

PRZEMYSŁOWY INSTYTUT AUTOMATYKI I POMIARÓW  
MERA-PIAP

Al. Jerozolimskie 202

02-222 Warszawa

Telefon 23-70-81

Zakład Pomiaru Ciśnienia i Temperatury

442

BE 10

~~Główny~~ Wykonawca. mgr inż. Halina Kiedrzynek

Wykonawcy inż. Cz. Bakalarski, ob. J. Chodakowski,  
mgr inż. J. Fabisiak, ob. T. Serzysko, ob. H. Sobstel,  
mgr inż. Sz. Sokołowski, mgr inż. J. Rušan /POLTECH/,  
mgr inż. A. Sadzikowski /POLTECH/

Konsultant mgr inż. Leszek Guzy

Nr zlecenia

1076/B

Aparatura pomiarowa do dokładnych  
pomiarów ciśnienia oraz sprawdzania  
czujników, przetworników i mierników  
ciśnienia.

Zad. 1.1. Projekt wstępny. Wykonanie  
modeli aparatury pomiarowej.  
Badania modeli

Zleceniodawca Instytut Organizacji Przemysłu Maszynowego  
ORGMASZ

Pracę rozpoczęto dnia grudzień 1987r

zakńczono dnia 1988.12.15

Z-ca Dyrektora  
d/s Pomiarów

Kierownik Zakładu

mgr inż. Leszek Guzy

doc.dr inż. Jan Winiecki

Praca zawiera:

Rozdzielnik - ilość egz:

stron 63

Egz. 1 PIAP-BOINTE

rysunków 4

Egz. 2 PIAP-DPP

fotografii -

Egz. 3

tabel -

Egz. 4

tablic 30

Egz. 5

załączników 4

Egz. 6

Nr rejestr. 6266

1

## Analiza deskrypcyjowa

APARATURA POMIAROWA. PROJEKT WSTĘPNY. WYKONANIE  
I BADANIA MODELI

## Analiza dokumentacyjna

Sprawozdanie zawiera charakterystykę techniczną modeli aparatury pomiarowej, opis wykonania i badań modeli oraz wnioski.

## Tytuły poprzednich sprawozdań

1. Wzorcownicza aparatura pomiarowa do sprawdzania czujników, przetworników i mierników ciśnienia. Etap 1. Punkt kontr. 1. Opracowanie założeń techniczno-ekonomicznych. CPBR nr 12.1, cel realizacyjny 23. Nr rejestr. 5829

## Spis treści

	str.
1. Wstęp . . . . .	1
1.1. Przedmiot pracy . . . . .	1
1.2. Podstawa formalna prowadzenia pracy . . . . .	1
1.3. Uzasadnienie celowości podjęcia opracowania aparatury pomiarowej . . . . .	1
1.4. Aparatura pomiarowa produkowana przez firmy zagraniczne . . . . .	2
2. Charakterystyka techniczna opracowywanych modeli aparatury pomiarowej . . . . .	3
2.1. Wprowadzenie . . . . .	3
2.2. Budowa i zasada działania aparatury pomiarowej .	3
2.3. Budowa i zasada działania czujników rezonatorowych	5
2.3.1. Czujnik z rezonatorem membranowym . . . . .	5
2.3.2. Czujnik z rezonatorem cylindrycznym . . . . .	5
2.4. Miernik cyfrowy . . . . .	7
2.5. Założone podstawowe dane techniczne aparatury pomiarowej . . . . .	7
2.5.1. Właściwości metrologiczne i użytkowe . . . . .	7
2.5.2. Realizowane funkcje . . . . .	8
2.5.3. Najważniejsze dane konstrukcyjne . . . . .	8
3. Opracowanie, wykonanie i badania modeli czujników .	9
3.1. Czujniki z rezonatorem membranowym . . . . .	9
3.1.1. Budowa i wykonanie modeli czujników . . . . .	9
3.1.2. Badania modeli . . . . .	11
3.1.3. Wnioski z badań modeli . . . . .	16
3.2. Czujniki z rezonatorem cylindrycznym . . . . .	16
3.2.1. Rezonatory cylindryczne . . . . .	16
3.2.1.1. Dobór parametrów konstrukcyjnych . . . . .	16
3.2.1.2. Rodzaje badań rezonatorów i ich wyniki . . . . .	17
3.2.2. Czujniki nadciśnienia . . . . .	25
3.2.2.1. Budowa modeli . . . . .	25
3.2.2.2. Badania modeli . . . . .	31
3.2.3. Czujnik podciśnienia . . . . .	44
3.2.3.1. Budowa modelu . . . . .	44
3.2.3.2. Badania modeli . . . . .	46

	str.
3.2.4. Wnioski z badań rezonatorów cylindrycznych i czujników ciśnienia z rezonatorami cylindrycznymi . . . . .	50
4. Model miernika cyfrowego mikroprocesorowego do współpracy z rezonatorowymi czujnikami ciśnienia .	51
4.1. Opracowanie i wykonanie modeli miernika . . . . .	51
4.2. Badania modeli miernika . . . . .	52
4.3. Wnioski z badań modeli . . . . .	55
5. Modele aparatury pomiarowej . . . . .	55
5.1. Badania modeli aparatury . . . . .	55
5.2. Podstawowe przyrządy i urządzenia używane podczas badań . . . . .	60
6. Wnioski . . . . .	60

Załączniki:

- Nr 1 - Mikroprocesorowy miernik cyfrowy do współpracy  
z czujnikami rezonatorowymi, I wersja - uprosz-  
czona. Wymagania
- Nr 2 - Mikroprocesorowy miernik cyfrowy do współpracy  
z czujnikami rezonatorowymi, II wersja - labo-  
ratoryjna. Wymagania
- Nr 3 - Analiza błędów przyjętego modelu matematycznego  
rezonatorowego miernika ciśnienia RMC
- Nr 4 - Schemat blokowy i charakterystyka przyjętego  
rozwiązania miernika cyfrowego do współpracy  
z czujnikami rezonatorowymi

## 1. WSTĘP

### 1.1. Przedmiot pracy

Przedmiotem pracy jest realizacja zad. 1.1 tematu „Aparatura pomiarowa do dokładnych pomiarów ciśnienia oraz sprawdzania czujników, przetworników i mierników ciśnienia”.

Treścią zadania 1.1 jest opracowanie, wykonanie i badania modeli aparatury pomiarowej do pomiarów ciśnienia gazów /powietrza/. W dalszej treści sprawozdania używa się skrótowej nazwy „aparatura pomiarowa”.

### 1.2. Podstawa formalna prowadzenia pracy

Podstawą podjęcia pracy jest umowa Nr 409/88 z dnia 16.09.88r zawarta między Instytutem Organizacji Przemysłu Maszynowego ORGMASZ jako Zamawiającym oraz Przemysłowym Instytutem Automatyki i Pomiarów MERA-PIAP jako Wykonawcą.

### 1.3. Uzasadnienie celowości podjęcia opracowania aparatury pomiarowej

Potrzeba opracowania i uruchomienia produkcji ciśnieniowej aparatury pomiarowej o dużej dokładności wynika z jej braku na rynku krajowym. W kraju nie są produkowane czujniki, przetworniki ciśnienia ani aparatura pomiarowa o klasie dokładności 0,1 lub lepszej, z wyjątkiem manometrów obciążnikowo-tłokowych, które jednak ze względu na złożoną i uciążliwą obsługę oraz brak możliwości współpracy z systemami automatyki i komputerem, mają ograniczone zastosowanie. Powoduje to konieczność importu dokładnych przyrządów z państw zachodnich. Produkowana przez nieliczne firmy światowe ciśnieniowa aparatura pomiarowa o b.wysokiej dokładności oparta jest na czujnikach rezonatorowych, których sygnałem wyjściowym jest częstotliwość.

Z uwagi na zalety aparatury z czujnikami rezonatorowymi, takie jak:

- wysoka dokładność pomiaru,
- wysoka stabilność długoterminowa i powtarzalność
- łatwość i wygoda obsługi,

- zapewnienie rejestracji /wydruku/ wyników pomiarów,
- możliwość współpracy z komputerem

uważa się za celowe podjęcie jej opracowania i uruchomienia produkcji.

#### 1.4. Aparatura pomiarowa produkowana przez firmy zagraniczne

Ciśnieniowa aparatura pomiarowa jest produkowana przez szereg firm światowych. Jednak aparaturę pomiarową z czujnikami rezonatorowymi, charakteryzującą się najwyższymi dokładnościami produkuje tylko kilka renomowanych firm zagranicznych. Są to np.: Druck-Limited /Wielka Brytania/, Solartron /Wielka Brytania/, ~~Paroscientific /USA/, Hamilton Standard /USA/~~, Desgranges i Huot /Francja/ i VDO Dresser GmbH /RFN/. Dokładne omówienie budowy oraz danych technicznych przyrządów firm Paroscientific i Druck-Limited zawarte jest w Założeniach techniczno-ekonomicznych opracowanych w ramach etapu 1, punkt kontr. 1 pracy stanowiącej cel realizacyjny nr 23 planu realizacyjnego CPBR nr 12.1 „Aparatura pomiarowa”, którego Generalnym Wykonawcą był Instytut Komputerowych Systemów Automatyki i Pomiarów IKSAiP we Wrocławiu.

Dla przykładu podaje się podstawowe dane aparatury pomiarowej z czujnikami rezonatorowymi f-my Paroscientific:

- a/ zakresy pomiarowe od  $0 \pm 0,1$  MPa do  $0 \pm 69$  MPa,
- b/ dokładność wywzorcowania: od  $\pm 0,015\%$  do  $\pm 0,04\%$  - zależnie od zakresu pomiarowego,
- c/ możliwość podłączenia 8-miu rezonatorowych czujników ciśnienia,
- d/ możliwość współpracy z drukarką lub rejestratorem analogowym,
- e/ wyświetlenie wyniku pomiaru na ośmiocyfrowym wskaźniku LED /w różnych jednostkach ciśnienia/.

Cena aparatury pomiarowej firm zachodnich - zależnie od dokładności i konstrukcji, ilości zakresów pomiarowych i wyposażenia - jest zróżnicowana. Przykładowo, dla firmy Druck-Limited wahała się w granicach od 4000 USD do 13.000 USD wg danych z roku 1985.

Cena /w r.1985/ kompletu aparatury f-my Paroscientific składającej się z miernika i 8 czujników wynosiła 32.400 USD.

W krajach RWPG, aparatura taka nie jest produkowana; brak jest bliższych informacji o produkcji w ZSRR czujników rezonatorowych. O zainteresowaniu ZSRR czujnikami rezonatorowymi można sądzić z dużej ilości publikacji i patentów oraz ustanowionej w 1973r i znowelizowanej w 1983r normy GOST 18618-83 „Preobrazowatieli dawlenija izmeritielnyje wibrostierżniewyje czastotnyje. Obszczije tiechniczeskije triebowanija i metody ispytanij”.

## 2. Charakterystyka techniczna opracowywanych modeli aparatury pomiarowej

### 2.1. Wprowadzenie

W opracowanych założeniach techniczno-ekonomicznych, dotyczących aparatury pomiarowej przeznaczonej do pomiaru ciśnienia cieczy i gazów, przyjęto, że dla realizacji założonych w nich parametrów technicznych oraz przy wykorzystaniu dostępnych w kraju technologii i materiałów zostaną zastosowane czujniki z rezonatorami membranowymi, cylindrycznymi i prętowymi z materiałów ferromagnetycznych. Wobec tego, że przedmiotem zadania 1.1 /zgodnie z punktem 1.1 niniejszego opracowania/ jest aparatura przeznaczona do pomiarów ciśnienia gazów, zakres prac wykonywanych w ramach tego zadania obejmuje aparaturę z czujnikami rezonatorowymi membranowymi i cylindrycznymi.

W związku z powyższym w p. 2.3 omówiono budowę i zasadę działania czujników rezonatorowych z rezonatorami membranowymi i cylindrycznymi.

### 2.2. Budowa i zasada działania aparatury pomiarowej

Aparatura pomiarowa składać się będzie z czujników rezonatorowych oraz współpracującego z nimi mikroprocesorowego miernika cyfrowego.

W zasadzie pomiarowej czujnika rezonatorowego jest wykorzystana zależność zmian częstotliwości drgań rezonansowych rezonatora od mierzonego ciśnienia. Rezonator wraz z współpracującymi z nim elementami tworzy zespół drgający, którego częstotliwość drgań jest narzucona przez częstotliwość drgań własnych rezonatora, a ta zależy głównie od stanu występujących w nim naprężeń, wywołanych działaniem mierzonego ciśnienia.

W skład zespołu drgającego, obok rezonatora, wchodzi układy: pobudzający i odbierający oraz wzmacniacz elektroniczny. Układ pobudzający powoduje wprowadzenie rezonatora w ruch drgający, oddziaływując na niego za pośrednictwem wytworzonego przez siebie zmiennego pola magnetycznego. W układzie odbierającym indukowany jest sygnał sprzężenia zwrotnego podawany następnie do wzmacniacza. Sygnał ten po wzmocnieniu zasila układ pobudzający, przez co dokonuje się zamknięcie dodatniego sprzężenia zwrotnego zespołu drgającego i podtrzymywanie tym samym drgań rezonatora.

Sygnał wyjściowy zespołu drgającego, który z reguły ma kształt prostokątny i poziomy napięć zgodny ze standardem TTL, jest doprowadzany do miernika cyfrowego.

Sygnałem wyjściowym z czujnika rezonatorowego jest sygnał częstotliwościowy, odporny na zakłócenia przemysłowe i łatwy do przetwarzania w postać cyfrową.

Obróbka częstotliwościowego sygnału wyjściowego z czujnika rezonatorowego jest realizowana w technice cyfrowej. Dokładność przetwarzania częstotliwościowego sygnału wyjściowego z czujnika jest więc bardzo wysoka i nie wpływa praktycznie na wynikową dokładność aparatury pomiarowej, składającej się z czujnika /lub kilku czujników/ i miernika cyfrowego. Budowa miernika ciśnienia w technice cyfrowej z mikroprocesorem umożliwia programowanie aparatury przez użytkownika, uzyskanie sygnałów wyjściowych do współpracy z komputerem, drukarką i rejestratorem analogowym.

Wartość mierzonego ciśnienia jest wyświetlana na wskaźniku cyfrowym miernika.

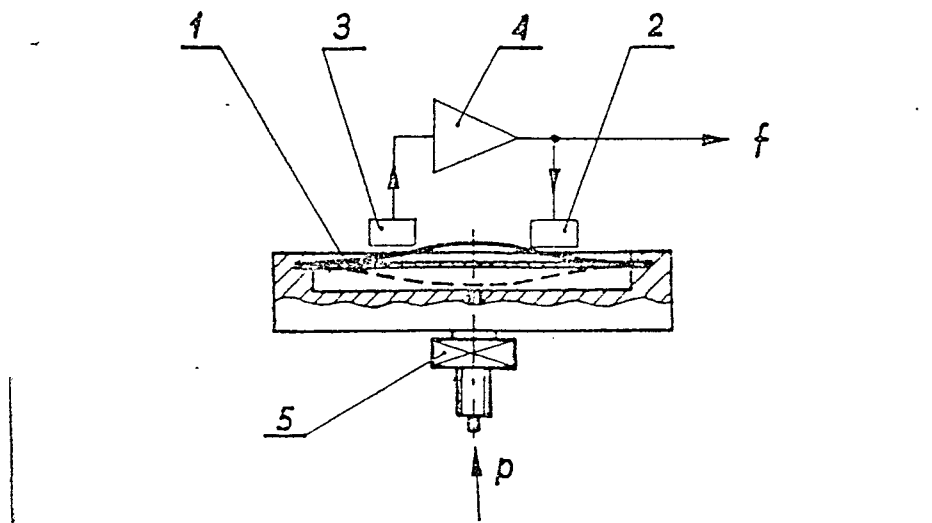


## 2.3. Budowa i zasada działania czujników rezonatorowych

### 2.3.1. Czujnik z rezonatorem membranowym

W czujniku z rezonatorem membranowym /rys.1/ część drgająca 1 jest wykonana z cienkiej blachy ferromagnetycznej utwierdzonej na obrzeżu. Zespół drgający składa się z cewki pobudzającej 2, cewki odczytującej 3 i wzmacniacza 4.

Czujniki z rezonatorem membranowym są zwykle stosowane do pomiaru małych wartości nadciśnienia oraz podciśnienia.



