondensatorem różnicowym do pomiaru różnicy ciśnień

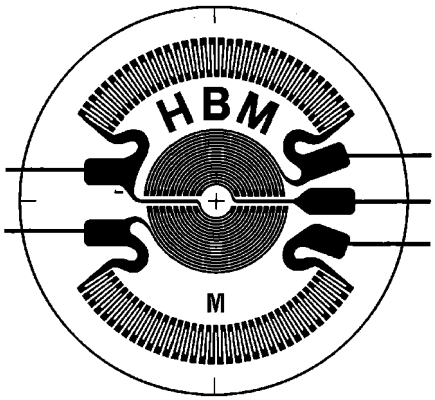
Wpływ temperatury, wilgoci itp. na wynik pomiaru ulega znaczącemu zmniejszeniu w konstrukcji różnicowej przetwornika pojemnościowego, przedstawionej na Rys.6b, służącej do pomiaru różnicy ciśnień.

Przyjmując, że początkowa odległość membran M_1 oraz M_2 od elektrody odniesienia E_0 jest tak sama ($d_{01} = d_{02}$), oraz stałe elementów membrany są sobie równe ($F_{m1} = F_{m2} = F_m$), różnica odwrotności pojemności jest równa:

$$\frac{1}{C_1} - \frac{1}{C_2} = \frac{A \cdot F_m \cdot (p_2 - p_1)}{\varepsilon \cdot \varepsilon_0 \cdot \pi \cdot r_a^2}. \tag{6}$$

Różnica odwrotności pojemności jest liniowo zależna od różnicy ciśnień. Należy zauważyć, że przetwornik o takiej konstrukcji reaguje na różnicę ciśnień dwóch mediów. Przetwornik różnicy ciśnień, z membranami metalowymi oraz detekcją przemieszczenia za pomocą pomiaru zmian pojemności pomiędzy elektrodami przytwierdzonymi do membran, jest najczęściej stosowanym przetwornikiem różnicy ciśnień. Pojemności C_1, C_2 pracują w układzie mostka czteroramiennego, zasilanego napięciem o częstotliwości rzędu kilkudziesięciu kHz, najczęściej około 20 kHz. Jak łatwo obliczyć pojemności kondensatorów $C_1 \approx C_2$ są w przybliżeniu równe 150pF i dla częstotliwości zasilania 20kHz reaktancja kondensatora jest w przybliżeniu równa 50kΩ.

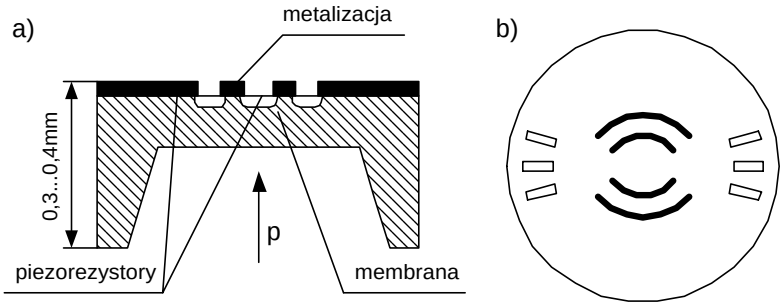
Jedną z najstarszych grup przetworników ciśnienia są przetworniki z membraną płaską i tensometrycznym przetwornikiem odkształcenia membrany. Charakteryzują się dużą dokładnością, przy czym zakres pomiaru ciśnienia zależy od parametrów membrany, głównie od jej grubości. Rozkład naprężeń radialnych oraz tangencjalnych na powierzchni membrany przedstawiony na Rys.3b wskazuje na możliwość umieszczenia tensometrów na powierzchni membrany w taki sposób, aby dwa z nich były poddane naprężeniom rozciągającym (względne naprężenia większe od zera), a dwa – ściskającym (względne naprężenia mniejsze od zera). Pozwala to na połączenie tensometrów w układ mostka czteroramiennego. Typowy kształt tensometru foliowego stosowanego do naklejania na membrany czujników ciśnienia przedstawia Rys.6. Zewnętrzne tensometry reagują na naprężenia radialne, a wewnętrzne na tangencjalne, a więc znaki tych naprężeń są przeciwne.



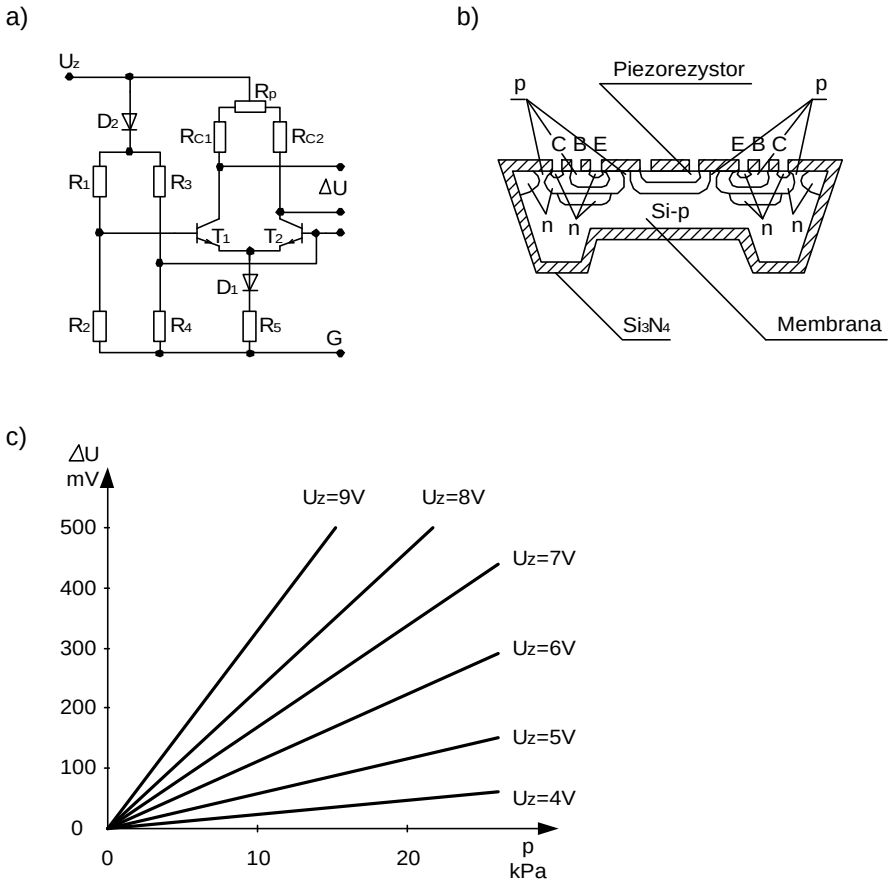
Rys. 6. Kształt typowego tensometru foliowego stosowanego na membranach

Najbardziej zawansowaną technologią jest wykonanie membrany i czujników odkształcenia w jednym krysztale krzemu. W odróżnieniu od efektu tensometrycznego występującego w metalach, w monokrystalicznym krzemie wykorzystuje się efekt piezorezystywności. Na Rys.7 przedstawiono przykładową konstrukcję przetwornika piezorezystancyjngo z membraną krzemową. Elementem reagującym na ciśnienie jest cienka, o grubości do 1µm do 25µm, kwadratowa lub kołowa membrana, w którą zaimplantowano piezorezystory. Rozmieszczenie i liczba piezorezystorów zależy od konstrukcji przetwornika – minimalna liczba piezorezystorów jest równa cztery. Najczęściej wykonuje się sześć lub dziewięć piezorezystorów, z których można dobrać cztery do połączenia w układ mostka o minimalnym napięciu wyjściowym. Piezorezystory wykonuje się stosując tą samą

technologię, w jakiej wykonuje się elementy półprzewodnikowe (np. wzmacniacze operacyjne). W jednym procesie produkcyjnym na płytce krzemowej wykonuje się jednocześnie kilkanaście lub kilkadziesiąt przetworników.



Rys. 7 Przykład: a – przetwornika ciśnienia z membraną krzemową i wdyfundowanymi piezorezystorami, b – rozłożenia piezorezystorów w krzemie



Rys. 8. Zintegrowany przetwornik ciśnienia z membrana krzemową: a – schemat ideowy, b – rozmieszczenie obszarów półprzewodnika typu n oraz p w krzemie, c – charakterystyki przetwarzania

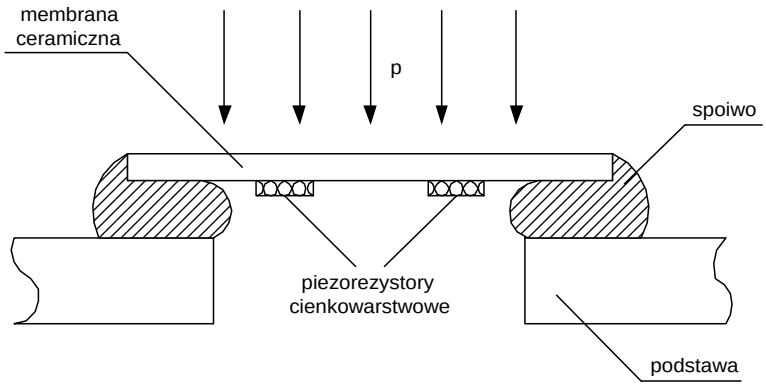
Nakładając na płytkę krzemową warstwę emulsji i po naświetleniu poprzez maskę i odsłonięciu tylko tych fragmentów płytki, w których mają powstać piezorezystory wdyfundowuje się do krzemu odpowiednie domieszki uzyskując fragment przewodzący. W następnym etapie, poprzez odsłonięcie, poprzez kolejny proces maskowania samych końcówek piezorezystora naparowuje się metalizację otrzymując metalowe styki, do których przylutowuje się przewody (najczęściej ze złota o średnicy 50µm), łączące piezorezystor z podstawką. Miejscowe zmniejszenie grubości płytki krzemowej uzyskuje się najczęściej w procesie lokalnego wytrawiania monokryształu. Po zakończeniu obróbki całej płytki następuje

jej podział – wycinany jest poszczególny element aktywny przetwornika. Następnie wycięte elementy aktywne doklejane są za pomocą żywicy termoutwardzalnej do korpusu ceramicznego, w którym znajduje się otwór. W otworze tym umieszczona jest rurka, poprzez którą doprowadza się do membrany mierzone ciśnienie. Ze względów technologicznych (małe rozmiary konstrukcji) trudnym zagadnieniem jest zapewnienie szczelności pomiędzy membraną a doprowadzeniem mierzonego ciśnienia.