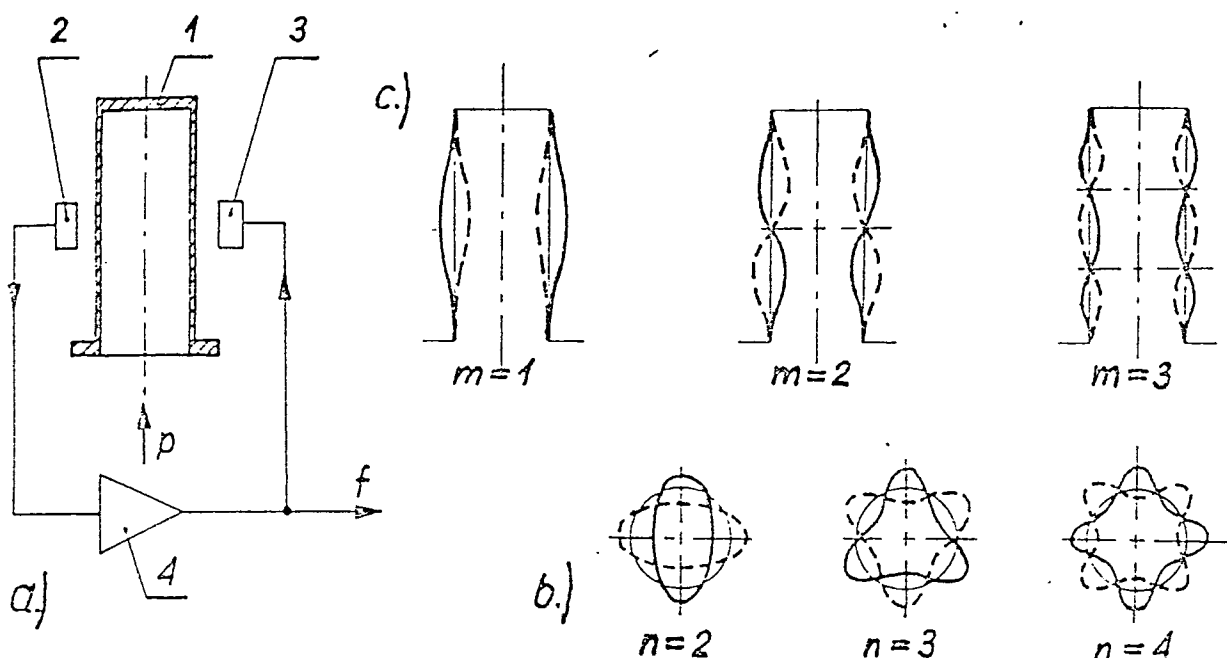
Rys. 1. Rezonator membranowy

- 1 - membrana, 2 - cewka pobudzająca,
- 3 - cewka odczytująca, 4 - wzmacniacz,
- 5 - króciec.

### 2.3.2. Czujnik z rezonatorem cylindrycznym

Rezonator cylindryczny /rys.2/ jest wykonany w kształcie cienkościennego cylindra 1 jednostronnie zamkniętego. Ścianki cylindra są pobudzane do drgań rezonansowych przez układ elektromagnetyczny. Ciśnienie działające na powłokę cylindra zmienia jego sztywność a zatem i częstotliwość rezonansową. W czasie drgań tworzą się dwa rodzaje fal: obwodowe /rys.2b/ i wzdłużne /rys.2c/. Rodzaj powstających fal zależy od ilości i sposobu rozmieszczenia cewek pobudzających i odczytujących.

Częstotliwość drgań jest funkcją własności materiału i kształtu cylindra oraz właściwości fizycznych czynnika mierzonego. Natomiast stałość drgań zależy tylko od stabilności niektórych parametrów materiału. Największy wpływ na częstotliwość drgań mają ciśnienie i temperatura. Stosując materiały o bardzo małym temperaturowym współczynniku sprężystości, np. stopy Nispan-C, Elinwar, ogranicza się do minimum wpływ zmian temperatury.



Rys. 2. Rezonator cylindryczny: a - zespół drgający, b - rodzaj fal obwodowych, c - rodzaje fal wzdłużnych; 1 - cylinder, 2 - cewka odczytująca, 3 - cewka pobudzająca, 4 - wzmacniacz.

Rezonatory cylindryczne są stosowane przede wszystkim do pomiaru ciśnienia gazów. Cechują się dużą dokładnością, dobrą stabilnością i małą histerezą.

## 2.4. Miernik cyfrowy

Miernik cyfrowy z mikroprocesorem przetwarza częstotliwościowy sygnał wyjściowy z czujnika rezonatorowego we wskazanie wyniku pomiaru w postaci cyfrowej /w jednostkach ciśnienia/ na polu odczytowym.

Miernik dokonuje obliczenia wartości mierzonego ciśnienia w oparciu o wielomian interpolujący dla określonego czujnika, a otrzymany wynik wyświetla na siedmiocyfrowym wskaźniku.

Wielomian interpolujący ma postać wielomianu wyższego stopnia, np:

$$p = K/Ax^4 + Bx^3 + Cx^2 + Dx + E/$$

gdzie:

- K - stała służąca do przeliczania jednostek,
- A,B,C,D,E - stałe algorytmu przetwarzania, charakterystyczne dla każdego czujnika rezonatorowego,
- x - prosta funkcja analityczna f i  $f_0$ ;  $x = f - f_0$ ,  
przy czym:
  - $f_0$  - częstotliwość początkowa charakterystyczna dla danego czujnika,
  - f - częstotliwość, będąca funkcją mierzonego ciśnienia.

Charakterystyka częstotliwościowa czujnika rezonatorowego jest nieliniowa i jednym z zadań miernika jest przetworzenie tej nieliniowej charakterystyki we wskazanie cyfrowe proporcjonalne /liniowo/ do wartości mierzonego ciśnienia.

## 2.5. Założone podstawowe dane techniczne aparatury pomiarowej

### 2.5.1. Właściwości metrologiczne i użytkowe

1. Zakresy pomiarowe /typoszereg ciśnień/ przy czym:

- najmniejszy: -0,06 ÷ 0 MPa /podciśnienie/  
0 ÷ 0,06 MPa /nadciśnienie/
- największy: -0,1 ÷ 0 /podciśnienie/  
0 ÷ 6 MPa /nadciśnienie/

M

2. Klasy dokładności: a/ 0,02; 0,025  
b/ 0,04; 0,05; 0,06  
c/ 0,1
3. Temperatura otoczenia: a/ 15 ± 35°C  
b/ 5 ± 40°C
4. Czynniki mierzone: powietrze /gazy/
5. Napięcie zasilania:
  - mierników 220V/50Hz
  - czujników ±12 lub ±15 VDC

#### 2.5.2. Realizowane funkcje

- a/ pomiar podciśnienia, nadciśnienia, różnicy ciśnień,  
wyznaczanie stosunku ciśnień  $\frac{P_1}{P_2}$
- b/ możliwość sprawdzania czujników, przetworników i mierników podciśnienia, nadciśnienia z wyznaczaniem błędów sprawdzanych przyrządów,
- c/ możliwość wzorcowania czujników rezonatorowych,
- d/ pomiar częstotliwości i okresu drgań czujnika rezonatorowego,
- e/ opcjonalnie możliwość współpracy z drukarką lub rejestratorem analogowym lub komputerem,
- f/ sygnalizacja określonych stanów przekroczeń lub błędnego działania, np. osiągnięcie granicy zakresu pomiarowego, podłączenia niewłaściwego czujnika,
- g/ przechowywanie w pamięci miernika i wyświetlanie odpowiednich danych współpracujących czujników.

#### 2.5.3. Najważniejsze dane konstrukcyjne

- a/ miernik cyfrowy będzie przystosowany do podłączenia maksymalnie 6 lub 8 czujników /zależnie od wersji miernika/,
- b/ miernik będzie wyposażony:
  - w klawiaturę umożliwiającą wprowadzenie do pamięci odpowiednich danych,

- we wskaźnik LED  $7\frac{1}{2}$  cyfry lub ciekłokrystaliczne,
- opcjonalnie w jeden z dwóch interfejsów do współpracy z drukarką lub komputerem lub w przetwornik c/a - wersja pierwsza /uproszczona/ miernika,
- opcjonalnie w interfejs do drukarki lub komputera oraz przetwornik a/c - wersja druga /laboratoryjna/ miernika,
- c/ konstrukcja miernika zapewni dokonywanie pomiarów ciśnienia w różnych jednostkach, np. hPa, kPa, MPa,  $\text{kg/cm}^2$ ,
- d/ zakres częstotliwości sygnałów wyjściowych czujników rezonatorowych:  $2 \div 20$  kHz,
- e/ sygnał wejściowy przetwornika a/c /wejście pomiarowe/:  $0 \div 20$  mA lub  $4 \div 20$  mA lub  $0 \div 5$  mA,
- f/ sygnał wyjściowy przetwornika c/a: standart  $0 \div 20$  mA i  $4 \div 20$  mA do wyboru przez użytkownika,
- g/ miernik będzie sygnalizować:
  - włączenie zasilania,
  - brak sygnału wejściowego z czujnika,
  - podłączenie niewłaściwego czujnika,
  - osiągnięcie granicy zakresu pomiarowego,
  - przekroczenie granicy zakresu pomiarowego.

### 3. Opracowanie, wykonanie i badania modeli czujników

#### 3.1. Czujniki z rezonatorem membranowym

##### 3.1.1. Budowa i wykonanie modeli czujników

Czujniki z rezonatorem membranowym należą do grupy czujników z rezonatorem o działaniu bezpośrednim i <sup>z założenia</sup> miały być stosowane do pomiarów nadciśnienia i podciśnienia gazu w zakresie do około 300 kPa.

Budowę i zasadę działania czujnika z rezonatorem membranowym omówiono w p. 2.3.1. Uzupełniając należy dodać, że pobudzenie membrany do drgań możliwe jest różnymi metodami, przy czym w praktyce stosuje się pobudzenie elektromagnetyczne lub piezoelektryczne. Obie te metody ~~zostały~~ <sup>zastosowane</sup>

w budowie modeli czujników.

Przy elektromagnetycznym układzie wzbudzająco-odczytującym nad membraną umieszczone są w odpowiednich miejscach dwie cewki: wzbudzająca i odczytująca.

W przypadku układu piezoelektrycznego na membranie naklejone są, w odpowiednich miejscach, dwa elementy piezoceramiczne: jeden do wzbudzania, drugi do odczytu drgań.

Elementem pomiarowym jest rezonator membranowy, składający się z membrany przymocowanej do korpusu lub stanowiącej jedną całość z korpusem, tworzącym zarazem komorę, do której doprowadza się mierzone ciśnienie /podciśnienie, nadciśnienie/.

Rezonatory membranowe wykonywane były w dwóch wariantach technologicznych:

- metodą skrawania /toczenie i szlifowanie/ z pręta kwadratowego z elinwaru tytanowego,
- metodą spawania elektrodą wolframową w osłonie argonu /TIG/ dwóch oddzielnych części tzw. korpusu i membrany.

Metodą skrawania wykonano membrany z elinwaru tytanowego o średnicy 45 mm; minimalna grubość, jaką udało się osiągnąć wynosiła 0,3 mm.

Membrany spawane wykonane były z blachy o grubościach 0,15; 0,20 i 0,25 mm i średnicach 20, 30 i 45 mm. Korpus i membrana do wariantu spawanego wykonane były ze stali 3H13.

Wykonanie zarówno membran spawanych jak i toczonych następczo było poważną trudnością.

W przypadku membran spawanych trudności polegały na tym, że spawane były one bez możliwości wstępnego naprężenia. Ponadto w miejscach spawania występowały lokalne przegrzania lub pofałdowania membran, spowodowane skurczem przy stygnięciu spawu. Wskutek tego część membran była od razu dyskwalifikowana, natomiast pozostałe wykazywały znaczny rozrzut częstotliwości pracy i dużą nieliniowość /od kilku do kilkunastu procent/.

Membran toczonych nie udało się wykonać poprawnie, ponieważ przy grubości membrany rzędu kilku dziesiątych milimetra, podczas dalszej obróbki następowało „wyciąganie” materiału, wskutek czego uzyskiwano membranę wklęsłą lub

wypukłą w środku. Membrany takie charakteryzowały się niestabilną częstotliwością pracy, co wykluczało ich stosowanie.

### 3.1.2. Badania modeli

Po zmontowaniu modeli uruchomiono je i przeprowadzono podstawowe badania właściwości metrologicznych.

Celem badań było:

- określenie wpływu wymiarów membrany /średnicy i grubości/ na częstotliwość drgań,
- wyznaczenie podstawowych właściwości metrologicznych,
- sprawdzenie, która z metod wzbudzania drgań membrany jest korzystniejsza.

Ponieważ membrany toczne odznaczały się wadami eliminującymi w praktyce możliwość ich zastosowania, badania wykonano na rezonatorach membranowych spawanych do obrzeża korpusu.

Badaniom poddano 10 szt. czujników oznaczonych numerami 1, 3, 4, 5, 11, 13, 14, B, D, E.

Przed każdą serią pomiarów zadawano nominalne ciśnienia i dopiero po tym przystępowano do badań.

Poniżej, w tabelicy 1 przedstawiono zakres zmian częstotliwości pracy modeli czujnika podciśnienia w zakresie od 0 do -85 kPa.

Tablica 1. Częstotliwość pracy modeli czujnika w Hz.

	Numer czujnika										Wartości średnie
	1	3	4	5	11	13	14	B	D	E	
$f_o$	3286	3291	3188	3346	3476	3238	3188	3093	3100	3276	$\bar{f}_o = 3248$
$f_n$	4238	4038	3917	3971	4087	4018	3908	3975	4116	4184	$\bar{f}_n = 4045$
$f_z = f_n - f_o$	952	747	729	625	611	780	720	882	1016	908	$\bar{f}_z = 797$
$\frac{f_o - \bar{f}_o}{f_o} \cdot 100\%$	1,2%	1,3%	-1,8%	3,0%	7,0%	-0,3%	-1,8%	-4,8%	-4,5%	0,9%	
$\frac{f_n - \bar{f}_n}{f_n} \cdot 100\%$	4,8%	-0,8%	-3,2%	-1,8%	1,0%	-0,7%	-3,4%	-1,7%	1,7%	3,4%	

$f_o$  - częstotliwość pracy czujnika przy ciśnieniu atmosferycznym  
 $f_n$  - częstotliwość pracy czujnika przy ciśnieniu nominalnym  
 $f_z$  - zakres częstotliwości czujnika

Ciężarowa [kPa]	Nr czujnika																													
	1			3			4			5			11			13			14			B			D			E		
	$\delta_L$	$\delta_P$	$\delta_H$	$\delta_L$	$\delta_P$	$\delta_H$	$\delta_L$	$\delta_P$	$\delta_H$	$\delta_L$	$\delta_P$	$\delta_H$	$\delta_L$	$\delta_P$	$\delta_H$	$\delta_L$	$\delta_P$	$\delta_H$	$\delta_L$	$\delta_P$	$\delta_H$	$\delta_L$	$\delta_P$	$\delta_H$	$\delta_L$	$\delta_P$	$\delta_H$	$\delta_L$	$\delta_P$	$\delta_H$
0	0	0,10	0,20	0	0,25	0,25	0	0,25	0,25	0	0,2	0,2	0	0,2	0,2	0	0,15	0,25	0	0,25	0,25	0	0,2	0,2	0	0,1	0,1	0	0,3	0,2
-10	4,3	0,10	0,10	-1,4	0,15	0	-9,2	0,15	0,15	2,9	0,2	0	-4,4	0,2	0	-4,7	0,15	0,15	-4,6	0,15	0,15	-2,2	0,1	0,1	1,3	0,1	0	-1,6	0,2	0,1
-20	2,6	0	0	-5,9	0,40	0,15	-9,2	0,15	0,15	7,0	0,4	0,2	-7,2	0,2	0	-6,4	0,25	0	-5,9	0,15	0	-3,1	0,1	0	3,4	0,2	0,1	-0,3	0,1	0,1
-30	2,3	0,10	0,10	-7,6	0,25	0,15	-11,2	0,25	0,15	9,3	0,2	0,2	-8,3	0,2	0,2	-7,4	0,15	0,15	-4,4	0,25	0,15	-3,5	0,2	0,1	3,8	0,1	0	-0,2	0,2	0,2
-40	2,9	0,10	0,20	-7,1	0,25	0,15	-11,8	0,40	0,15	11,0	0,2	0	-8,0	0,4	0,2	-6,7	0	0	-1,3	0,15	0,15	-1,8	0,1	0	3,9	0,1	0,1	1,0	0,2	0,1
-50	3,2	0,10	0,10	-5,7	0,15	0	-11,2	0,25	0,15	12,3	0,2	0,2	-7,2	0,2	0	-5,4	0,15	0,15	-1,0	0	0	-0,6	0,1	0	3,9	0,2	0,1	1,6	0,1	0,1
-60	3,2	0,10	0,10	-1,8	0,40	0	-3,1	0,15	0	12,0	0,4	0	-7,9	0,2	0,2	-3,7	0,15	0	3,6	0,15	0,15	0,4	0,2	0,1	4,0	0,1	0,1	2,3	0,1	0,1
-70	1,7	0,10	0,10	-1,7	0	0,15	-4,1	0,15	0,15	8,3	0,2	0,2	-1,8	0	0,2	-2,1	0,25	0	4,9	0,15	0,15	0,3	0,2	0,2	2,4	0,2	0,1	1,5	0,1	0,1
-80	0,6	0,10	0,10	0	0,15	0,15	-0,2	0	0	3,4	0	0,2	-0,5	0,2	0	-0,8	0,25	0,15	3,2	0	0,15	0,4	0,1	0,1	1,1	0,2	0	1,2	0	0
-85	0	0	0	0	0	0	0	0,15	0,15	0	0,2	0,2	0	0	0,2	0	0	0	0	0,15	0	0	0,1	0	0	0,1	0	0	0,2	0,2

Tablica 2. Błędy liniowości  $\delta_L$ , powtarzalności  $\delta_P$  i histereza pomiarowa  $\delta_H$  modeli czujników w %

16



W tablicy 2 zestawiono wartości błędów poszczególnych czujników uzyskane podczas badań w temperaturze odniesienia.