Kolejnym etapem rozwoju przetworników piezorezystancyjnych jest ich integracja z układami wzmacniającymi, wykonanymi na tej samej płytce krzemowej, na której wykonano piezorezystory. Piezorezystory oraz układy elektroniczne wykonywane są wtedy w tym samym cyklu produkcyjnym. Przykład takiego rozwiązania przedstawia Rys.8a, gdzie piezorezystory tworzą mostek oznaczony $R_1...R_4$, a napięcie przekątnej pomiarowej doprowadzone jest do baz tranzystorów wzmacniacza różnicowego. Potencjometr w obwodzie kolektorów pozwala na korekcję napięcia zerowego, dzięki czemu charakterystyki przetwornika zaczynają się od zera – Rys.8c. Na Rys.8b przedstawione jest rozłożenie warstw odpowiednio domieszkowanych, tworzących tranzystory oraz piezorezystory. Zintegrowane przetworniki ciśnienia są produkowane przez prawie wszystkie najważniejsze firmy światowe. Stanowią one dzisiaj grupę powszechnie dostępnych, miniaturowych czujników adresowanych do różnych zastosowań. Mają jednak istotne ograniczenie – dopuszczalny zakres temperatury pracy do około 150^{o}C. Ograniczenia tego nie posiadają przetworniki z membraną ceramiczną.

Na Rys.9. przedstawione zostały schematycznie podstawowe elementy przetwornika, w którym membrana krzemowa zastąpiona została ceramiczną. Rezystory wykonane są jako cienkowarstwowe – techniką napylania. Wykonywane są najczęściej z chromonikieliny (*NiCr*) lub azotku tantalu (*TaN*). Efekt zmiany rezystancji występuje w rezystorach napylonych na ceramikę w analogiczny sposób jak w przypadku tensometrów tradycyjnych – główny udział w zmianie rezystancji ma zmiana ich wymiarów geometrycznych.

Jednak ze względu na przyjętą powszechnie w literaturze nazwę dla napylonych na membranę ceramiczną rezystorów metalowych, taką samą jak dla wdyfundowanych w półprzewodniki stosuje się również określenie – piezorezystory cienkowarstwowe. Grubość napylenia na ceramikę waha się w granicach od 5µm do 15µm, szerokość około 0,1mm, długość około 2mm. Materiałem najczęściej stosowanym na membrany jest ceramika korundowa o zawartości *99,5%* Al_2O_3. Materiał ten posiada bardzo dobre właściwości mechaniczne: moduł sprężystości $E_\gamma = 380 \cdot 10^9$Pa, liczba Poissona $\nu = 0{,}22$. W szerokim zakresie temperatur – do 1000^{o}C właściwości te zmieniają się w sposób nie wpływający na pracę przetwornika. Materiał ten charakteryzuje się dużą odpornością na działanie kwasów i szkodliwych czynników atmosferycznych.



Rys. 9. Podstawowa konstrukcja przetwornika z membraną ceramiczną

Proces produkcji czujników z membraną ceramiczną odbywa się w dwóch etapach. W pierwszym, na płytce ceramiki, z której będą wycinane membrany wykonuje się jednocześnie metodą nanoszenia cienkich warstw i technik fotolitograficznych piezorezystory wraz z końcówkami kontaktowymi. Z kolei, po rozcięciu płytki ceramicznej za pomocą lasera na poszczególne membrany, mocuje się, uszczelnia i wykonuje połączenia końcówek piezorezystorów z końcówkami wyjściowymi obudowy.

Innym rozwiązaniem przetworników z membraną ceramiczną są przetworniki, w których na membranę nakłada się elektrodę stanowiącą jedną z elektrod kondensatora.

Typowe rozmiary membrany dla przetwornika o zakresie pomiaru do 600kPa są równe: średnica 7,5mm, grubość 200μm. Połączenie przetwornika z podstawą jest operacją krytyczną, warunkującą przebieg charakterystyki przetwornika. Podobnie jak w przypadku piezorezystorów wdyfundowanych w krzem, technologia wykonania piezorezystorów cienkowarstwowych nie pozwala na wykonanie piezorezystorów o takich samych wartościach – dlatego po dobraniu elementów mostka klasyfikuje się wykonane przetworniki w zależności od parametrów metrologicznych – w sposób analogiczny jak w przypadku przetworników z membranami kwarcowymi.

W przetwornikach ciśnienia piezoelektrycznych wykorzystuje się zjawisko piezoelektryczne. Liczbowo ciśnienie działające na powierzchnie kryształu piezoelektryka jest równe naprężeniu występującemu w krysztale, które powoduje indukowanie się ładunku na powierzchniach kryształu ze względu na właściwości efektu piezoelektrycznego. Takie przetworniki ciśnienia znalazły zastosowanie w pomiarach ciśnień szybkozmiennych. Kryształ piezoelektryka w przetworniku jest umieszczony w taki sposób, aby mierzone ciśnienie działało bezpośrednio na powierzchnie kryształu, a nie poprzez pośrednie elementy, jak to ma miejsce w przypadku piezoelektrycznych przetworników siły. Cechą charakterystyczną piezoelektrycznych przetworników ciśnienia jest bardzo szeroki zakres pomiaru, przy jednoczesnym zachowaniu liniowości charakterystyki przetwarzania. W dobrych konstrukcjach produkowanych seryjnie piezoelektrycznych przetworników ciśnienia ten sam przetwornik może mierzyć ciśnienia np. z zakresu (0...0,25)MPa oraz (0...25)MPa przy jednakowej czułości, rzędu $170\ {}^{pC}\!/_{MPa}$, przy czym niedokładność przetwarzania odniesiona do zakresu pomiaru jest rzędu ±0,3% dla każdego zakresu. Przetworniki piezoelektryczne ciśnienia wykonuje się najczęściej z kryształem kwarcu, dla zakresów do 300MPa, turmalinu, dla zakresów do 700MPa oraz tytanianu baru, dla małych zakresów – rzędu kPa.

2.3. Zastosowania czujników ciśnienia

Ze względu na duży zakres ciśnień, jakie występują w różnych procesach przemysłowych oraz w innych zastosowaniach, przyjmuje się często podział ciśnień na następujące przedziały:

- ciśnienia bardzo niskie – do 6kPa,
- ciśnienia niskie – do 0,25MPa,
- ciśnienia średnie – do 60MPa,
- ciśnienia wysokie – do 4000MPa,
- ciśnienia bardzo wysokie – powyżej 4000MPa.

Nowoczesne czujniki do pomiaru ciśnienia znajdują szerokie zastosowanie w przemyśle, meteorologii, technice samochodowej, w aparaturze medycznej oraz w sprzęcie powszechnego użytku. Do najczęstszych zastosowań można zaliczyć:

- przemysł – pomiar i nadzór ciśnienia w procesach produkcyjnych,

- technika motoryzacyjna - pomiary ciśnienia w układzie: smarowania, hamulcowym, wspomagania hamowania, wspomagania kierownicy, w kolektorze dolotowym do układu wtrysku paliwa, w układzie wtrysku paliwa, w układzie wydechowym, w kołach, w układzie klimatyzacji,
- aparatura medyczna - pomiary ciśnienia tętniczego krwi, pomiary ciśnienia wewnątrzczaszkowego, pomiary ciśnień wewnątrzsercowych,
- meteorologia - barometry do pomiaru ciśnienia atmosferycznego,
- sprzęt gospodarstwa domowego (np. w odkurzaczach),
- układy klimatyzacji i ogrzewania budynków,
- technika lotnicza - w wysokościomierzach, w układach kontroli i sterownia silników,
- technika wojskowa (np. w okrętach podwodnych – pomiar głębokości zanurzenia).

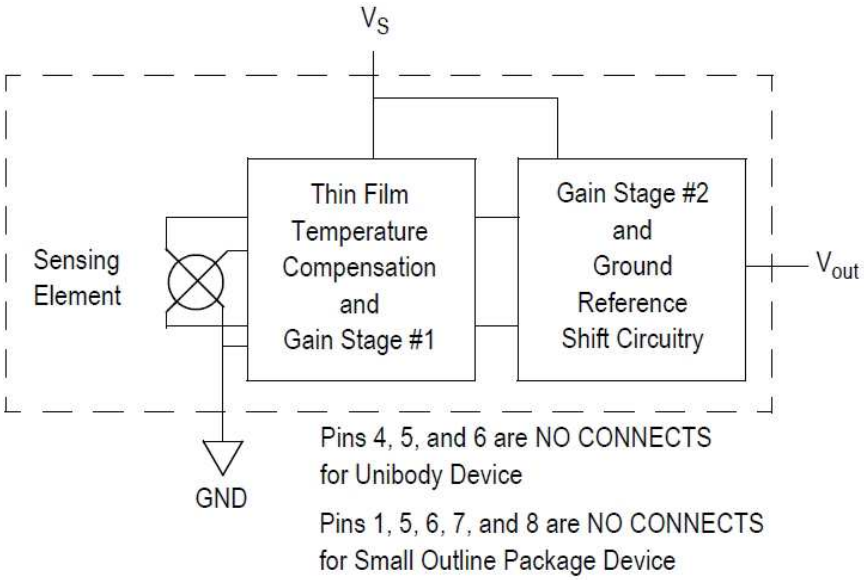
3. OPIS STANOWISKA POMIAROWEGO

Stanowisko pomiarowe wykorzystywane w ćwiczeniu składa się z dwóch niezależnych części. Pierwsza z nich wykorzystuje scalony przetwornik ciśnienia MPX5050DP i umożliwia pomiary w zakresie do 300mmHg, zarówno w stanie statycznym jak i dynamicznym. Druga część wykorzystuje przemysłowe czujniki ciśnienia AR 002-3 (APAR), MAN SD-30 (KOBOLD) oraz analogowy manometr wskazówkowy KFM i umożliwia pomiary w zakresie do 0,5MPa, tylko w stanie statycznym.

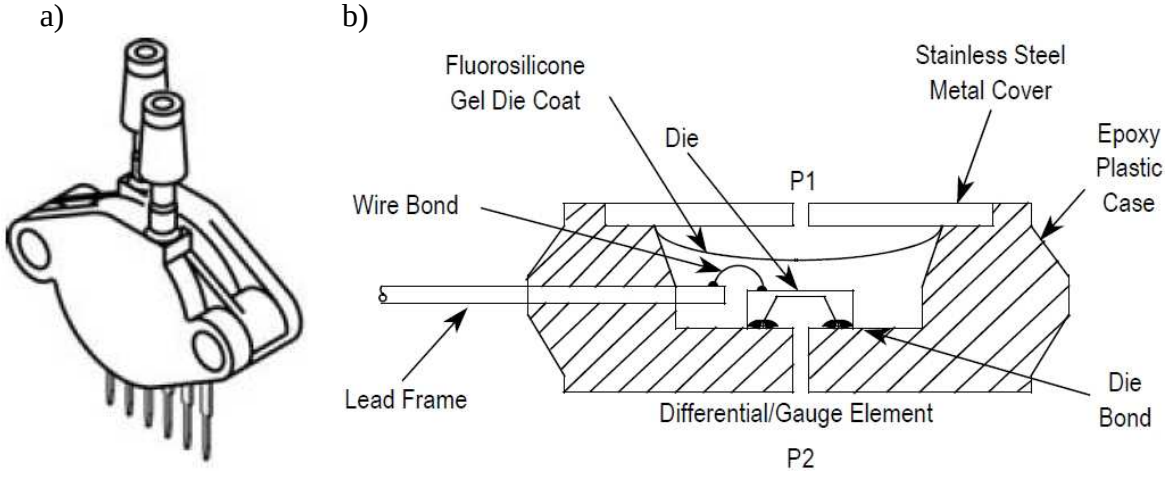
3.1. Stanowisko do pomiarów niskich ciśnień w stanie statycznym i dynamicznym

W konstrukcji tej części stanowiska pomiarowego zastosowano nowoczesny piezorezystancyjny różnicowy czujnik ciśnienia z membraną krzemową firmy Freescale Semiconductor (dawniej Motorola) MPX5050DP [1] o zakresie pomiarowym 50kPa, skalibrowany i skompensowany temperaturowo, z umieszczonym we wspólnej obudowie układem kondycjonowania sygnału. Układ zadawania ciśnienia zrealizowano w oparciu o elementy ciśnieniomierza lekarskiego. Schemat blokowy czujnika przedstawiono na Rys.10, a jego obudowę typu 867C oraz przekrój przez jego strukturę na Rys.11.

W tabelach 2 i 3 zestawiono najważniejsze parametry czujnika. Na Rys.12. przedstawiono charakterystyki napięcia wyjściowego czujnika V_{out} w zależności ciśnienia różnicowego p.



Rys.10. Schemat blokowy scalonego czujnika ciśnienia MPX5050 [1]



Rys.11. Budowa czujnika ciśnienia MPX5050DP, a) obudowa typu 867C, b) przekrój struktury czujnika [1]

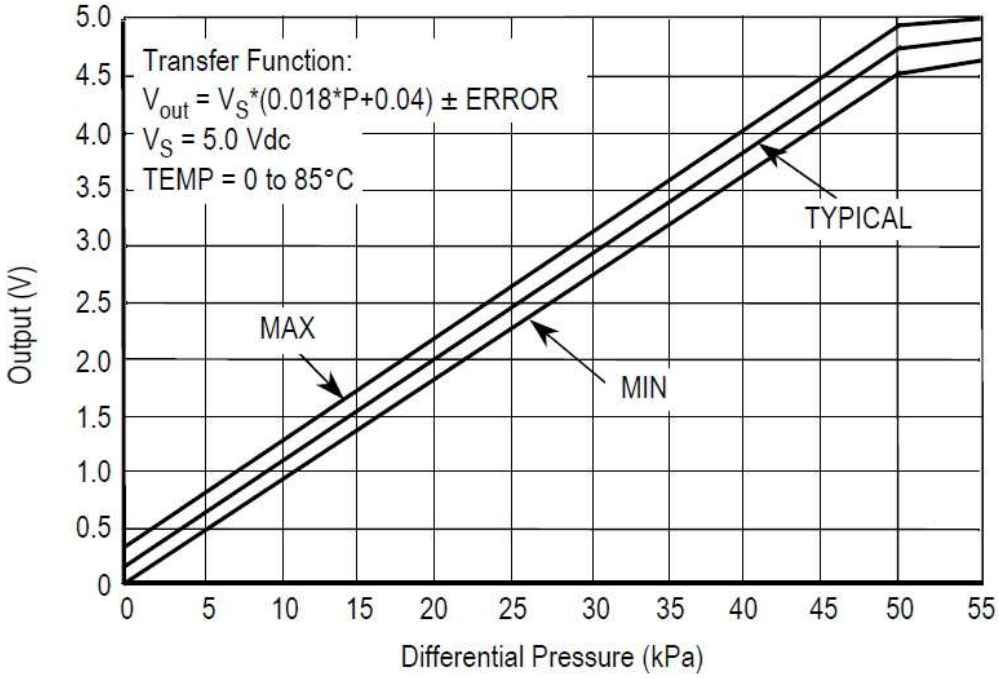
Tabela 2. Wartości graniczne dla czujnika MPX5050(1) [1]

Parametry	Symbol	Wartość	Jednostka
Nadciśnienie(2) (P1>P2)	P_{max}	200	kPa
Ciśnienie rozrywające(2) (P1>P2)	P_{brust}	700	kPa
Temperatura przechowywania	T_{stg}	-40^o do +125^o	^{o}C
Temperatura robocza	T_A	-40^o do +125^o	^{o}C

(1) $T_C = 25^oC$ chyba, że jest podane inaczej
(2) Czynniki po przekroczeniu, których element może ulec uszkodzeniu lub zniszczeniu

Tabela 3. Dane znamionowe czujnika MPX5050 ($V_s = 5V$, $T_C = 25^oC$ chyba, że jest podane inaczej , P1>P2) [1]

Wielkość charakterystyczna	Symbol	Min	Typ	Max	Jednostka
Zakres ciśnienia	P_{OP}	0	–	50	kPa
Napięcie zasilania	V_s	4,75	5,0	5,25	V
Prąd zasilania	I_o	–	7,0	10,0	mA
Minimalne przesunięcie charakterystyki (0 do 85^{o}C, V_s = 5V)	V_{off}	0,088	0,20	0,313	V
Napięcie wyjściowe pełnej skali (0 do 85^{o}C, V_s = 5V)	V_{FSO}	4,587	4,70	4,813	V
Rozpiętość napięcia pełnej skali (0 do 85^{o}C, V_s = 5V)	V_{FSS}	–	4,50	–	V
Błąd liniowości	–	–	–	±2,5	%V_{FSS}
Czułość	V/P	–	90	–	mV/kPa
Czas odpowiedzi	t_R	–	1,0	–	ms
Prąd wyjściowy pełnej skali	I_{o+}	–	0,1	–	mA
Czas nagrzewania	–	–	20	–	ms
Przesunięcie uchybu	–	–	±0,5	–	%V_{FSS}



Rys. 12. Charakterystyka przetwarzania czujnika MPX5050 [1]

Typowa funkcja przenoszenia czujnika MPX5050 przedstawiona na Rys. 12 ma postać opisaną równaniem (7) [1]:

$$V_{out} = V_S\,(0.018p + 0.04) \pm \text{Nominal Total Error}\ , \tag{7}$$

przy czym napięcia V_{out} i V_S podane są w woltach, a ciśnienie p w *kPa*. Napięcie V_S jest napięciem zasilania czujnika, znamionowo równe 5V. Należy zwrócić uwagę, że charakterystyka czujnika jest przesunięta względem zera, typowo o 0,04V. Jak widać na charakterystyce przedstawionej na Rys. 12, rzeczywista funkcja przenoszenia konkretnego czujnika może różnić się od znamionowej o wartość Nominal Total Error. Dopuszczalne błędy czujnika przedstawiono na Rys.13. Błąd graniczny mierzonego ciśnienia (Pressure Error) jest stały i wynosi w całym zakresie pomiarowym czujnika ±1,25kPa. Współczynnik temperaturowy błędu (Temperature Factor) jest stały równy 1 w zakresach temperatur od 0°C do 85°C i staje się zależny od temperatury dla zakresów temperatur od -40°C do 0°C oraz od 85°C do 125°C. Znamionowy całkowity błąd graniczny czujnika wyrażony w woltach jest określony zależnością [1]:

$$\text{Nominal Total Error} = \pm(\text{Pressure Error} \times \text{Temperature Factor} \times 0.018 \times V_S)\,, \tag{8}$$

Całkowity błąd względny czujnika wyrażony w procentach (Nominal Accuracy) jest określony zależnością [1]:

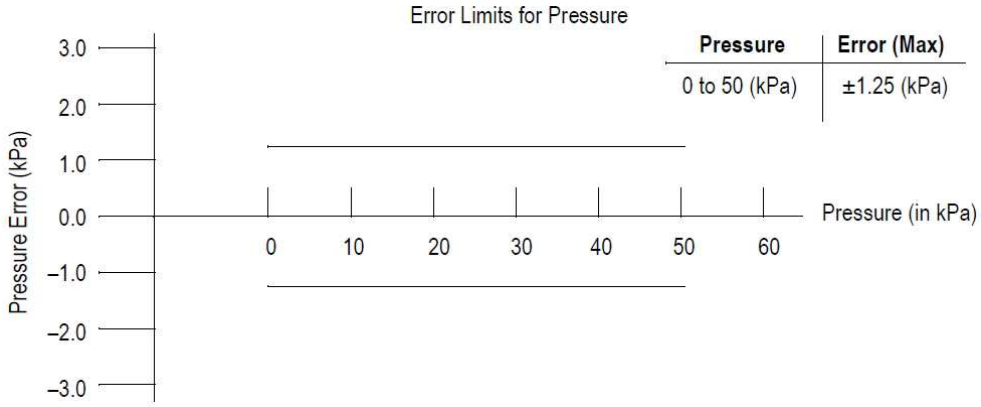
$$\text{Nominal Accuracy} = \frac{\text{Nominal Total Error}}{V_{FSS}} \cdot 100\%\,, \tag{9}$$

gdzie V_{FSS} = 4,5V (Tab. 3) jest rozpiętością napięcia pełnej skali (Full Scale Span) [1].