W tablicy 3 zestawiono wartości błędów dodatkowych zmiany częstotliwości podstawowej  $\sigma_{t_0}$  oraz pochylenia charakterystyki  $\sigma_{tp}$  spowodowane zmianą temperatury otoczenia w zakresie 5 - 40°C.

Tablica 3

	Nr czujnika								
	1	3	4	5	11	13	14	D	E
$\sigma_t$ /%/10°C/	0,04	0,3	-0,03	0,9	0,02	0,4	0,3	0,15	0,5
$\sigma_{tp}$ /%/10°C/	-0,18	0,06	0,03	-1,2	0,02	0,3	0,9	-0,30	0,5

W wyniku sprawdzeń podstawowych właściwości metrologicznych stwierdzono, że:

- częstotliwość podstawowa /przy ciśnieniu  $p = 0$ / wynosi około 3200 Hz  $\pm$  15%, zaś przyrost częstotliwości w zakresie pomiarowym wynosi około 600 Hz  $\pm$  25%,
- histereza pomiarowa jest pomijalnie mała,
- nieliniowość charakterystyki jest bardzo duża i wynosi od kilku do kilkunastu procent, przy czym początkowy odcinek charakterystyki jest wyraźnie bardziej nieliniowy,
- występują poważne różnice pomiędzy charakterystykami czujników wykonanych w jednej serii.

Jak widać z wyników zamieszczonych w tabl. 1-3, założone wartości błędów zostały przekroczone we wszystkich egzemplarzach modelu. Przyczynami tych przekroczeń są prawdopodobnie różnice w naprężeniach poszczególnych membran lub brak naprężenia wstępnego po ich przyspawaniu do korpusów.

Świadczą o tym również duże wartości błędu nieliniowości na początku zakresu pomiarowego. Różnice między charakterystykami świadczą o niepełnej powtarzalności wykonania czujników a w szczególności spawania.

Ponadto pewnen wpływ mogą mieć również lokalne zmiany właściwości materiału membrany w miejscu spawania. Wstępnego naprężenia membran, po ich przyspawaniu, nie da się już zmieniać. Możliwe jest natomiast usunięcie choćby części naprężeń powstałych podczas stygnięcia spoiny na drodze obróbki mechanicznej lub termicznej. W tym celu wykonano doświadczenie na dwóch grupach modeli liczących po trzy egzemplarze.

Badania przeprowadzono w następujący sposób:

grupa I - membrany o numerach 4, 5 i D poddano obróbce mechanicznej, polegającej na równomiernym zmniejszeniu ich grubości w pobliżu miejsca spawania na całym obwodzie. Membrany zamocowano we wrzecionie tokarki zegarmistrzowskiej i przez 10 s szlifowano je na średnicy od 20 mm do miejsca spawania papierem ściernym o grubości 120. Następnie zbadano ich podstawowe właściwości metrologiczne.

grupa II - membrany o numerach 1, 3 i E poddano obróbce termicznej polegającej na wygrzewaniu odprężającym przez 8 h w temp.  $500^{\circ}\text{C}$ .

Następnie zbadano ich podstawowe właściwości metrologiczne, a następnie poddano je identycznej obróbce mechanicznej jak membrany z grupy I, i ponownie zbadano ich podstawowe właściwości metrologiczne.

Wyniki tych badań zestawiono w tablicy 4. Świadczą one o tym, że wygrzewanie membran w temp.  $500^{\circ}\text{C}$  nie polepsza ich właściwości sprężystych.

Zakres częstotliwości czujnika ulega wyraźnemu zawężeniu. Natomiast wyraźnie pozytywny wpływ ma obróbka mechaniczna, o czym świadczą zmniejszenie błędów liniowości we wszystkich modelach, i to zarówno ich wartości maksymalnej, jak i wartości średniej. Wzrósł również zakres częstotliwości wszystkich czujników.

Tablica 4. Zmiana podstawowych właściwości membran po obróbce mechanicznej i termicznej

	Badania wstępne			Badania po obróbce mechanicznej			Badania wstępne			Badania po obróbce termicznej			Badania po obróbce termicznej i mechanicznej		
	Nr czujnika			Nr czujnika			Nr czujnika			Nr czujnika			Nr czujnika		
	4	5	D	4	5	D	1	3	E	1	3	E	1	3	E
$f_o$ /Hz/	3221	3468	3155	3188	3346	3100	3058	3386	3167	3083	3282	3487	3286	3291	3276
$f_n$ /Hz/	3669	3982	3901	3917	3971	4116	4175	4019	4022	3968	3874	4048	4238	4038	4184
$f_z$ /Hz/	448	514	746	729	625	1016	1117	633	855	885	593	563	952	747	908
$\bar{\sigma}_{Lmax}$ /%/	-20,0	20,2	-20,5	-11,8	12,3	4,0	4,6	-17,7	2,5	-5,6	-10,8	-5,4	3,2	-7,6	1,6
$\bar{\sigma}_L$ /%/	-12,8	12,6	-13,1	-7,1	8,3	3,0	3,2	-10,2	1,4	-2,9	-7,4	-2,5	2,6	-3,9	1,2

$\bar{\sigma}_L$  - średnia wartość błędu liniowości w całym zakresie pomiarowym modelu czujnika

### 3.1.3. Wnioski z badań modeli

Na podstawie uzyskanych z badań wyników można stwierdzić, że modele czujników z rezonatorem membranowym nie spełniają wymagań odnośnie zakładanej dokładności.

Zakładano, że możliwe będzie uzyskanie dokładności od 0,02 do 0,1% wartości zakresu pomiarowego, tymczasem wartości błędów uzyskanych podczas badań przekraczają znacznie te wartości. W sprawozdaniu zamieszczono jedynie wyniki dotyczące pomiarów podciśnienia, ponieważ przy pomiarze nadciśnienia uzyskano prawie identyczne wyniki.

Poprawa wyników uzyskana dzięki obróbce mechanicznej jest niewystarczająca, aby uzyskać przyjęte w założeniach dokładności. Wartości błędów dodatkowych spowodowanych zmianą temperatury otoczenia w zakresie  $5 \div 40^{\circ}\text{C}$  miały wartości większe od założonych. Różnice w wartościach tych błędów w poszczególnych czujnikach spowodowane są prawdopodobnie wpływem temperatury na cewki i układ elektroniczny.

## 3.2. Czujniki z rezonatorem cylindrycznym

### 3.2.1. Rezonatory cylindryczne

#### 3.2.1.1. Dobór parametrów konstrukcyjnych

Założono, że czujniki z rezonatorami cylindrycznymi będą stosowane do pomiaru ciśnienia /podciśnienia i nadciśnienia/ gazów /powietrza/ o niskich i średnich wartościach /0,06 + 6 MPa/.

Najważniejszym elementem układu drgającego czujnika jest rezonator cylindryczny.

W wyniku analizy dotychczasowych prac prowadzonych w Zakładzie DPP oraz na podstawie danych literaturowych /w tym również patentów/ dokonano doboru parametrów konstrukcyjnych rezonatora cylindrycznego. Ustalono wymiary rezonatora cylindrycznego dla ciśnień od 0,06 do 6 MPa. Rezonator cylindryczny jest stożkiem o bardzo nieznacznej zbieżności /ze względów technologicznych/; praktycznie jest walcem o pogrubionym dnie z jednej strony oraz kołnierzem w kształcie pierścienia z drugiej, o grubości ścianki od 0,05 do 0,5 mm - zależnie od zakresu pomiarowego.

### 3.2.1.2. Rodzaje badań rezonatorów i ich wyniki

W Dziale Produkcji Doświadczalnej i Małoseryjnej wykonano 42 szt. rezonatorów cylindrycznych z elinwaru tytanowego wyprodukowanego przez Mikrohutę „Strzemieszyce” w Dąbrowie Górniczej.

W tabl. 5 zestawiono wykonane rezonatory.

Wykonane rezonatory zostały poddane następującym sprawdzeniom:

- 1/ sprawdzenie poprawności działania rezonatorów,
- 2/ sprawdzenie stabilności częstotliwości początkowej,
- 3/ badanie wpływu zmian temperatury otoczenia na charakterystykę częstotliwościową.

Sprawdzenie poprawności działania rezonatorów miało na celu:

- stwierdzenie możliwości wzbudzenia rezonatora i podtrzymania jego drgań rezonansowych,
- określenie częstotliwości początkowej, tj. częstotliwości drgań rezonansowych rezonatora bez „obciążania” go ciśnieniem,
- wstępne określenie zakresu pomiarowego, tj. zakresu ciśnienia, w jakim rezonator może pracować poprawnie.

Jako kryterium przyjęto uzyskanie około 20% zmiany częstotliwości początkowej.

Wyniki powyższych sprawdzeń dla wszystkich rezonatorów podano w tabl. 5.

Wszystkie wykonane rezonatory udało się pobudzić do drgań przy ciśnieniu  $p = 0$ . W czterech rezonatorach o nr nr 4, 9, 25 i 27 drgania zanikły przy znacznie niższej wartości ciśnienia od przewidzianego /dla danej grubości ścianki rezonatora/ zakresu pomiarowego.

W pięciu rezonatorach o nr nr 26, 30, 32, 33 i 34 wystąpiło zjawisko przeskoku częstotliwości, które objawiało się tym, że podczas zmiany ciśnienia wartość ~~z~~ częstotliwości drgań rezonansowych zmieniała się skokowo, przeskakując na inny poziom wartości.

Przyczyną tego zjawiska są nieprawidłowości kształtu przekroju poprzecznego rezonatora np. nieokrągłość, niejednakowa grubość ścianki.

Nr mzo- natura	Grubość ścianki mm	Zakres pomia- rowy kg/cm <sup>2</sup>	Częstotliwość			Uwagi	Nr mzo- natura	Grubość ścianki mm	Zakres pomia- rowy kg/cm <sup>2</sup>	Częstotliwość			Uwagi
			przebiegowa fo	Zmiana wzrostu wzrostu wzrostu H <sub>z</sub>	Zmiana wzrostu wzrostu wzrostu % fo					przebiegowa fo	Zmiana wzrostu wzrostu wzrostu H <sub>z</sub>	Zmiana wzrostu wzrostu wzrostu % fo	
42	0,06	680 <sup>1)</sup>	5044	752	15		32	0,13	—	6877	—	—	Przeskok częstotl.
1	0,07	0÷1,6	5085	1131	22	Zanikanie drgań przy 0,5 kg/cm <sup>2</sup>	33	0,138	—	6926	—	—	Przeskok częstotl.
2	0,07	0÷2,2	5278	1274	24		41	0,14	0÷7,5	7388	1568	21,2	
8	0,07	0÷1,9	5238	956	18		34	0,148	—	7275	—	—	Przeskok częstotl.
9	0,07	—	4731	—	—		36	0,168	0÷10	7515	1622	21,3	
10	0,07	0÷1,7	5105	1082	21		35	0,164	0÷10	7536	1734	23	
26	0,07	—	5228	—	—		37	0,17	0÷10	7678	1673	21,8	
3	0,08	0÷2	5324	1076	20	Zanikanie drgań przy 0,1 kg/cm <sup>2</sup> spowodowane wgnie- ceniem powłoki	38	0,188	0÷10	8307	1413	17	
11	0,08	0÷1,9	5231	1049	20		39	0,188	0÷10	8192	1436	17,5	
15	0,08	0÷3	5547	1113	20		17	0,20	0÷30	7946	1784	22,5	
27	0,08	—	5576	—	—		19	0,20	0÷25	7881	1597	20,3	
28	0,084	0÷2	5464	936	17		20	0,20	0÷24	7535	1485	19,7	
4	0,09	—	5486	—	—		21	0,20	0÷25	7742	1549	20	
12	0,09	0÷2	5248	1047	19,9	Zanikanie drgań przy 0,3 kg/cm <sup>2</sup>	40	0,249	0÷35	8353	1579	18,9	
13	0,09	0÷3	5539	1126	20		7	0,29	0÷40	9093	1393	15	
14	0,09	0÷3,1	5555	1108	20		22	0,29	0÷45	8845	1644	18	
29	0,087	0÷2,5	5577	1123	20		23	0,29	0÷45	8983	1817	20,2	
30	0,092	—	5746	—	—		24	0,4	0÷100	10288	1962	19	
31	0,10	0÷3	5808	1192	20,5		25	0,5	—	12048	—	—	Zanikanie drgań przy 40 kg/cm <sup>2</sup>
6	0,12	0÷4,8	6504	1304	20		1) w mm Hg						
16	0,12	0÷4	6208	1230	19,8								
18	0,12	0÷4,4	6370	1277	20								
5	0,12	0÷4,6	6509	1266	19,5								

18-

22

W pozostałych 33 szt. rezonatorów osiągnięto założoną zmianę częstotliwości.

Sprawdzenie stabilności częstotliwości początkowej przeprowadzono na 6 szt. rezonatorów, które poddano cyklicznym zmianom temperatury  $-20^{\circ}\text{C}$  i  $130^{\circ}\text{C}$ .

Cykl „temperaturowy” obejmował przetrzymanie rezonatorów w temperaturze  $-20^{\circ}\text{C}$  przez 3 godz., zwiększenie temperatury do  $130^{\circ}\text{C}$  i przetrzymanie w tej temperaturze przez 3 godz. Po 2, 4 i 6 cyklach temperaturowych mierzono częstotliwość początkową. Wyniki sprawdzeń podano w tabl. 6.

Tablica 6

Nr rezonatora	Grubość ścianki mm	Częstotliwość początkowa $f_0$ w Hz /przy ciśnieniu $p = 0/$			
		przed próbą	po 2 cyklach	po 4 cyklach	po 6 cyklach
2	0,07	5278	5283	5284	5284
3	0,08	5324	5329	5333	5333
4	0,09	5486	5492	5496	5496
5	0,12	6509	6512	6514	6515
17	0,20'	7946	7951	7953	7953
7	0,29	9093	9095	9097	9098

v Z ~~wyników~~ <sup>danymi</sup> zamieszczonych w tabl. 6 wynika, że częstotliwość początkowa po 6 cyklach temperaturowych zmienia się w stosunku do częstotliwości początkowej przed próbą; dla sprawdzonych 6 szt. rezonatorów są to zmiany od 0,055% /dla rezonatora nr 7/ do 0,182% /dla rezonatora nr 4/.

Ważniejszym jest stwierdzenie, że działanie 4 cykli temperaturowych doprowadziło praktycznie do ustabilizowania częstotliwości początkowej. Należy wykorzystać to w procesie produkcyjnym rezonatorów.

Badanie wpływu zmian temperatury otoczenia na charakterystykę częstotliwościową przeprowadzono w pierwszej kolejności na czterech rezonatorach cylindrycznych o nr nr 2; 16; 17 i 41. Zmontowano wstępne modele czujników wyposażając rezonator w układ mechaniczny do mocowania rezonatora i doprowadzenia ciśnienia mierzonego oraz układy pobudzający i odczytujący drgania i wzmacniacz.

Modele te oznaczono numerami rezonatorów. Modele poddano działaniu kilku temperatur otoczenia, różnych od temperatury odniesienia w zakresie od  $-10^{\circ}\text{C}$  /  $-15^{\circ}\text{C}$  / do  $55^{\circ}\text{C}$ . W każdej temperaturze wyznaczono trzykrotnie charakterystykę częstotliwościową rezonatora, a następnie obliczono błąd temperaturowy tej charakterystyki porównując ją z charakterystyką częstotliwościową w temperaturze odniesienia  $20^{\circ}\text{C}$ . W tablicach 7, 8, 9 i 10 podano dla każdej z temperatur badania wyniki obliczeń, w postaci błędu temperaturowego w % przeliczonego na  $1^{\circ}\text{C}$  zmiany temperatury otoczenia, w kilku punktach pomiarowych /dla kilku wartości ciśnień/.