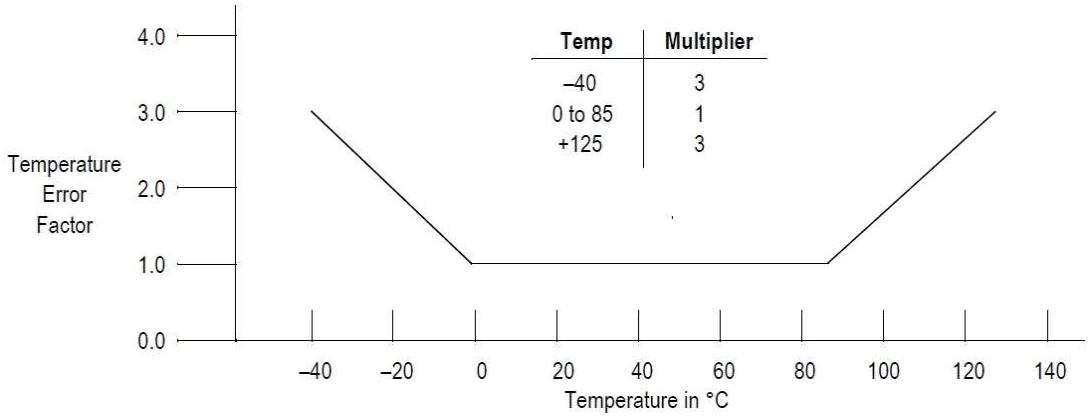
Czujnik zamontowany na stanowisku pomiarowym zasilany jest znamionowym napięciem V_S=5V, na podstawie zależności (7) znamionowa czułość czujnika S_{nom} wynosi więc:

$$S_{nom} = \frac{\Delta V_{out}}{\Delta p} = 5 \cdot 0.018 = 0{,}09\text{V/kPa} = 90\text{mV/kPa}\,. \tag{10}$$

a)



b)

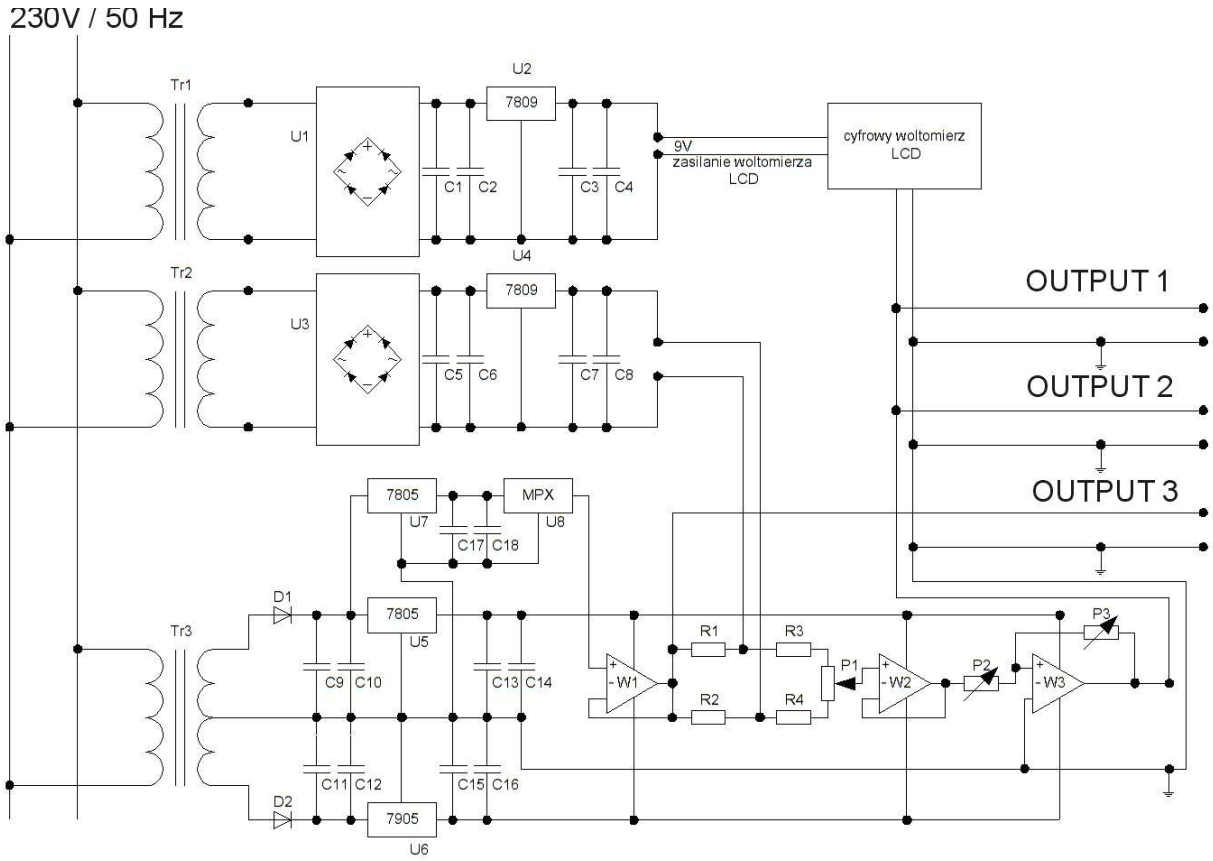


Rys. 13 Błędy czujnika MPX5050, a) błąd graniczny ciśnienia, b) współczynnik temperaturowy błędu [1]

Na stanowisku możliwe jest ręczne zwiększanie i zmniejszanie ciśnienia przy użyciu pompki stanowiącej część ciśnieniomierza lekarskiego. Odczyt ciśnienia może odbywać się kilkoma sposobami równocześnie:

1) odczyt ciśnienia na manometrze mechanicznym o zakresie 300mmHg,
2) odczyt ciśnienia z wyświetlacza LCD wyskalowanego w barach,
3) odczyt napięcia wyjściowego z czujnika ciśnienia dołączonym woltomierzem (Wyjście3) i przeliczenie napięcia na ciśnienie (90mV/kPa),
4) odczyt lub pomiar ciśnienia dołączonym woltomierzem lub na oscyloskopie ze stałą przetwarzania *1V/bar* (Wyjście1 i Wyjście2).

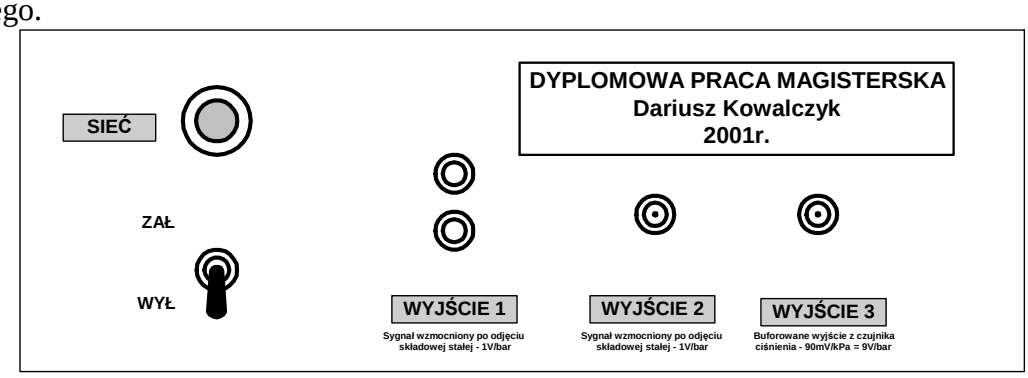
Stanowisko umożliwia również pomiar ciśnienia tętniczego krwi i obserwacje na oscyloskopie przebiegu wartości chwilowych mierzonego ciśnienia w stanach dynamicznych. Oscyloskop jest dołączony interfejsem RS232 do komputera PC z oprogramowaniem umożliwiającym transfer w postaci cyfrowej spróbkowanego przebiegu i zapis do pliku dyskowego oraz jego dalszą obróbkę w arkuszu kalkulacyjnym. Pomiar ciśnienia tętniczego odbywa się przy użyciu elastycznego mankietu zakładanego na ramię. Kompletny schemat części elektronicznej z czujnikiem MPX5050DP stanowiska przedstawiono na Rys. 14, a wygląd zewnętrzny stanowiska pokazano na Rys. 15 i Rys. 16.



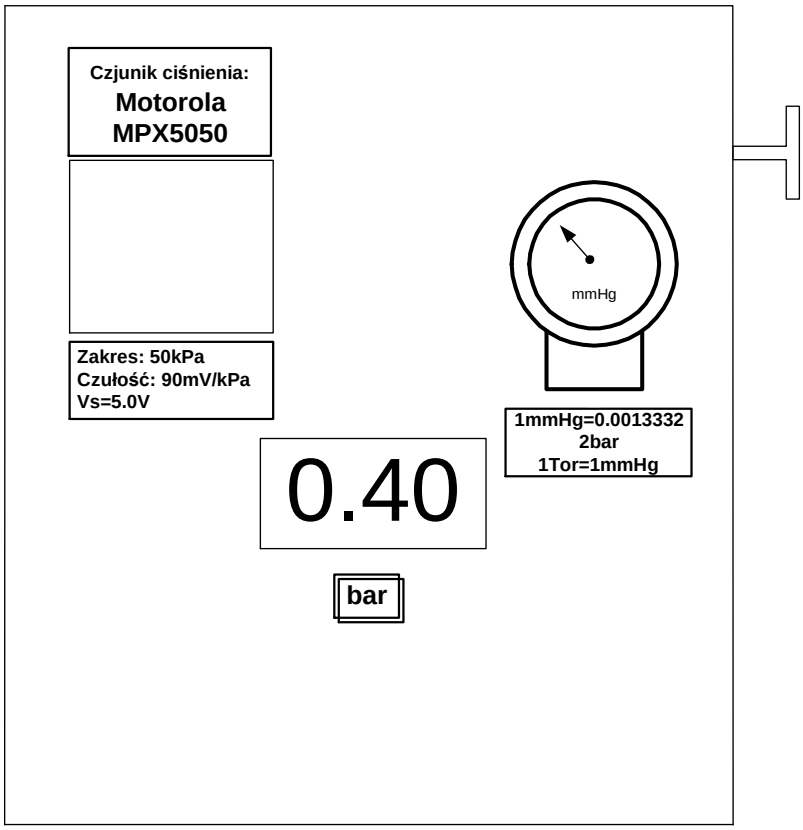
Rys. 14. Schemat układu pomiarowego do badania scalonego czujnika ciśnienia

Układ elektroniczny stanowiska przedstawiony na Rys. 14 zawiera oprócz czujnika ciśnienia dwa zasilacze, wzmacniacze napięcia wyjściowego czujnika oraz woltomierz cyfrowy z wyświetlaczem LCD. Wzmacniacz W1 pracuje jako układ buforujący ze wzmocnieniem równym 1V/V. Mostek złożony z rezystorów R1, R2, R3, R4 i potencjometru P1 służy do kompensacji napięcia offsetu przy braku pobudzenia czujnika ciśnieniem. Wzmacniacz W2, podobnie jak wzmacniacz W1 pracuje jako bufor. Wzmacniacz odwracający W3 z potencjometrami P2 i P3 pełni rolę układu skalującego napięcie wyjściowe do wartości zgodnych z wybraną jednostką ciśnienia ze stałą przetwarzania 1V/bar (Wyjście1 i Wyjście2). Wbudowany woltomierz z wyświetlaczem LCD tworzą łącznie układ manometru cyfrowego pokazującego ciśnienie w barach.

Na Rys.15. i Rys.16. przedstawiono wygląd zewnętrzny stanowiska pomiarowego. W górnej części obudowy w okienku widoczny jest czujnik MPX5050DP. Po prawej stronie wyprowadzono przyłącze ciśnieniowe do podłączenia pompki i rękawu ciśnieniomierza lekarskiego.



Rys. 15 Wygląd płyty czołowej stanowiska do badania scalonych czujników do pomiaru ciśnienia



Rys. 16 Wygląd płyty górnej stanowiska laboratoryjnego

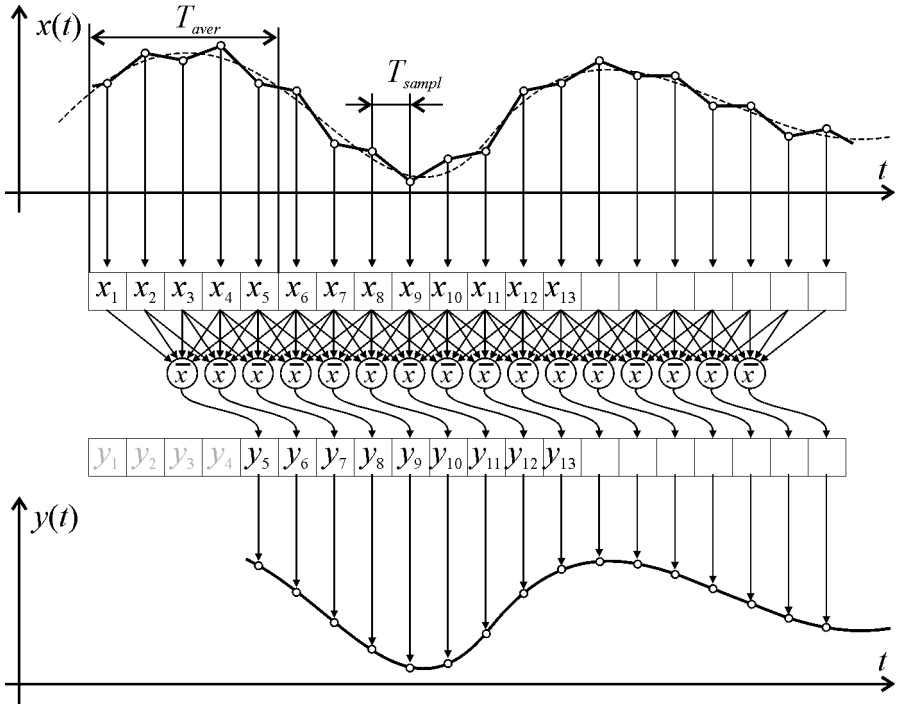
3.2. Cyfrowa filtracja sygnałów ciśnienia w stanach dynamicznych

Sygnał wyjściowy z czujnika ciśnienia jest zaszumiony, co utrudnia pomiary zwłaszcza pomiary małych zmian ciśnienia. W ćwiczeniu jednym z zadań jest pomiar zmian ciśnienia tętniczego człowieka, co wymaga zastosowania odpowiedniego filtru. Producent w nocie aplikacyjnej [3] podaje przykładowe konstrukcje filtrów analogowych RC, które mogą być zastosowane do tego celu. W ćwiczeniu będzie zastosowany uśredniający filtr cyfrowy o skończonej odpowiedzi impulsowej SOI. Sygnał wyjściowy z czujnika będzie przetworzony w postać cyfrową za pomocą oscyloskopu cyfrowego, przetransmitowany poprzez interfejs RS232 do komputera PC i zapisany do pliku dyskowego. Odpowiednie operacje matematyczne realizujące filtr cyfrowy studenci będą realizować za pomocą arkusza kalkulacyjnego Excel, uzyskany efekt będzie oceniany na podstawie wykresu.

Zasada realizacji filtru uśredniającego przedstawiona jest na Rys. 17. Zaszumiony sygnał z czujnika $x(t)$ jest próbkowany z okresem T_{sampl} i kolejne jego próbki x_1, x_2, x_3 itd. są uśredniane. Aby otrzymać jedną próbkę y_n sygnału wyjściowego z filtru, należy uśrednić kolejnych N próbek sygnału wejściowego:

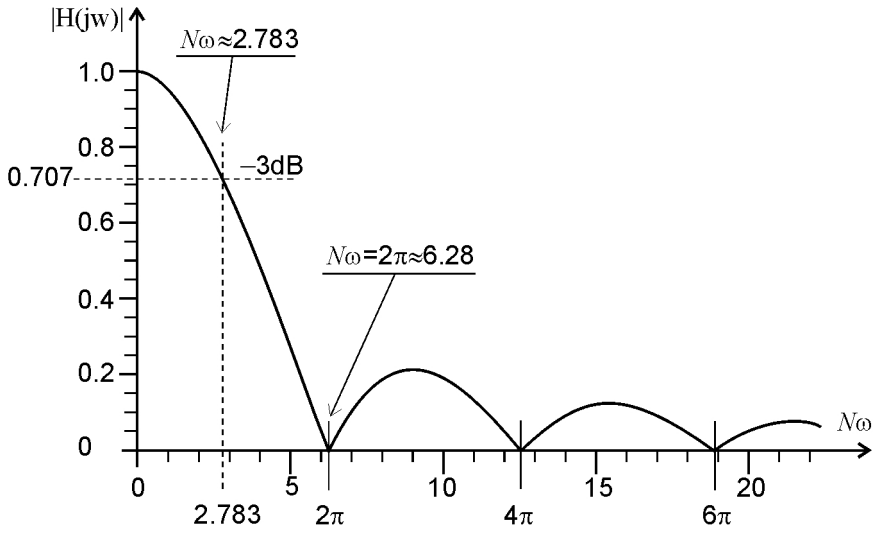
$$y_n = \frac{1}{N} \sum_{0}^{N-1} x_{n-N} \cdot \tag{11}$$

W przykładzie na Rys. 17 dla każdej próbki y_n uśrednianych jest N=5 próbek sygnału x. Należy zauważyć, że pierwsze 4 próbki sygnału y nie są obliczane ze względu na brak odpowiednich danych. Uśrednianie arytmetyczne wykonywane na kolejnych elementach ciągu filtrowanego x_n określane jest mianem średniej ruchomej MA (*ang.* Moving Average), stąd ich nazwa filtry uśredniające MA. Ze względu na skutki operacji średniej ruchomej na sygnale filtry MA należą do filtrów cyfrowych dolnoprzepustowych.



Rys. 17 Zasada realizacji filtru uśredniającego MA dla N=5 próbek: $x(t)$ - sygnał zaszumiony, $y(t)$ - sygnał po odfiltrowaniu szumu, x_1, x_2,... - próbki sygnału przed filtracją, y_5, y_6,... - próbki sygnału po filtracji

W efekcie filtracji sygnału filtrem uśredniającym typu MA ograniczone zostaje pasmo sygnału. Jeżeli widmo sygnału użytecznego znajduje się w paśmie przepustowym filtru, a zakłócenia są wyższej częstotliwości i leżą w paśmie zaporowym filtru, wówczas następuje zwiększenie dynamiki SNR (*ang.* Signal to Noise Ratio) sygnału użytecznego czyli stosunku wartości skutecznej tego sygnału do wartości skutecznej szumu. Charakterystyka amplitudowa uśredniającego filtru MA przedstawiona jest na Rys. 18.



Rys. 18 Charakterystyka amplitudowa filtru uśredniającego MA

Oś pulsacji ω unormowano poprzez przemnożenie jej przez liczbę uśrednianych próbek N. Pulsacja ω została odniesiona do częstotliwości próbkowania:

$$\omega = 2\pi \frac{f_{sig}}{f_{sampl}}, \tag{12}$$

gdzie: f_{sig} - częstotliwość sygnału, f_{sampl} - częstotliwość próbkowania.

Pierwsze miejsce zerowe ω_0 charakterystyki występuje dla $\omega_0 N=2\pi$. Uwzględniając zależność (12) maksymalne tłumienie występuje dla częstotliwości sygnału $f_0= f_{sampl}/N$. Dla przykładu jeśli sygnał próbkujemy z częstotliwością f_{sampl} =1000Hz i uśredniamy N=100 próbek, to f_0=10Hz.

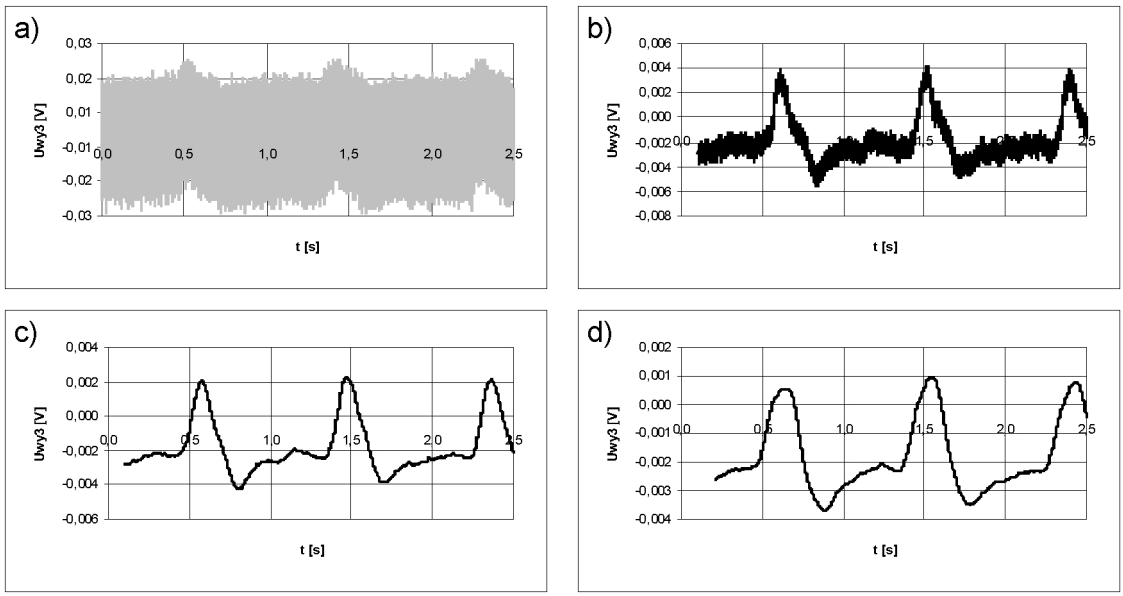
Trzy decybelowe pasmo dla filtru AM jest w punkcie $\omega_{-3dB}N$=2,783 dla którego charakterystyka amplitudowa maleje $\sqrt{2}$ razy. Po prostych przekształceniach można wykazać, że częstotliwość graniczna f_{-3dB} filtru AM wynosi:

$$f_{-3dB} = \frac{f_{sampl} \cdot \omega_{-3dB}}{2\pi} = \frac{2{,}783}{2\pi} \cdot \frac{f_{sampl}}{N} \approx 0{,}443 \frac{1}{T_{aver}}, \qquad (13)$$

gdzie T_{aver} jest czasem uśredniania N próbek.

Dla przykładu jeśli sygnał próbkujemy z częstotliwością f_{sampl} =1000Hz i uśredniamy N=100 próbek, to T_{aver}=0,1s oraz f_{-3dB} =4,43Hz.