Na podstawie analizy w/w wyników stwierdza się, że:

- błąd temperaturowy charakterystyki przypadający na  $1^{\circ}\text{C}$  jest wielkością zmienną; zależy nie tylko od temperatury ale również od punktu pomiarowego /wartości ciśnienia/, przy czym ta druga zależność daje większe zróżnicowanie wartości błędów, co szczególnie dało się zaobserwować w rezonatorze nr 17 o największej grubości ścianki,
- dla temperatur wyższych od temperatury odniesienia błąd temperaturowy ma wartości dodatnie i analogicznie, dla temperatur niższych od temperatury odniesienia błąd temperaturowy ma wartości ujemne,
- średnie bezwzględne wartości błędu temperaturowego, obliczone w tabl. 7 + 10 są zawarte w granicach od 0,005 do 0,055%/ $1^{\circ}\text{C}$ .

Przed przystąpieniem do wyżej opisanych badań przypuszczano na podstawie rozważań teoretycznych, że zmiana temperatury otoczenia spowoduje równoległe przesunięcie charakterystyki częstotliwościowej w stosunku do charakterystyki w temperaturze odniesienia. Wyniki przeprowadzonych badań nie potwierdziły słuszności tego sądu.

24



Rezonator nr 17

Tablica 7

Ciśnienie kg/cm <sup>2</sup>	Błąd temperaturowy charakterystyki częstotliwościowej w %/1°C w temperaturze otoczenia							Średnia bezwzględna wartość błędów temperaturowych
	56°C	48°C	37°C	30°C	7°C	2°C	-8°C	%/1°C
0	0,008	0,008	0,010	0,012	-0,008	-0,008	-0,009	0,009
5	0,015	0,017	0,020	0,024	-0,015	-0,018	-0,019	0,018
10	0,022	0,024	0,026	0,031	-0,023	-0,023	-0,029	0,025
15	0,029	0,031	0,036	0,046	-0,027	-0,030	-0,035	0,033
20	0,036	0,038	0,044	0,052	-0,036	-0,037	-0,046	0,041
25	0,040	0,043	0,049	0,058	-0,040	-0,045	-0,056	0,047
30	0,047	0,051	0,058	0,065	-0,044	-0,051	-0,064	0,055

25

Rezonator nr 41

Tablica 8

Ciśnienie	Błąd temperaturowy charakterystyki częstotliwościowej w $\% / 01^{\circ}\text{C}$ w temperaturze otoczenia							Średnia bezwzględna wartość błędów temperaturowych  $\% / 1^{\circ}\text{C}$
	$\text{kg/cm}^2$	$56^{\circ}\text{C}$	$40^{\circ}\text{C}$	$30^{\circ}\text{C}$	$10^{\circ}\text{C}$	$0^{\circ}\text{C}$	$-12^{\circ}\text{C}$	
0	0,006	0,005	0,005	-0,004	-0,006	-0,006	0,005	
2	0,011	0,012	0,010	-0,009	-0,007	-0,008	0,010	
4	0,013	0,014	0,010	-0,011	-0,011	-0,012	0,012	
6	0,015	0,018	0,011	-0,016	-0,015	-0,016	0,015	
7,5	0,018	0,020	0,021	-0,017	-0,016	-0,020	0,019	

9%

# Rezonator nr 16

# Tablica 9

Ciśnienie kg/cm <sup>2</sup>	Błąd temperaturowy charakterystyki częstotliwościowej w % / 1°C w temperaturze otoczenia						Średnia bezwzględna wartości błędów temperaturowych %/1°C
	54°C	40°C	30°C	5°C	-10°C		
0	0,006	0,007	0,005	-0,005	-0,006		0,006
1	0,007	0,008	0,004	-0,007	-0,009		0,006
2	0,010	0,011	0,008	-0,010	-0,011		0,010
3	0,013	0,012	0,012	-0,009	-0,012		0,012
3,95	0,014	0,016	X		-0,014		0,015

42

# Rezonator nr 2

# Tablica 10

Ciśnienie	Błąd temperaturowy charakterystyki rezystancyjnościowej w %/1°C w temperaturze otoczenia								Średnia bezwzględna wartość błędów temperaturowych %/1°C
	56°C	40°C	30°C	7°C	-2°C	-10°C	-12°C		
0	0,010	0,011	0,010	-0,004	-0,010	-0,013	-0,014	0,010	
0,4	0,011	0,011	0,012	-0,004	-0,010	-0,014	-0,016	0,011	
0,8	0,011	0,011	0,013	-0,007	-0,013	-0,016	-0,018	0,013	
1,2	0,013	0,015	0,017	-0,007	-0,013	-0,017	-0,018	0,014	
1,7	0,013	0,014	0,012	-0,007	-0,014	-0,021	-0,024	0,015	

210

210

Ponieważ badania przeprowadzone były na pojedynczych rezonatorach /każdy rezonator miał inną grubość powłoki/, dlatego zdecydowano się na powtórzenie tych badań na trzech kolejnych rezonatorach, reprezentujących praktycznie te same zakresy pomiarowe, i tak rezonatory: o nr 18 na zakres  $0 + 3,95 \text{ kG/cm}^2$ , nr 36 - na zakres  $0 + 8 \text{ kG/cm}^2$  i nr 40 - na zakres  $0 + 30 \text{ kG/cm}^2$ . Wyniki badań tych rezonatorów zestawiono w tabl. 11 + 13. Potwierdzają one wyniki badań czterech modeli pierwszej serii, chociaż dla 3 szt. modeli z drugiej serii uzyskano mniejszy rozrzut wartości błędów temperaturowych oraz mniejsze wartości tych błędów. I tak, średnie bezwzględne wartości błędu temperaturowego zawarte są w granicach od 0,006 do  $0,035\%/1^\circ\text{C}$ .

### 3.2.2. Czujniki nadciśnienia

3.2.2.1. Budowa modeli. Ogólnie budowę i zasadę działania czujnika ciśnienia z rezonatorem cylindrycznym omówiono w p.2.3.2. Opracowaną konstrukcję modelowych czujników nadciśnienia pokazano na rys. 3.

Czujnik składa się z rezonatora cylindrycznego 1 przymocowanego do korpusu 2 przy pomocy pierścienia dociskowego 4 i wkręta specjalnego 11. W korpusie znajduje się króciec 3 do doprowadzenia mierzonego nadciśnienia do wnętrza rezonatora. Dla zapewnienia szczelności pomiędzy rezonatorem a korpusem i pierścieniem dociskowym znajdują się uszczelki /pierścienie uszczelniające/ 5. Osłona cylindra 8 zabezpiecza powłokę rezonatora przed jej uszkodzeniem. Na zewnątrz rezonatora umieszczone są cewki układów: pobudzającego 6 i odczytującego 7 drgania rezonatora a nad nim umieszczony jest układ elektryczny 9 ze wzmacniaczem.

W opisanej konstrukcji modelu czujnika nadciśnienia do pobudzania i odczytywania częstotliwości drgań rezonatora zostały zaprojektowane układy elektromagnetyczne w dwóch wersjach:

a/ wersja 1 - układ wzbudzający składa się z cewki, magnesu ALNICO i walcowego rdzenia; jako układ odczytujący zastosowano głowicę magnetofonową z magnesem ALNICO,

Rezonator nr 18

TABLICA 11

Ciężnienie kg/cm <sup>2</sup>	Błąd temperaturowy charakterystyki częstotliwościowej w %/°C w temperaturze otoczenia						Średnia bezpośrednia wartość błędów tem- peratury %/1°C
	51°C	41°C	32°C	10°C	0°C	-10°C	
0	0,007	0,007	0,006	0,005	-0,006	-0,005	0,006
0,5	0,006	0,007	0,006	0,009	-0,009	-0,007	0,0073
1,0	0,008	0,007	0,008	0,009	-0,010	-0,009	0,0085
1,5	0,008	0,008	0,008	0,014	-0,010	-0,009	0,0095
2,0	0,007	0,009	0,010	0,010	-0,010	-0,009	0,0092
2,5	0,007	0,010	0,010	0,014	-0,012	-0,013	0,0093
3,0	0,010	0,010	0,010	0,014	-0,013	-0,014	0,0113
3,5	0,010	0,010	0,012	0,014	-0,015	-0,017	0,013
3,95	0,012	0,010	0,010	0,015	-0,015	-0,016	0,013

Rezonator nr 36

TABLICA 12

Ciężar kg/cm <sup>2</sup>	Błąd temperaturowy charakterystyki częstotliwościowej w %/1°C w temperaturach otoczenia						Średnie bezpośrednie wartości błędów tem- peraturowych %/1°C
	54°C	40°C	33°C	0°C	-10°C	-15°C	
0	0,008	0,008	0,008	-0,008	-0,011	-0,011	0,009
1	0,010	0,011	0,012	-0,010	-0,009	-0,010	0,0104
2	0,011	0,011	0,012	-0,010	-0,010	-0,010	0,0107
3	0,012	0,013	0,015	-0,010	-0,012	-0,011	0,0124
4	0,014	0,014	0,014	-0,011	-0,013	-0,013	0,0132
5	0,015	0,016	0,016	-0,012	-0,014	-0,015	0,0146
6	0,016	0,016	0,016	-0,013	-0,016	-0,016	0,0159
7	0,018	0,018	0,019	-0,014	-0,016	-0,018	0,0170
8	0,018	0,019	0,018	-0,015	-0,018	-0,019	0,0178

- 27 -

18

Rezonator nr 40

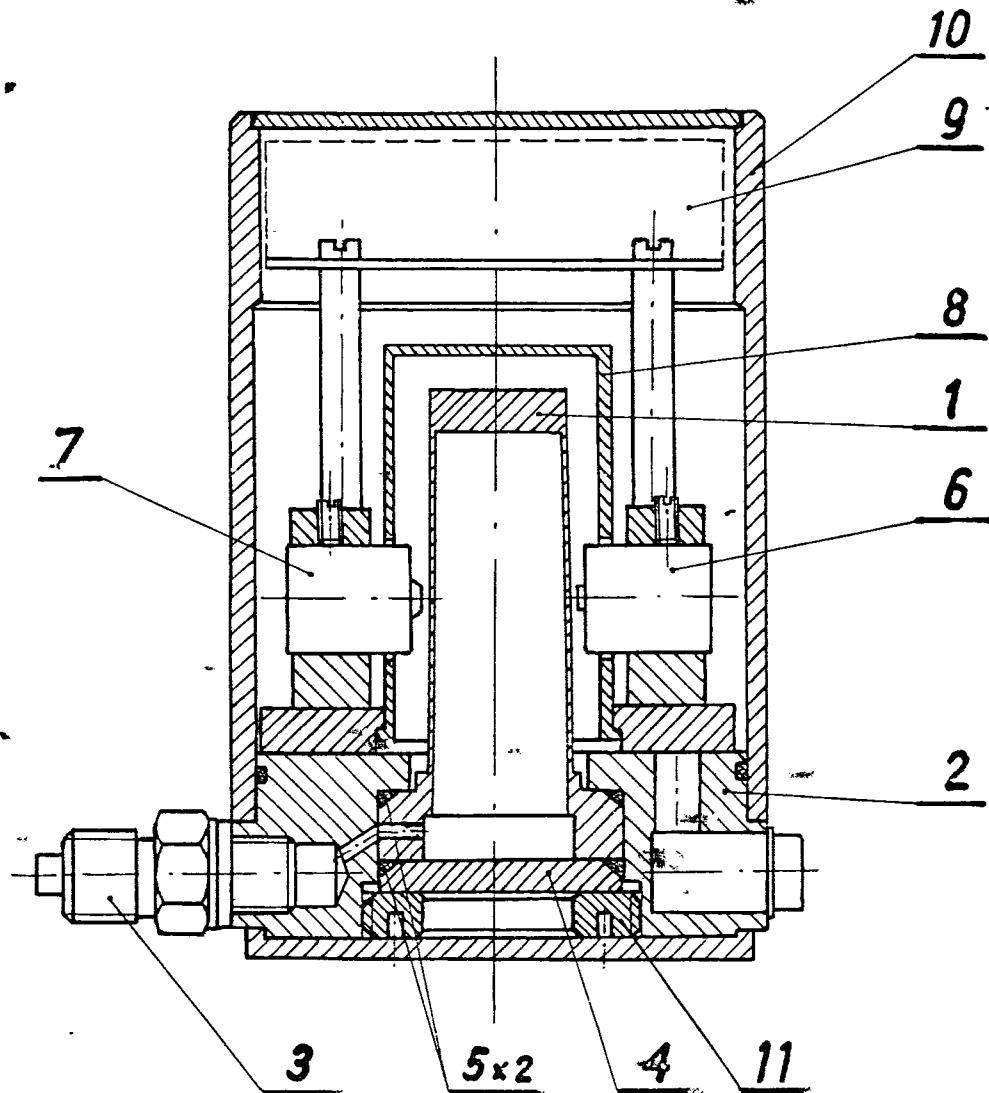
TABLICA 13

Ciśnienie kg/cm <sup>2</sup>	Błąd temperaturowy charakterystyki częstotliwościowej w %/°C w temperaturze otoczenia						Średnia szeregu jedna wartość błędu tem- peraturowego %/1°C
	54°C	40°C	33°C	0°C	-10°C		
0	0,008	0,008	0,007	-0,007	-0,008		0,0076
5	0,012	0,013	0,012	-0,013	-0,015		0,013
10	0,016	0,016	0,017	-0,018	-0,019		0,0172
15	0,019	0,021	0,024	-0,020	-0,025		0,0218
20	0,024	0,021	0,026	-0,029	-0,029		0,0258
25	0,027	0,031	0,027	-0,031	-0,034		0,030
30	0,037	0,036	0,033	-0,033	-0,036		0,035

28

29





Rys.3. Czujnik nadciśnienia

- 1-Rezonator cylindryczny, 2-korpus czujnika,  
3-króciec, 4-pierścień docisk. 5-uszczelka,  
6-cewka pobudzająca, 7-cewka odczytująca,  
8-osłona cylindra, 9-układ elektroniczny,  
10-obudowa, 11-wkręt specjalny.

b/ wersja 2 - układ wzbudzający składa się z cewki, magnesu Sm-Co /samaryt-kobaltowego/, walcowego rdzenia oraz ekranu magnetycznego. W układzie odczytującym zastosowano magnes Sm-Co. W skład jego wchodzi także cewka, odpowiednio ukształtowany rdzeń /magnetowód/ oraz ekran magnetyczny.

Układ wzbudzający i odczytujący podłączony jest do wzmacniacza zbudowanego na układach scalonych.

W badaniach opisanych w p. 3.2.1.2 stwierdzono istotny wpływ zmian temperatury otoczenia na charakterystykę częstotliwościową rezonatora. Przyjęto, że błąd temperaturowy nie powinien przekraczać wartości  $\pm 0,005\%$  zakresu pomiarowego przy zmianie temperatury otoczenia o  $1^{\circ}\text{C}$ . Wynika z tego konieczność kompensowania błędu temperaturowego.

Przy projektowaniu konstrukcji założono dwa warianty kompensacji tego błędu a mianowicie:

- a/ wariant 1 - zastosowanie układu stabilizacji temperatury rezonatora /tzw. termostatowanie/,
- b/ wariant 2 - zastosowanie w czujniku ciśnienia układu przetwornika temperatury, którego sygnał, zależny od temperatury otoczenia, przesyłany jest do miernika. Do pamięci miernika są wprowadzone dane dotyczące błędów temperaturowych rezonatora /czujnika/ wyznaczonych doświadczalnie. Miernik ma tak opracowany program, który umożliwi samoczynne wprowadzenie do wskazań poprawki temperaturowej kompensując wpływ zmian temperatury otoczenia.

Zależnie od przyjętego wariantu kompensacji błędu temperaturowego czujnik może być wyposażony w jeden z n/w układów:

- a/ element grzejny /specjalna grzałka lub tranzystor/ zapewniający utrzymanie stałej temperatury rezonatora oraz odpowiedni układ elektroniczny, sterujący,
- b/ układ przetwornika temperatury, „mierzący” temperaturę otoczenia rezonatora i przetwarzający ją w analogowy sygnał elektryczny  $0 + 5\text{ V}$  /dla zakresu temperatur  $-10^{\circ}\text{C} + 55^{\circ}\text{C}$ /.

Ze względu na brak odpowiedniego przetwornika temperatury modele czujników wykonano z układem wg wariantu 1.

Wykonano 10 szt. modeli czujników nadciśnienia z dwoma wersjami układów pobudzająco-odczytujących. W tabl. 14 zestawiono wykonane modele.