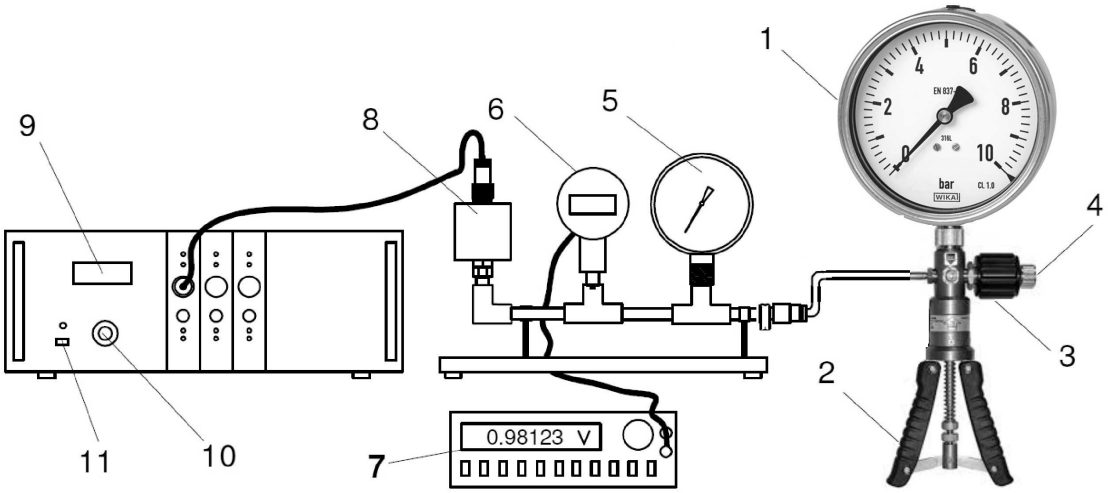
Przykład zastosowania filtru uśredniającego MA do filtrowania sygnału ciśnienia tętniczego uzyskanego podczas ćwiczenia przedstawiono na Rys. 19. Oscyloskop cyfrowy Tektronix TDS210 pracował z szybkością podstawy czasu 250ms/DIV, ekran ma szerokość 10 działek, a więc próbkowano sygnał w czasie 2,5s. Rekord danych w tym oscyloskopie zawiera 2500 próbek, a więc sygnał był próbkowany z częstotliwością f_{sampl} =1000Hz. Na rysunku przedstawiono sygnał uzyskany z czujnika (a) zawierający bardzo silne zakłócenia całkowicie uniemożliwiające obserwację mierzonego sygnału ciśnienia. Na kolejnych wykresach (b, c, d) przedstawiono sygnał po filtracji uśredniającej MA z różnym czasem uśredniania. Można wyraźnie zauważyć wpływ liczby uśrednianych próbek (a więc czasu uśredniania T_{aver}) na skuteczność tłumienia zakłóceń. Zbyt krótki czas uśredniania skutkuje słabym tłumieniem zakłóceń (b), ale zbyt długi czas uśredniania powoduje zniekształcenie mierzonego sygnału tętna (d). Optymalny czas uśredniania zapewnia skuteczne tłumienie zakłóceń i nie zniekształca sygnału mierzonego (c). Należy zauważyć, że w sygnale po filtracji brakuje N-1 pierwszych próbek zgodnie z zależnością (11).



Rys. 19 Przykład filtracji uśredniającej MA: a) zaszumiony sygnał z czujnika ciśnienia, stała przetwarzania 90mV/kPa = 12mV/mmHg, f_{sampl}=1000Hz, b) sygnał filtrowany ze zbyt krótkim czasem uśrednia, c) optymalny czas uśredniania, d) zbyt długi czas uśredniania

3.3. Stanowisko do pomiarów wysokich ciśnień w stanie statycznym

Stanowisko do pomiarów wysokich ciśnień wykorzystuje przemysłowe czujniki ciśnienia AR 002-3 (APAR), MAN SD-30 (KOBOLD) oraz analogowy manometr wskazówkowy KFM i umożliwia pomiary w zakresie do 0,5MPa, tylko w stanie statycznym. Konstrukcję stanowiska przedstawiono na Rys. 20. Przyrządem wzorcowym jest wysokiej klasy manometr wskazówkowy (1). Do zadawania ciśnienia służy specjalna pompka testowa Model CPP30 produkcji WIKA, która jest napędzana ręczną dzwignią (2). Pokrętło (3) zaworu regulacyjnego umożliwia precyzyjną regulację ciśnienia, a zawór nadmiarowy (4) umożliwia upuszczenia nadmiaru ciśnienia do atmosfery. Na stanowisku badane są: manometr analogowy KFM (5), manometr cyfrowy MAN SD-30 (KOBOLD) (6) współpracujący z woltomierzem cyfrowym (7) oraz czujnik ciśnienia AR 002-3 (APAR) (8) współpracujący ze wzmacniaczem pomiarowym wyposażonym w wyświetlacz LCD (9). Wzmacniacz umożliwia pomiar w trzech kanałach przełączanych przełącznikiem (10). Przycisk (11) włącza zasilanie wzmacniacza.



Rys. 20 Stanowisko do badania manometrów przemysłowych (opis w tekście)

Szczególną uwagę należy zwrócić na właściwą obsługę pompki testowej. W tym celu należy zapoznać się z instrukcją obsługi [4]. Kolejność postępowania podczas pomiarów jest następująca:

- Przed pomiarami oraz po ich zakończeniu należy sprawdzić, czy zawór nadmiarowy (4) nie jest całkowicie zamknięty i w razie potrzeby otworzyć go obracając pokrętło zaworu w lewo.
- Następnie należy przekręcić precyzyjny zawór regulacyjny (3) w lewo do końca (do odczucia delikatnego oporu).
- Wtedy należy ostrożnie przekręcić zawór nadmiarowy (4) w prawo do zamknięcia (do odczucia wyraźnego oporu i nagłego zatrzymania).
- Następnie należy zwiększać ciśnienie napędzając pompkę dźwignią (2) do osiągnięcia przybliżonej wartości ciśnienia (w ćwiczeniu maksymalnie do 5 barów).
- Dla uzyskania dokładnej wartości ciśnienia należy przekręcić precyzyjny zawór regulacyjny (3) w prawo w celu zwiększenia ciśnienia lub w lewo, aby zmniejszyć ciśnienie.

4. PROGRAM ĆWICZENIA

Program ćwiczenia obejmuje wykonanie następujących pomiarów:

1. wyznaczenie charakterystyk przetwarzania czujnika MPX 5050 DP (Wyjście 3),
2. kalibracja wbudowanego w stanowisko manometru cyfrowego (Wyjście l),
3. pomiar i obserwacja przebiegu ciśnienia tętniczego krwi (Wyjście 3),
4. wyznaczanie charakterystyk przetwarzania manometrów analogowego KFM, cyfrowego MAN SD-30 (KOBOLD) i czujnika ciśnienia AR 002-3 (APAR).

4.1. Wyznaczanie charakterystyki przetwarzania czujnika MPX 5050 DP

4.1.1. Zestawienie parametrów badanego czujnika i obliczenie błędów granicznych

Na podstawie dokumentacji czujnika MPX 5050 DP w Tabeli 4 zestawić wybrane dane znamionowe niezbędne do dalszych obliczeń. Zaleca się korzystać z oryginalnej dokumentacji w języku angielskim [1], dlatego w Tabeli 4 podano oryginalne brzmienie parametrów.

Tabela 4. Wybrane parametry czujnika MPX 5050 DP

Parametr	Wartość	Jednostka
Pressure Sensor type		**-**
Pressure Sensor case option		**-**
# of Ports / Pressure Type		**-**
Sensor Manufacturer		**-**
Sensor Supply Voltage	V_S =	**V**
Full Scale Span	V_{FSS} =	**V**
Nominal Accuracy (0°C to 85°C)		**%**
Laboratory Room Temperature	*Temp*=	**°C**
Temperature Error Factor	*Temp.Factor* =	**-**
Pressure Error kPa	*Press.Error* =	**kPa**

Na podstawie danych zgromadzonych w Tabeli 4 obliczyć znamionowy całkowity błąd graniczny (Nominal Total Error) w woltach według zależności (8) oraz całkowity błąd względny czujnika w procentach (Nominal Accuracy) według zależności (9). Wyniki obliczeń zamieścić w Tabeli 5.

Tabela 5. Obliczone błędy całkowite czujnika MPX 5050 DP

Obliczany błąd	Dane podstawione do równania	obliczona wartość
Nominal Total Error (8)		**V**
Nominal Accuracy (9)		**%**

4.1.2 Wyznaczenie charakterystyki czujnika MPX 5050 DP dla narastającego ciśnienia

Do wyjścia 3 dołączyć woltomierz cyfrowy. Zadając ciśnienie *p* narastająco w zakresie od zera do 300mmHg wyznaczyć charakterystykę przetwarzania czujnika mierząc napięcie wyjściowe czujnika V_{out3} na Wyjściu 3. Wyniki pomiarów zamieścić w Tabeli 6.

Tabela 6. Charakterystyka przetwarzania czujnika MPX 5050 DP dla ciśnienia narastającego

lp.	Zadane ciśnienie		Napięcie czujnika Wyjście 3	Współczynniki linii aproksymującej wyniki pomiarów	
	p		V_{out3}	*a*	*b*
	mmHg	kPa	V	V/kPa	V
1	0				
2	20				
3	40				
4	60				
5	80				
6	100				
7	120				
8	140				
9	160				
10	180				
11	200				
12	220				
13	240				
14	260				
15	280				
16	300				

4.1.3 Obliczenie błędów przetwarzania czujnika MPX 5050 DP

W sprawozdaniu należy przeliczyć zadane ciśnienie *p* z jednostki mmHg na kPa. Następnie na podstawie wyników pomiarów wyznaczyć współczynniki *a* i *b* linii prostej postaci: $y = ax + b$ aproksymującej charakterystykę przetwarzania $V_{out3}=f(p)$ wykorzystując metodę najmniejszych kwadratów. W tym celu można posłużyć się arkuszem kalkulacyjnym Excel i wykreślić wykres z opcją „Dodaj linię trendu” oraz „Wyświetl równanie na wykresie” lub zastosować funkcję REGLINP. Uzyskane współczynniki *a* i *b* wpisać do Tabeli 6. Mniej dokładnie można wyznaczyć współczynniki *a* i *b* wykonując wykres na papierze milimetrowym i aproksymując wyniki pomiarów „metodą linijki”.

W Tabeli 7 obliczyć napięcie V_{LIN} odpowiadające liniowej charakterystyce przetwarzania według zależności (14) oraz napięcie V_{NOM} odpowiadające znamionowej charakterystyce przetwarzania według zależności (15):

$$V_{LIN} = a \cdot p + b \ , \tag{14}$$

gdzie a, b – współczynniki wyznaczone metodą najmniejszych kwadratów dla ciśnienia p podanego w kPa,

$$V_{NOM} = V_S (0.018\, p + 0.04) \ , \tag{15}$$

gdzie V_S – napięcie zasilania czujnika (Tabela 4), ciśnienie p podane w kPa.