Tablica 14

Nr czujnika <sup>1/</sup>	Zakres pomiarowy kg/cm <sup>2</sup>	Wersja układu pobudzająco-odczytującego	Nr tablicy z wynikami pomiarów i obliczeń
I/17	0 + 25	1	15
II/41	0 + 6	1	16
III/16	0 + 4	1	17
IV/42	0 + 450 <sup>2/</sup>	1	18
V/2	0 + 1,7	1	-
VI/35	0 + 10	2	19
VII/37	0 + 10	2	20
IX/11	0 + 1,7	1	21
X/36	0 + 8	1	22
XI/40	0 + 30	1	23

1/ liczby arabskie oznaczają numery rezonatorów  
2/ w mm Hg

3.2.2.2. Badania modeli

Czujniki zestawione w tabl. 14 poddano następującym badaniom:

- a/ wyznaczenie charakterystyki częstotliwościowej czujników  $p = \varphi / f /$ , gdzie  $p$  - ciśnienie;  $f$  - częstotliwość,
- b/ wyznaczenie błędu temperaturowego czujników w założonych temperaturach pracy /5 + 40°C/ aparatury pomiarowej.

Wyznaczenie charakterystyki częstotliwościowej przeprowadzono trzykrotnie w temperaturze odniesienia  $20 \pm 2^{\circ}\text{C}$  dla wszystkich czujników zestawionych w tabl. 14 /z wyjątkiem czujnika nr V/2/. Do czujników doprowadzano ciśnienie powietrza ustalając jego wartości wg manometru wzorcowego i odczytywano wartości okresu /T/ drgań rezonatora w kolejnych punktach pomiarowych rozłożonych równomiernie w zakresie pomiarowym czujnika. Ze względu na większą dokładność, dokonywano odczytu okresu drgań zamiast częstotliwości drgań. Wartości okresu drgań uśredniono dla każdego punktu pomiarowego.

Opracowanie uzyskanych wyników polegające na obliczeniu współczynników algorytmu przetwarzania czujnika /wielomianu interpolującego/ i błędów przetwarzania wykonano na EMC, a wydruki danych podano w postaci tablic 15 + 29.

Algorytm przetwarzania czujnika ma postać ogólną:

$$p = d/f - f_0/4 + c/f - f_0/3 + b/f - f_0/2 + a/f - f_0/$$

gdzie: p - mierzone ciśnienie w  $\text{kg/cm}^2$  lub mmHg,  
 $f_0$  - częstotliwość odpowiadająca ciśnieniu p = 0,  
f - częstotliwość /Hz/ odpowiadająca ciśnieniu p,  
a, b, c, d - współczynniki algorytmu.

Dla każdego czujnika, w oddzielnej tablicy /wydruku/, podane są wyniki pomiarów, współczynniki algorytmu i błąd przybliżenia /jako „delta P wzg w ~~P~~”/. ~~Podany~~ W tablicy 24 zestawiono maksymalne /graniczne/ wartości błędów przybliżenia czujników.

Przemysłowy Instytut Automatyki i Pomiarów  
MERA-PIAP  
02-222 W-wa, Al. Jerozolimskie 202

0.00000000D-01 7.95186893D+03 1.25630843D+06 15995BA3  
 2.50000000D+00 8.12803938D+03 1.22907869D+06 159608B5  
 5.00000000D+00 8.29904445D+03 1.20375304D+06 1592F14B  
 7.50000000D+00 8.46526448D+03 1.18011670D+06 15900EA5  
 1.00000000D+01 8.62649767D+03 1.15805978D+06 158D5D5E  
 1.25000000D+01 8.78283904D+03 1.13744542D+06 158AD92B  
 1.50000000D+01 8.93643869D+03 1.11789499D+06 15887637  
 1.75000000D+01 9.08437660D+03 1.09969021D+06 15863D51  
 2.00000000D+01 9.22846353D+03 1.08252040D+06 158424C3  
 2.25000000D+01 9.36866444D+03 1.06632061D+06 15822A84  
 2.50000000D+01 9.50250581D+03 1.05130165D+06 1580552D  
~~17~~ gr. 02mm 0-25kG/cm<sup>2</sup> 88.12.05 22C 755mmHg

Czujnik Nr 7/77  
0 ÷ 25 kG/cm<sup>2</sup>

czestotliwosc f0 = 7.95186893D+03 dla cisnienia 0.00000000D-01

postac rownania d\*x\*\*4 + c\*x\*\*3 + b\*x\*\*2 + a\*x + 0.00000000D-01  
x=f-f0

a = 1.3903684D-02  
b = 1.5316544D-06  
c = -3.7002875D-10  
d = 1.9594031D-13

0DF87EF3  
7AE3CC46  
6DCD933E  
E1CB6CEA  
56DC9BF2

I	P	I	T	I	F	I	P	obliczone	Ideits	P	wzg	w	%I
!	0.0000D-01	!	1.257566D-04	!	7.951869D+03	!	0.000000D-01	!	0.000000D-01	!	0.000000D-01	!	!
!	2.5000D+00	!	1.230309D-04	!	8.128039D+03	!	2.495120D+00	!	-1.951907D-02	!	!	!	!
!	5.0000D+00	!	1.204958D-04	!	8.299044D+03	!	4.998993D+00	!	-4.029001D-03	!	!	!	!
!	7.5000D+00	!	1.181298D-04	!	8.465264D+03	!	7.505336D+00	!	2.134320D-02	!	!	!	!
!	1.0000D+01	!	1.159219D-04	!	8.626498D+03	!	1.000389D+01	!	1.556100D-02	!	!	!	!
!	1.2500D+01	!	1.138584D-04	!	8.782839D+03	!	1.249220D+01	!	-3.089898D-02	!	!	!	!
!	1.5000D+01	!	1.119014D-04	!	8.936439D+03	!	1.500486D+01	!	1.943517D-02	!	!	!	!
!	1.7500D+01	!	1.100791D-04	!	9.084377D+03	!	1.749533D+01	!	-1.866855D-02	!	!	!	!
!	2.0000D+01	!	1.083604D-04	!	9.228464D+03	!	1.999606D+01	!	-1.574413D-02	!	!	!	!
!	2.2500D+01	!	1.067388D-04	!	9.368664D+03	!	2.251034D+01	!	4.135751D-02	!	!	!	!
!	2.5000D+01	!	1.052354D-04	!	9.502506D+03	!	2.499558D+01	!	-1.769021D-02	!	!	!	!

Przemysłowy Instytut Automatyki i Pomiarów

PIAP

02-222 W-wa, Al. Jerozolimskie 202

0.00000000-01 7.38743943D+03 1.35229535D+06 15A5133A  
 5.00000000-01 7.50516355D+03 1.33108358D+06 15A27C5C  
 1.00000000+00 7.62091728D+03 1.31086582D+06 15A0048E  
 1.50000000+00 7.73508270D+03 1.29151819D+06 159DA7F1  
 2.00000000+00 7.84679294D+03 1.27313159D+06 159B695C  
 2.50000000+00 7.95717765D+03 1.25547027D+06 15994172  
 3.00000000+00 8.06522509D+03 1.23865111D+06 159733D8  
 3.50000000+00 8.17132323D+03 1.22256821D+06 15953D41  
 4.00000000+00 8.27582326D+03 1.20713066D+06 15935AD5  
 4.50000000+00 8.37899186D+03 1.19226754D+06 15918A5C  
 5.00000000+00 8.48041914D+03 1.17800781D+06 158FCC8E  
 5.50000000+00 8.57986135D+03 1.16435448D+06 158E2213  
 6.00000000+00 8.67770065D+03 1.15122662D+06 158C87D4

gr. 0.140 88.11.25 21C 754mHg

*czujnik Nr II / 41  
D ÷ 6 KG/cm<sup>2</sup>*

czestotliwosc f0 = 7.38743943D+03 dla cisnienia 0.00000000-01

postac rownania d\*x\*\*4 + c\*x\*\*3 + b\*x\*\*2 + a\*x + 0.00000000-01  
x=f-f0

- a = 4.2087526D-03
- b = 2.9706408D-07
- c = 3.8727029D-11
- d = -3.1093977D-15

0DE6DBB3  
 7989E993  
 6B9F7C2D  
 5EAA52C2  
 D0E00E43

I	P	I	T	I	F	I	P obliczone	Idelta P	wzg w %I
0.0000-01	1.353649D-04	7.387439D+03	0.00000000-01	0.00000000-01	0.00000000-01	0.00000000-01	0.00000000-01	0.00000000-01	
5.0000-01	1.332416D-04	7.505164D+03	4.996513D-01	5.811941D-03					
1.0000+00	1.312178D-04	7.620917D+03	9.993277D-01	-1.120514D-02					
1.5000+00	1.292811D-04	7.735083D+03	1.500628D+00	1.046859D-02					
2.0000+00	1.274406D-04	7.846793D+03	1.999603D+00	-6.622223D-03					
2.5000+00	1.256727D-04	7.957178D+03	2.501149D+00	1.915271D-02					
3.0000+00	1.239891D-04	8.065225D+03	3.000504D+00	8.393876D-03					
3.5000+00	1.223792D-04	8.171323D+03	3.499191D+00	-1.348503D-02					
4.0000+00	1.208339D-04	8.275823D+03	3.998654D+00	-2.242537D-02					
4.5000+00	1.193461D-04	8.378992D+03	4.500013D+00	2.224815D-04					
5.0000+00	1.179187D-04	8.480419D+03	5.001083D+00	1.804939D-02					
5.5000+00	1.165520D-04	8.579861D+03	5.500369D+00	6.158144D-03					
6.0000+00	1.152379D-04	8.677701D+03	5.999503D+00	-8.290268D-03					

*KG/cm<sup>2</sup>*

Przemysłowy Instytut Automatyki i Pomiarów  
 .NERA-PIAP  
 02-222 W-wa, Al. Jerozolimskie 202

0.00000000-01 6.20645012D+03 1.60961577D+06 15C47C7E  
 4.00000000-01 6.34370444D+03 1.57478963D+06 15C03C2D  
 8.00000000-01 6.47766566D+03 1.54222223D+06 15B04271  
 1.20000000+00 6.60874324D+03 1.51163385D+06 15B8868E  
 1.60000000+00 6.73693742D+03 1.48286965D+06 15B503AD  
 2.00000000+00 6.86224523D+03 1.45579175D+06 15B1B57E  
 2.40000000+00 6.98511821D+03 1.43018339D+06 15AE953B  
 2.80000000+00 7.10558328D+03 1.40593666D+06 15AB9F85  
 3.20000000+00 7.22371111D+03 1.38294567D+06 15A8D10D  
 3.60000000+00 7.33965963D+03 1.36109854D+06 15A62654  
 4.00000000+00 7.45360874D+03 1.34029037D+06 15A39C12  
 88.11.25 21C 754mHg

Czujnik Nr III / 116  
 0 ÷ 4 kg/cm<sup>2</sup>

czestotliwosc f0 = 6.20645012D+03 dla cisnienia 0.00000000-01

postac rownania d1x114 + c1x113 + b1x112 + a1x + 0.00000000-01  
 x=f-f0

a = 2.8803276D-03  
 b = 2.4958208D-07  
 c = 1.5788095D-11  
 d = -4.5669090D-15

0DC1F399  
 78BCC3E0  
 6B85FE4C  
 5D8ADF A1  
 D1A48A4D

I	P	I	T	I	F	I	P obliczone	Idelta P	wzg w %I
!	0.0000-01	!	1.611227D-04	!	6.206450D+03	!	0.0000000-01	!	0.0000000-01
!	4.0000-01	!	1.576366D-04	!	6.343704D+03	!	4.000785D-01	!	1.961320D-03
!	8.0000-01	!	1.543766D-04	!	6.477666D+03	!	7.998386D-01	!	-4.034067D-03
!	1.2000+00	!	1.513147D-04	!	6.608743D+03	!	1.200037D+00	!	9.147170D-04
!	1.6000+00	!	1.484354D-04	!	6.736937D+03	!	1.600209D+00	!	5.227633D-03
!	2.0000+00	!	1.457249D-04	!	6.862245D+03	!	1.999850D+00	!	-3.750291D-03
!	2.4000+00	!	1.431615D-04	!	6.985118D+03	!	2.399922D+00	!	-1.953042D-03
!	2.8000+00	!	1.407344D-04	!	7.105583D+03	!	2.800062D+00	!	1.545721D-03
!	3.2000+00	!	1.384330D-04	!	7.223711D+03	!	3.200047D+00	!	1.170330D-03
!	3.6000+00	!	1.362461D-04	!	7.339660D+03	!	3.599963D+00	!	-9.244735D-04
!	4.0000+00	!	1.341632D-04	!	7.453609D+03	!	4.000040D+00	!	1.058735D-04

kg/cm<sup>2</sup>

Przemyslowy Instytut Automatyki i Pomiarow  
MERA-PIAP  
02-222, W-wa, Al. Jerozolimskie 202

0.00000000D-01 5.04417945D+03 1.98050052D+06 15F1C2A4  
5.00000000D+01 5.13712529D+03 1.94466739D+06 15E0620B  
1.00000000D+02 5.22668936D+03 1.91134374D+06 15E9517D  
1.50000000D+02 5.31634937D+03 1.87910901D+06 15E5622B  
2.00000000D+02 5.40252017D+03 1.84913701D+06 15E1B98B  
2.50000000D+02 5.48898032D+03 1.82001017D+06 15DE2B51  
3.00000000D+02 5.57363892D+03 1.79236584D+06 15DACB6E  
3.50000000D+02 5.65569913D+03 1.76635987D+06 15D79EBE  
4.00000000D+02 5.73786671D+03 1.74106519D+06 15D48B49  
4.50000000D+02 5.81537014D+03 1.71786142D+06 15D1B32B

88.12.05 17C 735mHg

*Czujnik Nr IV/42  
0 ÷ 450 mm Hg  
~ (0 ÷ 0,60 kg/cm<sup>2</sup>)*

czestotliwosc f0 = 5.04417945D+03 dla cisnienia 0.00000000D-01

postac rownania d\*x\*\*4 + c\*x\*\*3 + b\*x\*\*2 + a\*x + 0.00000000D-01  
x=f-f0

a = 5.2923444D-01  
b = 1.1561328D-04  
c = -1.3966052D-07  
d = 1.0471777D-10

0D9DA16F  
00B77BEB  
73F27567  
EA95F597  
5FE646DD

I	P	I	T	I	F	I	P	obliczone	Idelta P	wzg w %I
!	0.0000D-01	!	1.982483D-04	!	5.044179D+03	!	0.000000D-01	!	0.000000D-01	!
!	5.0000D+01	!	1.9446614D-04	!	5.137125D+03	!	5.008459D+01	!	1.879757D-02	!
!	1:0000D+02	!	1.913257D-04	!	5.226689D+03	!	9.970873D+01	!	-6.472568D-02	!
!	1.5000D+02	!	1.880990D-04	!	5.316349D+03	!	1.503648D+02	!	8.106484D-02	!
!	2.0000D+02	!	1.850988D-04	!	5.402520D+03	!	1.997923D+02	!	-4.616295D-02	!
!	2.5000D+02	!	1.821832D-04	!	5.488980D+03	!	2.500863D+02	!	1.917749D-02	!
!	3.0000D+02	!	1.794160D-04	!	5.573639D+03	!	3.001181D+02	!	2.625385D-02	!
!	3.5000D+02	!	1.768128D-04	!	5.655699D+03	!	3.495779D+02	!	-9.380379D-02	!
!	4:0000D+02	!	1.742808D-04	!	5.737867D+03	!	4.003853D+02	!	8.562187D-02	!
!	4.5000D+02	!	1.719581D-04	!	5.815370D+03	!	4.498838D+02	!	-2.582744D-02	!



Tablica 19

- 0.00000000-01 7.51841259D+03 1.32873793D+06 15A2330F
  - 1.00000000+00 7.71032019D+03 1.29566604D+06 159E2990
  - 2.00000000+00 7.89765274D+03 1.26493280D+06 159A6926
  - 3.00000000+00 8.07965897D+03 1.23643832D+06 1596EE82
  - 4.00000000+00 8.25660198D+03 1.20994085D+06 1593B2A6
  - 5.00000000+00 8.42918014D+03 1.18516865D+06 1590AC85
  - 6.00000000+00 8.59769822D+03 1.16193890D+06 158DD697
  - 7.00000000+00 8.76239112D+03 1.14009976D+06 158B2C1E
  - 8.00000000+00 8.92330509D+03 1.11954034D+06 1588A9A2
  - 9.00000000+00 9.08062322D+03 1.10014475D+06 15864B86
  - 1.00000000+01 9.23457388D+03 1.08180411D+06 15840E60
- ~~1.00000000+01~~ gr. 0.164 88.10.18 20C 759mHg

Pczujnik Nr VI/35  
D: 10 kg/cm<sup>2</sup>

czestotliwosc f0 = 7.51841259D+03 dla cisnienia 0.00000000D-01

postac rownania d\*x\*\*4 + c\*x\*\*3 + b\*x\*\*2 + a\*x + 0.00000000D-01  
x=f-f0

- a = 5.1283572D-03
- b = 3.8004927D-07
- c = 1.9828664D-11
- d = -2.4139246D-15

0DEAF34C  
79A80BC7  
6BCC0992  
5DAE6A2E  
D0ADF10C

I	P	I	T	I	F	I	P obliczone	Idelta P	wzg w %I
0.0000D-01	1.330068D-04	7.518413D+03	0.000000D-01	0.000000D-01	0.000000D-01	0.000000D-01	0.000000D-01		
1.0000D+00	1.296963D-04	7.710320D+03	9.983042D-01	-1.695795D-02					
2.0000D+00	1.266199D-04	7.897653D+03	2.000570D+00	5.703686D-03					
3.0000D+00	1.237676D-04	8.079659D+03	3.001252D+00	1.252480D-02					
4.0000D+00	1.211152D-04	8.256602D+03	4.000056D+00	5.604605D-04					
5.0000D+00	1.186355D-04	8.429180D+03	4.999310D+00	-6.896198D-03					
6.0000D+00	1.163102D-04	8.597698D+03	5.999319D+00	-6.811408D-03					
7.0000D+00	1.141241D-04	8.762391D+03	7.000076D+00	7.602550D-04					
8.0000D+00	1.120661D-04	8.923305D+03	8.000481D+00	4.810550D-03					
9.0000D+00	1.101246D-04	9.080623D+03	9.000306D+00	3.059533D-03					
1.0000D+01	1.082887D-04	9.234574D+03	9.999697D+00	-3.031956D-03					

kg/cm<sup>2</sup>

Przemysłowy Instytut Automatyki i Pomiarów  
MERA-PIAP  
02-222 Warszawa, Al. Jerozolimskie 202

Tablica 20

- 0.00000000-01 7.68285187D+03 1.30029840D+06 159EBA53
  - 1.00000000+00 7.86952330D+03 1.26945428D+06 159AF672
  - 2.00000000+00 8.05125753D+03 1.24079996D+06 159776FF
  - 3.00000000+00 8.22836003D+03 1.21409369D+06 1594346D
  - 4.00000000+00 8.40101047D+03 1.18914267D+06 159128B5
  - 5.00000000+00 8.56952369D+03 1.16575907D+06 158E4DF8
  - 6.00000000+00 8.73411265D+03 1.14379106D+06 158B9F78
  - 7.00000000+00 8.89500074D+03 1.12310277D+06 158918F6
  - 8.00000000+00 9.05237068D+03 1.10357832D+06 1586B6D2
  - 9.00000000+00 9.20639071D+03 1.08511580D+06 158475DE
  - 1.00000000+01 9.35734678D+03 1.06761032D+06 158252D2
- ~~0.11~~ gr. 0.170 BB.10.18 20C 759mHg

Czujnik Nr VII / 37  
D: 10 KG/cm<sup>2</sup>

czestotliwosc f0 = 7.68285187D+03 dla cisnienia 0.00000000-01

postac rownania d\*x\*\*4 + c\*x\*\*3 + b\*x\*\*2 + a\*x + 0.00000000-01  
x=f-f0

- a = 5.2847093D-03
- b = 3.8387331D-07
- c = 1.9804797D-11
- d = -2.3540382D-15

0DF016D0  
79AD2B5A  
6BCE1725  
5DAE3470  
D0A9A056

I	P	I	T	I	F	I	P obliczone	Idelta P	wzg w ZI
!	0.00000-01	!	1.3016000-04	!	7.682852D+03	!	0.0000000-01	!	0.0000000-01
!	1.00000+00	!	1.270725D-04	!	7.869523D+03	!	1.000007D+00	!	6.732951D-05
!	2.00000+00	!	1.242042D-04	!	8.051258D+03	!	1.999964D+00	!	-3.601305D-04
!	3.00000+00	!	1.215309D-04	!	8.228360D+03	!	3.000091D+00	!	9.118755D-04
!	4.00000+00	!	1.190333D-04	!	8.401010D+03	!	3.999952D+00	!	-4.790345D-04
!	5.00000+00	!	1.166926D-04	!	8.569524D+03	!	4.999950D+00	!	-5.036684D-04
!	6.00000+00	!	1.144936D-04	!	8.734113D+03	!	5.999979D+00	!	-2.106298D-04
!	7.00000+00	!	1.124227D-04	!	8.895001D+03	!	7.000072D+00	!	7.191050D-04
!	8.00000+00	!	1.104683D-04	!	9.052371D+03	!	8.000085D+00	!	8.492300D-04
!	9.00000+00	!	1.086202D-04	!	9.206391D+03	!	8.999850D+00	!	-1.503937D-03
!	1.00000+01	!	1.068679D-04	!	9.357347D+03	!	1.000005D+01	!	5.322893D-04

KG/cm<sup>2</sup>

42

Przemysłowy Instytut Automatyki i Pomiarów  
PIAP-PIAP.  
02-222 W-wa. Al. Jerozolimskie 202

0.00000000-01 5.21524897D+03 1.91553655D+06 15E9D484  
2.00000000-01 5.33548745D+03 1.87236876D+06 15E48F86  
4.00000000-01 5.45399014D+03 1.83168648D+06 15DF9833  
6.00000000-01 5.57224443D+03 1.79281439D+06 15DAD973  
8.00000000-01 5.68496429D+03 1.75726697D+06 15D68297  
1.00000000+00 5.79557612D+03 1.72372855D+06 15D26A84  
1.20000000+00 5.90286366D+03 1.69239891D+06 15CE9777  
1.40000000+00 6.00909176D+03 1.66248085D+06 15CAF086  
1.70000000+00 6.16410702D+03 1.62067271D+06 15C5D605  
~~5.00000000+00~~ gr.0.075mm 80.11.20 20C 760mHg

czujnik nr 1X/11  
D ÷ 1,7 kg/cm<sup>2</sup>

czestotliwosc f0 = 5.21524897D+03 dla cisnienia 0.00000000-01

postac rownania d\*x\*\*4 + c\*x\*\*3 + b\*x\*\*2 + a\*x + 0.00000000-01  
x=f-f0

a = 1.6674427D-03  
b = -6.8008521D-08  
c = 3.9611050D-10  
d = -1.9677547D-13

00A2F9FD  
77DA8E17  
E9920C14  
61D9C398  
D6DB8CAB

I	P	I	F	I	F	I	P	obliczone	Idelta P	wzg w %I
!	0.00000-01	!	1.917454D-04	!	5.215249D+03	!	0.000000D-01	!	0.000000D-01	!
!	2.00000D-01	!	1.974243D-04	!	5.335487D+03	!	2.001550D-01	!	9.117064D-03	!
!	4.00000D-01	!	1.833520D-04	!	5.453990D+03	!	3.989618D-01	!	-6.107253D-02	!
!	6.00000D-01	!	1.794609D-04	!	5.572244D+03	!	6.014280D-01	!	8.400116D-02	!
!	8.00000D-01	!	1.759026D-04	!	5.684964D+03	!	7.996904D-01	!	-1.821066D-02	!
!	1.00000D+00	!	1.725454D-04	!	5.795576D+03	!	9.998568D-01	!	-8.424781D-03	!
!	1.20000D+00	!	1.694093D-04	!	5.902864D+03	!	1.199194D+00	!	-4.741466D-02	!
!	1.40000D+00	!	1.664145D-04	!	6.009092D+03	!	1.400845D+00	!	4.968686D-02	!
!	1.70000D+00	!	1.622295D-04	!	6.164107D+03	!	1.699823D+00	!	-1.043498D-02	!

Przemyslowy Instytut Automatyki i Pomiarow  
MERA-PIAP  
02-222 W-wa, Al. Jerozolimskie 202

- 0.00000000-01 7.51936801D+03 1.32856910D+06 15A22DC8
  - 1.00000000+00 7.71276432D+03 1.29525545D+06 159E1CBB
  - 2.00000000+00 7.90160916D+03 1.26429944D+06 159A555B
  - 3.00000000+00 8.08392407D+03 1.23578598D+06 1596DA4F
  - 4.00000000+00 8.26212756D+03 1.20913166D+06 1593995D
  - 5.00000000+00 8.43814209D+03 1.18390991D+06 1590852F
  - 6.00000000+00 8.60869685D+03 1.16045438D+06 158DA833
  - 7.00000000+00 8.77396169D+03 1.13859626D+06 158AFD22
  - 8.00000000+00 8.93568807D+03 1.11798889D+06 15887927
- ~~1.00000000+00~~ gr. 0.168mm 88.11.20 18C 753mHg

Czujnik Nr  $\bar{x}$  / 36  
 $D \div 8 \text{ kg/cm}^2$

czestotliwosc  $f_0 = 7.51936801D+03$  dla cisnienia 0.00000000-01

postac rownania  $d \cdot x^4 + c \cdot x^3 + b \cdot x^2 + a \cdot x + 0.00000000-01$   
 $x = f - f_0$

- a = 5.0658885D-03
- b = 5.2094426D-07
- c = -1.9345858D-10
- d = 8.2151859D-14

0DEAFAF1  
79A5FFC0  
6C8BD704  
E0D4B5C0  
5588FD52

I	P	I	T	I	F	I	P obliczone	Idelta P	wzg w XI
! 0.0000-01	! 1.329899D-04	! 7.519368D+03	! 0.000000-01	! 0.000000-01	! 0.000000-01	! 0.000000-01	! 0.000000-01	! 0.000000-01	! 0.000000-01
! 1.0000+00	! 1.296552D-04	! 7.712764D+03	! 9.979241D-01	! -2.594887D-02	! -2.594887D-02	! 9.979241D-01	! -2.594887D-02	! -2.594887D-02	! -2.594887D-02
! 2.0000+00	! 1.265565D-04	! 7.901609D+03	! 2.003455D+00	! 4.318348D-02	! 4.318348D-02	! 2.003455D+00	! 4.318348D-02	! 4.318348D-02	! 4.318348D-02
! 3.0000+00	! 1.237023D-04	! 8.083924D+03	! 2.999550D+00	! -5.622910D-03	! -5.622910D-03	! 2.999550D+00	! -5.622910D-03	! -5.622910D-03	! -5.622910D-03
! 4.0000+00	! 1.210342D-04	! 8.262128D+03	! 3.995867D+00	! -5.165743D-02	! -5.165743D-02	! 3.995867D+00	! -5.165743D-02	! -5.165743D-02	! -5.165743D-02
! 5.0000+00	! 1.185095D-04	! 8.438142D+03	! 5.002657D+00	! 3.321767D-02	! 3.321767D-02	! 5.002657D+00	! 3.321767D-02	! 3.321767D-02	! 3.321767D-02
! 6.0000+00	! 1.161616D-04	! 8.608697D+03	! 6.002197D+00	! 2.746316D-02	! 2.746316D-02	! 6.002197D+00	! 2.746316D-02	! 2.746316D-02	! 2.746316D-02
! 7.0000+00	! 1.139736D-04	! 8.773962D+03	! 6.997101D+00	! -3.623151D-02	! -3.623151D-02	! 6.997101D+00	! -3.623151D-02	! -3.623151D-02	! -3.623151D-02
! 8.0000+00	! 1.119108D-04	! 8.935688D+03	! 8.000052D+00	! 1.064398D-02	! 1.064398D-02	! 8.000052D+00	! 1.064398D-02	! 1.064398D-02	! 1.064398D-02

Przemyslowy Instytut Automatyki i Pomiarow  
MERA-PIAP -  
02-222 W-wa, Al. Jerzozolinskie 202

0.00000000-01 1.06720169D+04 9.36092970D+05 14E489CF  
5.00000000+00 1.10743933D+04 9.02081016D+05 14DC3C10  
1.00000000+01 1.14602935D+04 8.71705422D+05 14D4D196  
1.50000000+01 1.18318691D+04 8.44329825D+05 14CE229D  
2.00000000+01 1.21848391D+04 8.19871300D+05 14C829F4  
2.50000000+01 1.25226190D+04 7.97756445D+05 14C2C3C7  
3.00000000+01 1.28462382D+04 7.77659562D+05 14BDD8B8  
~~-----~~ gr.0.249mm 88.11.20 20C 760mHg

Czujnik Nr XI/40  
0 ÷ 30 kg/cm<sup>2</sup>

czestotliwosc f0 = 1.06720169D+04 dla cisnienia 0.00000000D-01  
postac rownania d\*x\*\*4 + c\*x\*\*3 + b\*x\*\*2 + a\*x + 0.00000000D-01  
x=f-f0

a = 1.2245028D-02  
b = 4.0801051D-07  
c = 1.9083604D-10  
d = -2.2950926D-14

0EA6C011  
7AC89F5E  
6BDB0C89  
60D1D391  
D3CEB93B

I	P	I	I	I	F	I	P obliczone	Idelta P wzg w %I
! 0.0000D-01 !	9.370300D-05 !	1.067202D+04 !	0.000000D-01 !	0.000000D-01 !	0.000000D-01 !	0.000000D-01 !	0.000000D-01 !	0.000000D-01 !
! 5.0000D+00 !	9.029840D-05 !	1.107439D+04 !	5.005001D+00 !	1.667124D-02 !	1.667124D-02 !	1.667124D-02 !	1.667124D-02 !	1.667124D-02 !
! 1.0000D+01 !	8.725780D-05 !	1.146029D+04 !	9.990612D+00 !	-3.129175D-02 !	-3.129175D-02 !	-3.129175D-02 !	-3.129175D-02 !	-3.129175D-02 !
! 1.5000D+01 !	8.451750D-05 !	1.183187D+04 !	1.500753D+01 !	2.509689D-02 !	2.509689D-02 !	2.509689D-02 !	2.509689D-02 !	2.509689D-02 !
! 2.0000D+01 !	8.206920D-05 !	1.218484D+04 !	1.999885D+01 !	-3.822166D-03 !	-3.822166D-03 !	-3.822166D-03 !	-3.822166D-03 !	-3.822166D-03 !
! 2.5000D+01 !	7.985550D-05 !	1.252262D+04 !	2.499830D+01 !	-5.680213D-03 !	-5.680213D-03 !	-5.680213D-03 !	-5.680213D-03 !	-5.680213D-03 !
! 3.0000D+01 !	7.784380D-05 !	1.284624D+04 !	3.000071D+01 !	2.365826D-03 !	2.365826D-03 !	2.365826D-03 !	2.365826D-03 !	2.365826D-03 !

Tablica 24

Nr czujnika	Zakres pomiarowy kG/cm <sup>2</sup>	Maksymalne graniczne wartości błędu przybliżenia w % zakr. pomiarowego	
I/17	0 + 25	-0,031	+0,041
II/41	0 + 6	-0,022	+0,019
III/16	0 + 4	-0,004	+0,005
IV/42	0 + 450 <sup>1/</sup> /0+0,6/	-0,094	+0,086
VI/35	0 + 10	-0,017	+0,013
VII/37	0 + 10	-0,0015	+0,0009
IX/11	0 + 1,7	-0,061	+0,084
X/36	0 + 8	-0,052	+0,043
XI/40	0 + 30	-0,031	+0,025
1/ w mm Hg			

Z przytoczonych wartości wynika, że większość modeli czujników ma błędy przybliżenia poniżej 0,05%. Jedynie w czujnikach IV/42 i IX/11 wartości maksymalne błędów są powyżej 0,05% nie przekraczając wartości 0,1%.

Wyznaczenie błędu temperaturowego przeprowadzono w trakcie badań dwóch czujników o nr nr VI/35 i VII/37.

Czujniki te wyposażone są w układ stabilizacji temperatury rezonatora. Badania przeprowadzono w temperaturach otoczenia 1°C i 40°C oraz w temp. odniesienia 20°C, wyznaczając charakterystyki częstotliwościowe czujników dla dwóch przypadków gdy:

- a/ układ stabilizacji temperatury nie działa /wyłączony/,
- b/ układ stabilizacji temperatury działa /włączony/.

Wyniki obliczeń błędu temperaturowego charakterystyki w % zakresu pomiarowego na 1°C zmiany temperatury otoczenia podano w tablicy 25.