Tabela 7. Błędy przetwarzania czujnika MPX 5050 DP dla ciśnienia narastającego

lp.	Zadane ciśnienie	Napięcie czujnika Wyjście 3	Liniowe napięcie czujnika	Nominalne napięcie czujnika	Błąd nieliniowości		Nominalny błąd całkowity	
	p	V_{out3}	V_{LIN}	V_{NOM}	Δ_{LIN}	δ_{LIN}	Δ_{NOM}	δ_{NOM}
	kPa	V	V	V	V	%	V	%
1								
2								
3								
4								
5								
6								
7								
8								
9								
10								
11								
12								
13								
14								
15								
16								

Następnie należy obliczyć błąd bezwzględny nieliniowości czujnika Δ_{LIN} (16), błąd względny nieliniowości czujnika δ_{LIN} (17), nominalny błąd bezwzględny czujnika Δ_{NOM} (18) oraz nominalny błąd względny czujnika δ_{NOM} (19).

$$\Delta_{LIN} = V_{out3} - V_{LIN} \tag{16}$$

$$\delta_{LIN} = \frac{\Delta_{LIN}}{V_{FSS}} \cdot 100\% \tag{17}$$

gdzie V_{FFS} – rozpiętość napięcia pełnej skali (Full Scale Span) (Tabela 4).

$$\Delta_{NOM} = V_{out3} - V_{NOM} \tag{18}$$

$$\delta_{NOM} = \frac{\Delta_{NOM}}{V_{FSS}} \cdot 100\% \tag{19}$$

W sprawozdaniu należy przedstawić na wykresie charakterystykę przetwarzania czujnika $V_{out3}=f(p)$ wraz z linią trendu i równaniem linii trendu dla ciśnienia p podanego w kPa. Na kolejnych wykresach należy przedstawić w funkcji ciśnienia p podanego w kPa: błąd bezwzględny liniowości czujnika Δ_{LIN}, błąd względny liniowości czujnika δ_{LIN}, nominalny błąd bezwzględny czujnika Δ_{NOM} oraz nominalny błąd względny czujnika δ_{NOM}.

Porównać otrzymaną charakterystykę przetwarzania oraz wartości błędów i ich wykresy z danymi producenta podanymi w karcie katalogowej. Ocenić ich zgodność, zapisać wnioski.

4.2. Kalibracja manometru cyfrowego wbudowanego w stanowisko pomiarowe

Kalibracja przyrządu pomiarowego polega na porównaniu jego wskazań z przyrządem wzorcowym i wyznaczeniu jego błędów. W ćwiczeniu należy przeprowadzić kalibrację manometru cyfrowego wbudowanego w stanowisko pomiarowe. Jak to przedstawiono na Rys. 14, manometr cyfrowy został zrealizowany z wykorzystaniem czujnika MPX 5050 DP, wzmacniaczy W1, W2, W3, woltomierza cyfrowego o zakresie 1V i wyświetlacza LCD. Wypadkowa stała przetwarzania toru pomiarowego wynosi 1V/bar, dzięki czemu na wyświetlaczu LCD pokazywana jest wartość ciśnienia w barach.

4.2.1 Wyznaczenie charakterystyki manometru cyfrowego

Zadając ciśnienie p narastająco w zakresie od zera do 300mmHg należy wyznaczyć charakterystykę przetwarzania manometru cyfrowego mierząc napięcie wyjściowe V_{MAN} odczytywane na wyświetlaczu LCD woltomierza cyfrowego wbudowanego w stanowisko. Odczytane napięcie w woltach należy zapisywać jako ciśnienie w barach. Wyniki pomiarów zamieścić w Tabeli 8. Wartość zadawanego ciśnienia przeliczyć z jednostki mmHg na bary (według Tab. 1).

4.2.2 Obliczenie błędów manometru cyfrowego

W sprawozdaniu należy przeliczyć zadane ciśnienie p z jednostki mmHg na bary. Następnie na podstawie wyników pomiarów wyznaczyć współczynniki a i b linii prostej postaci: $y = ax + b$ aproksymującej charakterystykę przetwarzania $V_{MAN}=f(p)$ wykorzystując metodę najmniejszych kwadratów. W tym celu można posłużyć się arkuszem kalkulacyjnym Excel i wykreślić wykres z opcją „Dodaj linię trendu” oraz „Wyświetl równanie na wykresie” lub zastosować funkcję REGLINP. Uzyskane współczynniki a i b wpisać do Tabeli 8. Mniej dokładnie można wyznaczyć współczynniki a i b wykonując wykres na papierze milimetrowym i aproksymując wyniki pomiarów „metodą linijki”.

W Tabeli 9 obliczyć napięcie V_{LIN} odpowiadające liniowej charakterystyce przetwarzania według zależności (20). Następnie należy obliczyć błąd bezwzględny nieliniowości manometru Δ_{LIN} (21), błąd względny nieliniowości δ_{LIN} (22), nominalny błąd bezwzględny Δ_{NOM} (23) oraz nominalny błąd względny δ_{NOM} (24).

$$V_{LIN} = a \cdot p + b \tag{20}$$

$$\Delta_{LIN} = V_{MAN} - V_{LIN} \tag{21}$$

$$\delta_{LIN} = \frac{\Delta_{LIN}}{p_{MAX}} \cdot 100\% \tag{22}$$

$$\Delta_{NOM} = V_{MAN} - p \tag{23}$$

$$\delta_{NOM} = \frac{\Delta_{NOM}}{p_{MAX}} \cdot 100\% \tag{24}$$

gdzie:

p jest ciśnieniem zadanym wyrażonym w barach,

a, b są współczynnikami równania linii prostej aproksymującej wyniki pomiarów,

p_{MAX} jest maksymalnym ciśnieniem czujnika wyrażonym w barach.

W sprawozdaniu należy przedstawić na wykresie charakterystykę przetwarzania czujnika $V_{MAN} = f(p)$ wraz z linią trendu i równaniem linii trendu dla ciśnienia *p* podanego w bar. Na kolejnych wykresach należy przedstawić w funkcji ciśnienia *p* podanego w bar: błąd bezwzględny liniowości manometru Δ_{LIN}, błąd względny liniowości manometru δ_{LIN}, nominalny błąd bezwzględny manometru Δ_{NOM} oraz nominalny błąd względny manometru δ_{NOM}.

Tabela 8. Charakterystyka manometru cyfrowego dla ciśnienia narastającego

lp.	Zadane ciśnienie		Napięcie wyjściowe manometru	Współczynniki linii aproksymującej wyniki pomiarów	
	p		V_{MAN}	*a*	*b*
	mmHg	bar	bar	bar/bar	bar
1	0				
2	20				
3	40				
4	60				
5	80				
6	100				
7	120				
8	140				
9	160				
10	180				
11	200				
12	220				
13	240				
14	260				
15	280				
16	300				

Tabela 9. Charakterystyka manometru cyfrowego dla ciśnienia narastającego

No.	Zadane ciśnienie	Napięcie z manometru Output 1	Linearyzowane napięcie wyjściowe	Błąd nieliniowości		Błąd nominalny	
	p	V_{MAN}	V_{LIN}	Δ_{LIN}	δ_{LIN}	Δ_{NOM}	δ_{NOM}
	bar	bar	bar	bar	%	bar	%
1							
2							
3							
4							
5							
6							
7							
8							
9							
10							
11							
12							
13							
14							
15							
16							

4.3. Pomiary dynamiczne ciśnienia i obserwacja przebiegu ciśnienia tętniczego krwi

a) Do stanowiska dołączyć opaskę ciśnieniomierza lekarskiego. Do wyjścia 3 dołączyć oscyloskop cyfrowy Tektronix TDS210 połączony poprzez interfejs RS232 z komputerem PC. Wejście oscyloskopu ustawić na sprzężenie AC, czułość 2mV/div, tryb wyzwalania ***TriggerMenu/Mode/Auto***, podstawę czasu 5ms/div. W komputerze uruchomić firmowy program WaveStar umożliwiający pobranie próbek sygnału z oscyloskopu i zapisanie ich w pamięci komputera oraz eksport danych do pliku w formacie programu MS Excel. W zakładce programu ***Instruments*** sprawdzić typ wybranego oscyloskopu oraz ustawienia parametrów interfejsu RS-232. Wykonać TEST transmisji. Zielono - czerwony pasek na dole ekranu sygnalizuje postęp transmisji.

b) Założyć opaskę ciśnieniową na ramię około 3cm powyżej stawu łokciowego i zwiększając ciśnienie (przeciętnie dla zdrowej osoby do wartości około 100mmHg) uzyskać na ekranie oscyloskopu wyraźne drgania przebiegu w rytm tętna badanej osoby. Poziom szumów nie powinien przekraczać kilku miliwoltów. Amplituda sygnału tętna powinna być zbliżona do pełnej wysokości ekranu oscyloskopu. W celu pobrania przebiegu do pamięci komputera i zapisania w pliku na dysku należy:

- dobrać podstawę czasu oscyloskopu (około 250 – 500ms/div) tak, aby uzyskać widoczne na ekranie kilka okresów (2-5) fali tętna.

- Zmienić tryb pracy podstawy czasu na: ***TriggerMenu/Mode/Single*** i przyciskiem ***Run/Stop*** uruchomić jednokrotny pomiar. Na ekranie oscyloskopu (środek górnej linii) zaobserwować sekwencję pomiaru: Stop → Armed → Trig'd → Stop. Sprawdzić postać otrzymanego przebiegu i w razie potrzeby ponownie wyzwolić pomiar przyciskiem ***Run/Stop***.

- Pobrać dane z oscyloskopu do komputera opcją programu: ***Instruments/Acquire***. Na dole ekranu komputera zielono – czerwony pasek sygnalizuje postęp transmisji danych. Sprawdzić poprawność transmisji porównując przebieg na ekranie komputera i oscyloskopu.

- Wykorzystując opcję programu ***File/Export*** zapisać uzyskany przebieg w pliku typu XLS, w katalogu *C:\Student*. Nazwa pliku powinna zawierać początek nazwiska badanej osoby i nie może przekraczać długości 8 znaków.

- Sprawdzić zawartość zapisanego pliku otwierając go programem MS Excel lub podobnym. Plik powinien zawierać komplet informacji o nastawach oscyloskopu oraz 2500 próbek obserwowanego na oscyloskopie przebiegu. W dwóch kolumnach zapisywane są: czas (w sekundach) i napięcie (w woltach).

Uwaga! Osoba badana nie powinna w czasie pomiarów poruszać ręką lub wykonywać innych czynności. Ręka z założoną opaską powinna leżeć swobodnie i nieruchomo na stole.

c) Zmienić tryb pracy podstawy czasu na: ***TriggerMenu/Mode/Auto***. Zwiększyć ciśnienie w opasce do 200 *mmHg* i powoli je zmniejszając wyznaczyć wartość ciśnienia skurczowego p_S i rozkurczowego p_R odczytywanego z manometru w chwilach pojawienia się i zanikania na oscyloskopie fali tętna. Odczytać z oscyloskopu amplitudę ciśnienia fali tętna Δp (w *mV*) oraz okres T_p sygnału fali tętna (w *ms*) i częstotliwość skurczów serca f_p w uderzeniach na minutę. Wyniki zapisywać w tabeli 10.

d) Powtórzyć pomiary wg punktów b), c) dla pozostałych członków zespołu. Zapisane na dysku komputera pliki z danymi należy skopiować na nośnik i wykorzystać do wykonania sprawozdania.