Tablica 25

Ciężnienie $\frac{1}{6}/\text{cm}^2$	Błąd temperaturowy charakterystyki częstotliwościowej czujnika w temperaturze otoczenia							
	Czujnik nr VI/35				Czujnik nr VII/37			
	10°C	40°C	10°C	40°C	10°C	40°C	10°C	40°C
0	-0,0090	0,0081	-0,0045	0,0075	-0,0099	0,0069	-0,0044	0,0071
1	-0,0112	0,0073	-0,0025	0,0086	-0,0123	0,0084	-0,0041	0,0083
2	-0,0143	0,0080	-0,0039	0,0076	-0,0139	0,0104	-0,0059	0,0091
3	-0,0157	0,0099	-0,0065	0,0093	-0,0161	0,0107	-0,0067	0,0102
4	-0,0171	0,0119	-0,0068	0,0117	-0,0167	0,0119	-0,0073	0,0107
5	-0,0178	0,0129	-0,0073	0,0115	-0,0200	0,0131	-0,0079	0,0118
6	-0,0203	0,0138	-0,0081	0,0120	-0,0214	0,0144	-0,0087	0,0112
7	-0,0218	0,0150	-0,0084	0,0124	-0,0233	0,0155	-0,0092	0,0129
8	-0,0236	0,0161	-0,0107	0,0131	-0,0247	0,0166	-0,0100	0,0131
9	-0,0258	0,0173	-0,0098	0,0142	-0,0269	0,0178	-0,0107	0,0142
10	-0,0278	0,0182	-0,0108	0,0145	-0,0290	0,0189	-0,0114	0,0145
	bez termostatowania		z termostatowaniem		bez termostatowania		z termostatowaniem	

17

Z wyników podanych w w/w tablicy wynika, że błędy temperaturowe w % charakterystyki czujnika przeliczone na  $1^{\circ}\text{C}$  zmiany temperatury otoczenia zawierają się w granicach:

- a/ przy wyłączonym termostataowaniu w temperaturze  $1^{\circ}\text{C}$ 
  - od  $-0,009$  do  $-0,0278\%/1^{\circ}\text{C}$  - dla czujnika nr VI/35,
  - od  $-0,0099$  do  $-0,0290\%/1^{\circ}\text{C}$  - dla czujnika nr VII/37,
- b/ przy działającym układzie termostataowania w temperaturze  $1^{\circ}\text{C}$ 
  - od  $-0,0045$  do  $-0,0108\%/1^{\circ}\text{C}$  - dla czujnika nr VI/35,
  - od  $-0,0044$  do  $-0,0114\%/1^{\circ}\text{C}$  - dla czujnika nr VII/37,
- c/ przy wyłączonym termostataowaniu w temperaturze  $40^{\circ}\text{C}$ 
  - od  $0,0081$  do  $0,0182\%/1^{\circ}\text{C}$  - dla czujnika nr VII/35,
  - od  $0,0069$  do  $0,0189\%/1^{\circ}\text{C}$  - dla czujnika nr VI/37,
- d/ przy działającym termostataowaniu w temperaturze  $40^{\circ}\text{C}$ 
  - od  $0,0075$  do  $0,0145\%/1^{\circ}\text{C}$  - dla czujnika nr VI/35,
  - od  $0,0071$  do  $0,0145\%/1^{\circ}\text{C}$  - dla czujnika nr VII/35.

Z przytoczonych wartości wynika, że błędy temperaturowe dla obydwu czujników o tym samym zakresie pomiarowym osiągnęły wartości zbliżone do siebie przy zachowaniu tych samych warunków termostataowania i temperatury otoczenia. Termostataowanie w temperaturze otoczenia  $1^{\circ}\text{C}$  spowodowało średnio  $2 + 2,5$ -krotne zmniejszenie błędów temperaturowych. Natomiast w temperaturze otoczenia  $40^{\circ}\text{C}$  błędy temperaturowe osiągnęły wartości zbliżone do siebie, niezależnie od tego, w jakich warunkach /z termostataowaniem czy bez/ zostały wyznaczone.

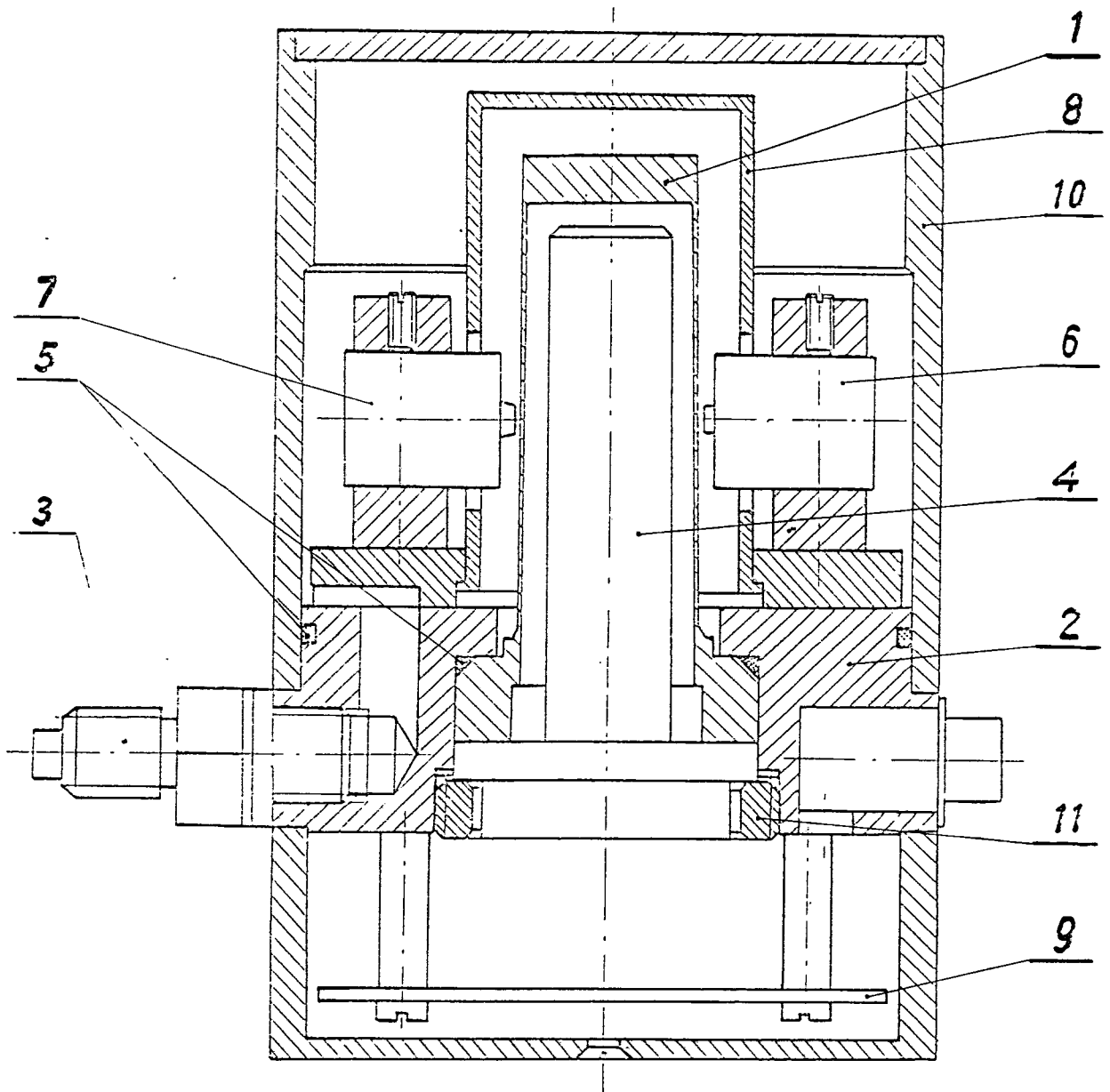
### 3.2.3. Czujnik podciśnienia

3.2.3.1. Budowa modelu. Ogólny opis budowy i zasady działania czujnika ciśnienia podany w p. 2.3.2 jest aktualny również dla czujnika podciśnienia.

Dla czujnika podciśnienia przestrzeń wewnętrzna rezonatora jest połączona z atmosferą, natomiast przestrzeń zewnętrzna rezonatora ze źródłem mierzonego podciśnienia. Wynikają stąd, w porównaniu z czujnikiem nadciśnienia, różnice w konstrukcji czujnika podciśnienia.

Opracowaną konstrukcję modelowego czujnika podciśnienia pokazano na rys. 4.





Rys. 4. Czujnik podciśnienia

1 - rezonator cylindryczny, 2 - korpus czujnika, 3 - króciec,  
4 - element grzejny, 5 - uszczelki, 6 - cewka pobudzająca,  
7 - cewka odczytująca, 8 - osłona cylindra, 9 - układ  
elektroniczny, 10 - obudowa, 11 - wkręt specjalny.

Czujnik podciśnienia składa się z rezonatora cylindrycznego 1 przymocowanego do korpusu 2 przy pomocy wkręta specjalnego 11. W korpusie znajduje się króciec 3 do doprowadzenia mierzonego podciśnienia do przestrzeni zewnętrznej rezonatora. Dla zapewnienia szczelności, pomiędzy rezonatorem i korpusem oraz między korpusem i obudową 10, znajdują się uszczelki /pierścienie uszczelniające/ 5. Osłona cylindra 8 zabezpiecza powłokę rezonatora przed jej uszkodzeniem. Na zewnątrz rezonatora umieszczone są cewki układów: pobudzającego 6 i odczytującego 7 drgania rezonatora. Wewnątrz rezonatora umieszczony jest element grzejny 4 układu stabilizacji temperatury rezonatora. Układ elektroniczny 9 ze wzmacniaczem umieszczony jest pod korpusem.

W opisanej konstrukcji modelu czujnika podciśnienia, do pobudzania i odczytywania częstotliwości drgań rezonatora zastosowano układ elektromagnetyczny opisany jako wersja 2 w p. 3.2.3.1. Dla kompensacji błędu temperaturowego przyjęto rozwiązanie wg wariantu 1 opisanego w p. 3.2.3.1, z zastosowaniem elementu grzejnego umieszczonego wewnątrz rezonatora.

### 3.2.3.2. Badania modeli

Czujnik podciśnienia o nr VIII/10 poddano następującym sprawdzeniom:

- a/ wyznaczenie charakterystyki częstotliwościowej czujnika  $p = \zeta / f /$ , gdzie  $p$  - ciśnienie,  $f$  - częstotliwość,
- b/ wyznaczenie błędu temperaturowego czujnika w założonych temperaturach pracy  $/5 + 40^{\circ}\text{C}/$  aparatury pomiarowej.

Wyznaczenie charakterystyki częstotliwościowej przeprowadzono trzykrotnie w temperaturze odniesienia  $22^{\circ}\text{C}$  odczytując wartości okresu  $/T/$  drgań rezonatora w kolejnych punktach pomiarowych rozłożonych równomiernie w zakresie pomiarowym czujnika. Zakres pomiarowy czujnika ustalono na  $-745 \text{ mm Hg} + 0$   $/-0,98 \text{ kG/cm}^2 + 0; -0,0993 \text{ MPa} + 0/$ . Wartości okresu drgań uśredniono dla każdego punktu pomiarowego.

Opracowanie uzyskanych wyników polegało na obliczeniu współczynników algorytmu czujnika /wielomianu interpolującego/ i obliczeniu błędów przetwarzania. Obliczenia wykonano na EMC a wydruki danych przedstawiono w postaci tablicy 26. Postać algorytmu przetwarzania omówiono w p. 3.2.3.2. W tablicy 26 podane są wyniki pomiarów, współczynniki algorytmu i błąd przybliżenia /jako „delta P wżg w %”/. Z wartości błędów przybliżenia podanych w tej tablicy wynika, że maksymalne graniczne wartości to  $-0,080\%$  i  $+0,064\%$  zakresu pomiarowego. Wymienione wartości wystąpiły jednokrotnie; w pozostałych punktach pomiarowych wartości błędów nie przekraczają wartości  $0,026\%$ .

Wyznaczenie błędu temperaturowego przeprowadzono w temperaturach otoczenia  $5^{\circ}\text{C}$  i  $40^{\circ}\text{C}$  oraz w temperaturze odniesienia wyznaczając charakterystyki częstotliwościowe czujników dla dwóch przypadków, gdy:

- a/ układ stabilizacji temperatury nie działa /wyłączony/,
- b/ układ stabilizacji temperatury działa /włączony/.

Wyniki obliczeń błędu temperaturowego charakterystyki w % zakresu pomiarowego na  $1^{\circ}\text{C}$  zmiany temperatury otoczenia podano w tablicy 27. *tej*

Z wyników podanych w *tej* tablicy wynika, że błąd temperaturowy w % charakterystyki czujnika przeliczony na  $1^{\circ}\text{C}$  zmiany temperatury otoczenia zawiera się w granicach:

- a/ przy wyłączonym termostataowaniu:
  - od  $-0,0128$  do  $-0,0185\%/1^{\circ}\text{C}$  - w temperaturze  $5^{\circ}\text{C}$
  - od  $0,0093$  do  $0,0189\%/1^{\circ}\text{C}$  - w temperaturze  $40^{\circ}\text{C}$
- b/ przy włączonym układzie termostataowania:
  - od  $-0,0090$  do  $-0,0170\%/1^{\circ}\text{C}$  - w temperaturze  $5^{\circ}\text{C}$
  - od  $0,0118$  do  $0,0197\%/1^{\circ}\text{C}$  - w temperaturze  $40^{\circ}\text{C}$ .

Z przytoczonych wartości wynika, że błędy temperaturowe osiągnęły wartości zbliżone, zarówno z działającym jak i wyłączonym układem stabilizacji temperatury.

Przemysłowy Instytut Automatyki i Pomiarów  
MERA-PIAP  
02-222 M-wa, Al. Jerozolimskie 202

- 0.00000000-01 5.09417344D+03 1.96106397D+06 15EF633F
  - 5.00000000+01 5.14335296D+03 1.94231274D+06 15ED1945
  - 1.00000000+02 5.19211339D+03 1.92407200D+06 15EADF40
  - 1.50000000+02 5.24060674D+03 1.90626782D+06 15E8B2DE
  - 2.00000000+02 5.28837709D+03 1.88904006D+06 15E698C0
  - 2.50000000+02 5.33547321D+03 1.87237375D+06 15E40FAE
  - 3.00000000+02 5.38366703D+03 1.85561253D+06 15E203E4
  - 3.50000000+02 5.43017876D+03 1.83971844D+06 15E09333
  - 4.00000000+02 5.47625332D+03 1.82423993D+06 15DEAF7F
  - 4.50000000+02 5.52237223D+03 1.80900518D+06 15DCD369
  - 5.00000000+02 5.56794733D+03 1.79419801D+06 15DB04B0
  - 5.50000000+02 5.61337015D+03 1.77967954D+06 15D93EFC
  - 6.00000000+02 5.65814399D+03 1.76559664D+06 15D706E5
  - 6.50000000+02 5.70285068D+03 1.75175549D+06 15D5D65B
  - 7.00000000+02 5.74715206D+03 1.73825201D+06 15D43060
  - 7.45000000+02 5.78676243D+03 1.72635392D+06 15D20C8F
- C: podcis. gr. 0.068. 08.11.20 21C: 759mmHg

Czujnik podciśnienia  
Nr VIII / 10

- 745 mmHg ÷ 0

czestotliwosc f0 = 5.09417344D+03 dla cisnienia 0.00000000-01

postac rownania d\*x\*\*4 + c\*x\*\*3 + b\*x\*\*2 + a\*x + 0.00000000-01  
x=f-f0

- a = 1.0139741D+00
- b = 7.1595227D-05
- c = 4.8344187D-08
- d = -3.3384354D-11

0D9F3163  
0181C9E7  
73962565  
68CFA2FE  
DE92D370

I	P	I	T	I	F	I	P obliczone	ldelta P	wz w %I
! 0.0000-01 !	1.963027D-04 !	5.094173D+03 !	0.000000D-01 !	0.000000D-01 !	0.000000D-01 !	0.000000D-01 !	0.000000D-01 !		
! 5.0000+01 !	1.944257D-04 !	5.143353D+03 !	5.004540D+01 !	6.104830D-03 !					
! 1.0000+02 !	1.925998D-04 !	5.192113D+03 !	1.000377D+02 !	5.057136D-03 !					
! 1.5000+02 !	1.908176D-04 !	5.240607D+03 !	1.501512D+02 !	2.029721D-02 !					
! 2.0000+02 !	1.890939D-04 !	5.288378D+03 !	1.999251D+02 !	-1.004927D-02 !					
! 2.5000+02 !	1.874248D-04 !	5.335473D+03 !	2.494064D+02 !	-7.967229D-02 !					
! 3.0000+02 !	1.857470D-04 !	5.383667D+03 !	3.004776D+02 !	6.410404D-02 !					
! 3.5000+02 !	1.841560D-04 !	5.430179D+03 !	3.501922D+02 !	2.579403D-02 !					
! 4.0000+02 !	1.826066D-04 !	5.476253D+03 !	3.998560D+02 !	-1.932889D-02 !					
! 4.5000+02 !	1.810816D-04 !	5.522372D+03 !	4.499830D+02 !	-2.277643D-03 !					
! 5.0000+02 !	1.795994D-04 !	5.567947D+03 !	4.999240D+02 !	-1.020778D-02 !					
! 5.5000+02 !	1.781461D-04 !	5.613370D+03 !	5.500918D+02 !	1.232674D-02 !					
! 6.0000+02 !	1.767364D-04 !	5.658144D+03 !	5.999179D+02 !	-1.102007D-02 !					
! 6.5000+02 !	1.753509D-04 !	5.702851D+03 !	6.500277D+02 !	3.721929D-03 !					
! 7.0000+02 !	1.739992D-04 !	5.747153D+03 !	7.000217D+02 !	2.917543D-03 !					
! 7.4500+02 !	1.728082D-04 !	5.786762D+03 !	7.449895D+02 !	-1.407403D-03 !					