Nie należy zapisywać danych bezpośrednio z programu na nośnik oraz **nie kasować** danych z dysku komputera po zakończeniu pomiarów.

UWAGA ! Czas trwania pomiarów należy ograniczyć do niezbędnego minimum. Zbyt długi ucisk opaski może spowodować niedokrwienie ręki. Wyniki pomiarów są orientacyjne i nie mogą stanowić podstawy do oceny stanu zdrowia badanej osoby.

Tabela 10. Wyniki pomiarów ciśnienia tętniczego krwi

Lp.	p_S	p_R	Δp	Δp	Tp	fp
	mmHg	mmHg	mV	mmHg	ms	min^{-1}
1						
2						
3						
4						

e) W celu wykonania sprawozdania należy wczytać zapisane próbki ciśnienia fali tętna do arkusza kalkulacyjnego i przeprowadzić filtrację sygnału stosując filtr średniej ruchomej MA opisany w punkcie 2.3. Przykłady przebiegu ciśnienia krwi bez odfiltrowania szumu i odfiltrowanego przedstawione zostały na Rys.19. Do realizacji filtru najprościej można wykorzystać funkcję obliczania średniej w programie Excel. Eksperymentalnie należy ustalić optymalną liczbę *N* uśrednianych próbek.

Czas uśredniania T_{aver} wynikający z przyjętej liczby próbek N powinien być kilkakrotnie dłuższy od okresu zakłóceń o najmniejszej częstotliwości i jednocześnie znacznie krótszy od okresu składnika sygnału pomiarowego o najwyższej częstotliwości. Częstotliwość graniczną filtru uśredniającego MA można ustalić z zależności (13). Zbyt mała liczba próbek N nie umożliwi skutecznego stłumienia szumów w sygnale pomiarowym. Zbyt duża liczba próbek może spowodować stłumienie również sygnału pomiarowego, a szczególnie jego składników o wyższych częstotliwościach, co objawi się silnym „wygładzeniem" przebiegu.

W sprawozdaniu należy przedstawić wykres sygnału przed filtracją i po filtracji, z optymalnym, ze zbyt krótkim i zbyt długim czasem uśredniania, analogicznie do przykładu przedstawionego na Rys. 19. Obliczyć częstotliwość graniczną f_{-3dB} zrealizowanego filtru MA według zależności(13).

4.4. Wyznaczanie charakterystyk przetwarzania manometrów analogowego KFM, cyfrowego MAN SD-30 (KOBOLD) i czujnika ciśnienia AR 002-3 (APAR)

4.4.1 Pomiary

Zapoznać się z konstrukcją stanowiska przedstawionego na Rys. 20. Uruchomić wzmacniacz czujnika pomiarowego AR 002-3 włącznikiem (11). Przełącznikiem (10) ustawić kanał **1**. Zapoznać się z obsługą pompki testowej wg punktu 3.3 i instrukcji obsługi pompki [4]. Przygotować pompkę testową do pracy.

Zadając ciśnienie p rosnąco od 0 do 5bar z krokiem 0,4bar wyznaczyć charakterystyki przetwarzania badanych manometrów. Należy ustawiać jak najdokładniej ciśnienie p na wzorcowym manometrze analogowym (1) wykorzystując zawór (3) pompki testowej, natomiast odczytywać wskazanie manometru analogowego p_a (5), manometru cyfrowego p_c (6), woltomierza dołączonego do wyjścia manometru cyfrowego U_c (7) oraz ciśnienie p_{AR} wskaźnika (9) wzmacniacza czujnika AR 002-3. Wyniki zamieścić w tabeli 11. Wartość ciśnienia wskazanego przez manometr analogowy p_a i wskaźnik czujnika AR 002-3 p_{AR} przeliczyć na bary (1MPa=10bar). Wyznaczyć błędy przetwarzania i wykreślić uzyskane charakterystyki analogicznie jak w p. 4.1. Do obliczenia błędów względnych liniowości manometrów i czujnika należy przyjąć jako odniesienie podane przez producentów zakresy podane na tabliczkach znamionowych przyrządów i zamieszczone w dokumentacji [2].

Tabela 11. Pomiary ciśnienia manometrami przemysłowymi

Lp.	p	p_a	p_a	p_c	U_c	p_{AR}	p_{AR}
	bar	MPa	bar	bar	mV	MPa	bar
1	0						
2	0,4						
3	0,8						
4	1,2						
5	1,6						
6	2,0						
7	2,4						
8	2,8						
9	3,2						
10	3,6						
11	4,0						
12	4,4						
13	4,8						
14	5,0						

4.4.2 Obliczenia

a) Analogicznie jak w punkcie 4.1 obliczyć współczynniki *a* i *b* prostej aproksymującej charakterystykę przetwarzania manometru analogowego p_a=f(p) przyjmując wartości obliczone w barach. Obliczyć ciśnienie p_a' odpowiadające liniowej charakterystyce przetwarzania według zależności (25), błąd liniowości bezwzględny (26) i względny (27). Wyniki wpisać do tabeli 12.

Tabela 12. Obliczenia dla manometru analogowego

Lp.	p	p_a	p'_a	Δp_a	δp_a
	bar	bar	bar	bar	%
1		5			
...		...			
14		0			

$$p_a' = ap + b \tag{25}$$

gdzie *a*, *b* – współczynniki wyznaczone metodą najmniejszych kwadratów dla ciśnienia *p*.

Błąd bezwzględny liniowości czujnika:

$$\Delta p_a = p_a - p_a' \tag{26}$$

Błąd względny liniowości czujnika:

$$\delta p_k = \frac{\Delta p_a}{p_{azn}} 100\%, \tag{27}$$

gdzie: p_{azn} – zakres manometru analogowego.

Wykreślić charakterystykę przetwarzania i błędów w funkcji ciśnienia zadanego *p*.
b) Analogicznie jak w punkcie 4.1 obliczyć współczynniki *a* i *b* prostej aproksymującej charakterystykę wyjścia napięciowego manometru cyfrowego U_c=f(p). Obliczyć ciśnienie U_c' odpowiadające liniowej charakterystyce przetwarzania według zależności (28), błąd liniowości bezwzględny (29) i względny (30). Wyniki wpisać do tabeli 13.

Tabela 13. Obliczenia dla wyjścia napięciowego manometru cyfrowego MAN SD-30

Lp.	p	U_c	$U'c$	ΔU_c	dU_c
	bar	V	V	V	%
1					
...					
14					

$$U_c' = ap + b, \tag{28}$$

gdzie *a*, *b* – współczynniki wyznaczone metodą najmniejszych kwadratów dla ciśnienia p_c.
Błąd bezwzględny liniowości wyjścia napięciowego manometru cyfrowego:

$$\Delta U_c = U_c - U_c' \tag{29}$$

Błąd względny liniowości wyjścia napięciowego manometru cyfrowego:

$$\delta U_c = \frac{\Delta U_c}{U_{czn}} 100\%, \tag{30}$$

gdzie U_{czn} – zakres wyjścia napięciowego manometru cyfrowego.
Wykreślić charakterystykę przetwarzania i błędów w funkcji ciśnienia p.

c) Analogicznie jak w punkcie 4.1 obliczyć współczynniki a i b prostej aproksymującej charakterystykę przetwarzania czujnika pomiarowego AR 002-3 p_{AR}=f(p_c) przyjmując wartości obliczone w barach. Obliczyć ciśnienie p_{AR}' odpowiadające liniowej charakterystyce przetwarzania według zależności (31), błąd liniowości bezwzględny (32) i względny (32). Wyniki wpisać do tabeli 11.

Tabela 14. Obliczenia dla czujnika AR 002-3

Lp.	p_{AR}	p_c	p_{AR}'	Δp_{AR}	$d\, p_{AR}$
	bar	bar	bar	bar	%
1					
...					
14					

$$p_{AR}' = ap_c + b \tag{31}$$

gdzie a, b – współczynniki wyznaczone metodą najmniejszych kwadratów dla ciśnienia p_c.
Błąd bezwzględny liniowości czujnika:

$$\Delta p_{AR} = p_{AR} - p_{AR}' \tag{32}$$

Błąd względny liniowości czujnika:

$$\delta p_{AR} = \frac{\Delta p_{AR}}{p_{ARzn}} 100\%, \tag{33}$$

gdzie p_{ARzn} – zakres przetwarzania czujnika AR 002-3.

Wykreślić charakterystykę przetwarzania i błędów w funkcji ciśnienia p_c.

4.5. Opracowanie wyników i przygotowanie sprawozdania

W sprawozdaniu należy zamieścić:
- tabele z wynikami pomiarów i obliczeń,
- wzory obliczeniowe i przykładowe obliczenia,
- wykresy wyznaczonych charakterystyk przetwarzania i błędów,
- zestawienie parametrów katalogowych i zmierzonych badanych przetworników
- przebiegi czasowe ciśnienia fali tętna przed i po filtracji z podaniem zastosowanych parametrów filtracji, z optymalnym, ze zbyt krótkim i zbyt długim czasem uśredniania,
- wnioski z przeprowadzonych pomiarów, szczególnie należy zwrócić uwagę na porównanie uzyskanych wyników z informacjami podanymi w dołączonej do instrukcji dokumentacji producentów oraz informacjami zawartymi na manometrach i czujniku.

6. LITERATURA

1. MPX5050 Integrated Silicon Pressure Sensor On-Chip Signal Conditioned, Temperature Compensated and Calibrated, Data Sheet, (MPX5050.pdf), Freescale Semiconductor, Inc. Technical Information Center, *www.freescale.com/support*
2. Dokumentacja producenta manometru cyfrowego MAN SD-30 (Kob_man-sd.pdf).
3. Reodique A., Schultz W.: Noise Considerations for Integrated Pressure Sensors, Freescale Semiconductor Application Note AN1646, Rev 2, 05/2005
4. Pneumatyczna pompa testowa Model CPP30 WIKA, Instrukcja Obsługi (załącznik w pliku OI_CPP30_pl_pl_15837.pdf)
5. Miłek M.: Metrologia elektryczne wielkości nieelektrycznych, Wyd. Uniwersytetu Zielonogórskigo, Zielona Góra 2006.
6. Gajek a., Juda Z.: Czujniki, WkiŁ, Warszawa 2009.
7. Bosch R.: Czujniki w pojazdach samochodowych, WkiŁ2009.
8. Romer E.: Miernictwo przemysłowe, PWN, Warszawa 1978.