mm Hg

TABLICA 27

Ciśnienie mm Hg	Błąd temperaturowy charakterystyki częstotliwościowej czujnika w $\% / 1^{\circ}\text{C}$ w temperaturze otoczenia							
	Czujnik Nr VIII/10				Czujnik Nr			
	5 $^{\circ}\text{C}$	40 $^{\circ}\text{C}$	5 $^{\circ}\text{C}$	40 $^{\circ}\text{C}$	1 $^{\circ}\text{C}$	40 $^{\circ}\text{C}$	1 $^{\circ}\text{C}$	40 $^{\circ}\text{C}$
0	-0,0185	0,0189	-0,0167	0,0197				
-100	-0,0136	0,0177	-0,0157	0,0180				
-200	-0,0176	0,0162	-0,0146	0,0164				
-300	-0,0147	0,0138	-0,0090	0,0149				
-400	-0,0139	0,0135 <sup>145</sup>	-0,0170	0,0165				
-500	-0,0136	0,0125	-0,0126	0,0118				
-600	-0,0134	0,0115	-0,0124	0,0132				
-700	-0,0128	0,0105	-0,0113	0,0120				
-740	-0,0146	0,0093	-0,0109	0,0118				
	bez termostatowania		z termostatowaniem					

-04-

### 3.2.4. Wnioski z badań rezonatorów cylindrycznych i czujników ciśnienia z rezonatorami cylindrycznymi

1. Stwierdzono poprawność pracy większości /33 szt/ spośród 42 szt. wykonanych rezonatorów, tzn. zostały podtrzymane drgania rezonatorów przy obciążaniu ich ciśnieniami przy czym uzyskano około 20-procentową /zakładaną/ zmianę częstotliwości początkowej.
2. Badania temperaturowe rezonatorów, wykonanych z elinwaru tytanowego wykazały, że materiał ten nie jest wystarczająco skompensowany termicznie, przez co nie ma autokompensacji. Stwarza to konieczność wprowadzenia dodatkowych urządzeń do kompensacji wpływu zmian temperatury otoczenia dla wyeliminowania tego wpływu względnie zmniejszenia wartości błędów temperaturowych do wartości  $\pm 0,005\%/1^{\circ}\text{C}$  przyjętej jako dopuszczalną w stosunku do zakładanej dokładności pomiaru ciśnienia.
3. Na podstawie wyników badań 10 szt. modeli czujników ciśnienia /nadciśnienia i podciśnienia/ stwierdza się możliwość uzyskania założonego typoszeregu zakresów pomiarowych oraz zakładanej dokładności pomiarów lepszej lub równej  $\pm 0,1\%$ .
4. Układ stabilizacji temperaturowej /termostatowanie/ oparty na tranzystorze jako elemencie grzejnym okazał się nieskuteczny. Zastosowany tranzystor grzeje dosyć intensywnie ale na małej powierzchni i równomierne rozprowadzenie ciepła w całej przestrzeni otaczającej rezonator jest niepewne. Ponadto intensywność grzania jednego tranzystora może być niewystarczająca.  
/ Przewiduje się dalsze próby polegające na zwiększeniu pojemności cieplnej <sup>całkowity rezonator</sup> i znalezieniu takiego miejsca usytuowania tranzystora, w którym będzie najbardziej optymalny rozkład temperatury.

W przypadku nieuzyskania pożądaných rezultatów zostanie zastosowana specjalna grzałka w kształcie wysokiego pierścienia otaczająca znaczną część rezonatora cylindrycznego.

4. Model miernika cyfrowego mikroprocesorowego do współpracy z rezonatorowymi czujnikami ciśnienia

4.1. Opracowanie i wykonanie modeli miernika

Jak wspomniano w p. 2.2, aparatura pomiarowa składać się będzie z czujników rezonatorowych ciśnienia oraz współpracującego z nimi mikroprocesorowego miernika cyfrowego. Głównym zadaniem miernika jest przetworzenie częstotliwościowego sygnału wyjściowego czujnika rezonatorowego we wskazanie cyfrowe mierzonego ciśnienia w jednostkach ciśnienia. Modele miernika mikroprocesorowego /w dwóch wersjach/ zostały opracowane i wykonane przy współpracy z Ośrodkiem Inicjatyw Wdrożeniowych i Produkcyjnych POLTECH w Warszawie. W oparciu o wymagania konstrukcyjne i funkcyjne dla w/w mierników zostały wykonane poniższe prace:

- a/ opracowanie dokumentacji konstrukcyjnej części mechanicznej mierników oraz głównych zespołów części elektronicznej,
- b/ opracowanie algorytmów oprogramowania oraz analizy błędów przyjętego modelu matematycznego,
- c/ opracowanie oprogramowania,
- d/ montaż, uruchomienie i testowanie modeli mierników.

Wyżej wymienione dwie wersje modeli miernika różnią się między sobą przeznaczeniem a w związku z tym możliwościami wykonywanych funkcji oraz budową /wyposażeniem/. Poniżej podano krótką charakterystykę obydwu wersji.

Przyjęto, że wersja I /uproszczona/ miernika cyfrowego będzie przeznaczona do dokładnych pomiarów ciśnienia /podciśnienia i nadciśnienia/, różnicy ciśnień i stosunku ciśnień. Pomiar różnicy i stosunku ciśnień będzie realizowany dwoma rezonatorowymi czujnikami. Wynik pomiaru będzie wyświetlany na jednym polu odczytowym. Miernik może być opcjonalnie wyposażony w jeden z dwóch interfejsów do współpracy z drukarką albo komputerem lub w przetwornik c/a. Konstrukcja miernika nie posiada elementów umożliwiających wprowadzenie do pamięci miernika przez użytkownika danych charakterystycznych czuj-

nika rezonatorowego. Dane te wprowadza wytwórca w procesie produkcyjnym, lub odpowiedni serwis w przypadku wymiany czujnika. Miernik może współpracować z sześcioma czujnikami rezonatorowymi.

Wersja II /laboratoryjna/ miernika poza dokładnymi pomiarami ciśnienia, różnicy ciśnień i stosunku ciśnień /jak w wersji I/ będzie umożliwiać sprawdzanie czujników, przetworników i mierników ciśnienia oraz obliczanie błędu względnego sprawdzanego przyrządu a ponadto wzorcowania czujników rezonatorowych ciśnienia. Miernik może być opcjonalnie wyposażony w interfejs do drukarki lub komputera oraz dokładny przetwornik a/c /wykorzystywany przy liczeniu błędów względnych/. Wyniki pomiarów i obliczeń wyświetlane będą na dwóch polach odczytowych. Miernik może współpracować z ośmioma czujnikami rezonatorowymi. Do miernika tej wersji użytkownik może sam wprowadzać dane charakterystyczne czujników niezbędne do pomiaru ciśnienia lub sprawdzania czujników, przetworników i mierników ciśnienia.

Szczegółowe dane, zawierające funkcje wykonywane przez miernik, wymagania konstrukcyjne i metrologiczne oraz wizualizację, przedstawiono w załączniku nr 1 - dla wersji I /uproszczonej/, w załączniku nr 2 - dla wersji II /laboratoryjnej/.

Analizę błędów przyjętego modelu matematycznego rezonatorowego miernika ciśnienia RMC przedstawiono w załączniku nr 3.

Schemat blokowy i charakterystykę przyjętego rozwiązania miernika cyfrowego do współpracy z czujnikami rezonatorowymi przedstawiono w załączniku nr 4.

#### 4.2. Badania modeli miernika

Modele mikroprocesorowego miernika ciśnienia ~~są~~ w wersji I i II są przystosowane do współpracy z rezonatorowymi czujnikami ciśnienia.

Sygnal wyjściowy z rezonatorowego czujnika ciśnienia spełnia następujące wymagania:

- amplituda sygnału od 1 do 12 V,
- zakres częstotliwości sygnału od 2 do 20 kHz,
- kształt przebiegu jest zbliżony do fali prostokątnej,
- amplituda zakłóceń nie przekracza poziomu 1 V,
- czas narastania i opadania sygnału nie przekracza 50% okresu sygnału.



Takie same warunki są narzucone na sygnał wejściowy dla układu pomiarowego miernika.

W trakcie badań stwierdzono, że częstotliwość sygnału generowanego przez czujnik jest zgodna z częstotliwością mierzoną przez układ pomiarowy modeli mierników. Nie został wykryty przypadek gubienia lub doliczania dodatkowych impulsów.

Modele mikroprocesorowego miernika ciśnienia w wersji I i II są przystosowane do pracy w zakresie temperatur od  $+5^{\circ}\text{C}$  do  $+40^{\circ}\text{C}$ . Badania temperaturowe zostały przeprowadzone w układzie symulującym współpracę mierników z czujnikami rezonatorowymi. Sygnałem mierzonym był sygnał ze stabilnego generatora typu PFL28A. Błąd względny częstotliwości generatora wzorcowego nie przekraczał wartości  $\pm 2 \cdot 10^{-7}$ , natomiast błąd względny wartości ciśnienia nie przekraczał poziomu  $\pm 1 \cdot 10^{-5}$ .

W wersji I modelu mikroprocesorowego miernika ciśnienia sprawdzono realizowanie następujących funkcji i pomiarów:

- pomiar nadciśnienia,
- pomiar podciśnienia,
- pomiar różnicy ciśnień,
- pomiar stosunku ciśnień,
- pomiar wartości ciśnienia wg dwóch algorytmów,
- pomiar ciśnienia w różnych jednostkach /hPa, kPa, MPa,  $\text{kg}/\text{mm}^2$ /,
- pomiar częstotliwości sygnału wejściowego,
- pomiar okresu sygnału wejściowego,
- pomiar sekwencyjny ciśnienia,
- sygnalizacja przekroczenia zakresu pomiarowego,
- sygnalizacja braku napięcia zasilania,
- sygnalizacja braku sygnału wejściowego,
- sygnalizacja nieprzewidkowo wybranej funkcji,
- współpracę z drukarką,
- współpracę z rejestratorem analogowym.

W wersji II modelu mikroprocesorowego miernika ciśnienia sprawdzono realizowanie następujących funkcji i pomiarów:

- pomiar nadciśnienia,
- pomiar podciśnienia,
- pomiar różnicy ciśnień,

- pomiar stosunku ciśnień,
- obliczenie błędu względnego dla:
  - czujnika zewnętrznego,
  - czujnika rezonatorowego,
  - czujnika z wyjściem analogowym,
- pomiar wartości ciśnienia wg jednego z dwóch algorytmów,
- pomiar ciśnienia w różnych jednostkach /hPa, kPa, MPa, bar,  $\text{kg/cm}^2$ , psi/,
- pomiar częstotliwości sygnału wejściowego,
- pomiar okresu sygnału wejściowego,
- pomiar sekwencyjny ciśnienia,
- wzorcowanie rezonatorowych czujników,
- pomiar ciśnienia czujnikami o wyjściowym sygnale analogowym /0 - 20 mA, 4 - 20 mA, 0 - 5 V/,
- sygnalizacja przekroczenia zakresu pomiarowego,
- sygnalizacja braku napięcia zasilania,
- sygnalizacja braku xxx sygnału wejściowego,
- sygnalizacja nieprawidłowo wybranej funkcji,
- sygnalizacja wystąpienia błędu wprowadzonych danych,
- współpracę z drukarką.

W wersji I i II modelu miernika sprawdzono działanie sześciu lub ośmiu /zależnie od wersji/ niezależnych kanałów wejściowych, umożliwiających wykonywanie pomiarów w dowolnej kombinacji. Dotyczy to pomiaru stosunku i różnicy ciśnień. Dla obydwu modeli mierników przeprowadzono badania symulacyjne kompensacji wpływu temperatury i ciśnienia barometrycznego. Jako zadajnik zastosowano regulowane źródło napięcia stałego od 0 do 5 V. W trakcie próby stwierdzono poprawne działanie układów kompensujących. Wartość zmian skompensowanej częstotliwości była wprost proporcjonalna do zmian zadawanego napięcia i zależała od wielkości współczynników kompensacji /błędów względnych w funkcji temperatury i ciśnienia barometrycznego/. Błąd względny obliczeń wprowadzany do wyniku nie przekraczał wartości  $5 \cdot 10^{-5}$ .

#### 4.3. Wnioski z badań modeli

Po przeprowadzeniu badań modeli mikroprocesorowego miernika ciśnienia stwierdzono, że obydwa mierniki zostały zrealizowane zgodnie z założeniami. Zauważono jednak występowanie pewnych niedogodności związanych z obsługą mierników. Dotyczy to szczególnie czasu repetycji wyników pomiarów wynoszącego 1s. Utrudnia to śledzenie zmiennych wartości ciśnienia. Także sposób obsługi klawiatury /szczególnie wprowadzanie danych/ powinien być zmodyfikowany tak, ażeby można było wprowadzać dane niezależnie.

Badania potwierdziły, że ogólna koncepcja realizacji mikroprocesorowego miernika ciśnienia do współpracy z rezonatorowymi czujnikami ciśnienia jest poprawna i miernik jest przystosowany do pomiarów ciśnień. Ponadto miernik umożliwia dokonywanie pewnych modyfikacji algorytmów pomiarowych co może okazać się istotne dla niekonwencjonalnego wykorzystania tego urządzenia do badań.

### 5. Modele aparatury pomiarowej

#### 5.1. Badania modeli aparatury

Budowę, wykonanie i badania modeli czujników rezonatorowych ciśnienia oraz mikroprocesorowego miernika cyfrowego tworzących model aparatury pomiarowej omówiono w p. 3 i 4.

Model aparatury pomiarowej poddano sprawdzeniom dla ustalenia właściwości metrologicznych oraz prawidłowości działania.

Badania modeli aparatury przeprowadzono w zakresie sprawdzenia podstawowych błędów pomiaru oraz błędów dodatkowych wywołanych zmianą temperatury otoczenia od temperatury odniesienia /wyznaczenie błędów temperaturowych/.

Przed przystąpieniem do badań wyznaczono charakterystyki częstotliwościowe dwóch modeli czujników rezonatorowych o nr nr II/41 i III/16, na ich podstawie wyznaczono wartości współczynników a, b, c, d algorytmu przetwarzania. Do pamięci

miernika wprowadzono w/w wartości oraz dane charakteryzujące czujnik; tzn: częstotliwość początkową i końcową oraz zakres pomiarowy.

Do miernika podłączono w/w czujniki rezonatorowe i w warunkach odniesienia odczytywano wskazania miernika w ustalonych punktach pomiarowych. W tabl. 28 przedstawiono wyniki.

Przyjęto umownie, że model aparatury pomiarowej będzie oznaczony numerem czujnika rezonatorowego. Z w/w tablicy wynika, że wartości błędów podstawowych pomiaru nie przekraczają 0,05%.

W analogiczny sposób przeprowadzono badania w temperaturach otoczenia  $0^{\circ}\text{C}$ ,  $30^{\circ}\text{C}$ ,  $40^{\circ}\text{C}$ .

Ponieważ układ stabilizacji temperatury /termostatowania/ w czujniku, oparty na tranzystorze jako elemencie grzejnym, okazał się nieskuteczny, to badania powyższe przeprowadzono bez włączania termostatowania.

Błędy dodatkowe wywołane zmianą temperatury otoczenia wyznaczono z porównania wskazań miernika odczytanych w w/w temperaturach i w temperaturze odniesienia. Wartości wyznaczonych błędów temperaturowych zestawiono w tabl. 29 i 30, przy czym podano je w dwóch kolumnach /dla każdej z w/w temperatur/ :

× w jednej jako błędy w % zakresu pomiarowego i w drugiej jako błędy w % zakresu pomiarowego przeliczone na  $1^{\circ}\text{C}$  zmiany temperatury otoczenia.

Z tablic tych wynika, że błędy temperaturowe modeli aparatury pomiarowej osiągnęły wartości zbliżone do wartości błędów temperaturowych wyznaczonych dla rezonatorów o nr nr 41 i 16 /tabl. 8 i 9 w p. 3.1.2/. Poza tym potwierdzone zostały inne wnioski z badania wpływu zmian temperatury otoczenia.

Tablica 28

Ciśnienie poprawne kG/cm <sup>2</sup>	Model nr II/41		Model nr III/16	
	Wskazanie miernika kG/cm <sup>2</sup>	Błąd pomiaru /podstawowy/ % zakresu pomiarów.	Wskazanie miernika kG/cm <sup>2</sup>	Błąd pomiaru /podstawowy/ % zakresu pomiarów.
0	-0,000828	-0,0138	-0,001876	-0,047
0,5	0,498078	-0,0320	0,498419	-0,040
1,0	0,997717	-0,0380	0,998559	-0,036
1,5	1,49768	-0,0387	1,49911	-0,022
2,0	1,99833	-0,0278	1,99896	-0,026
2,5	2,49904	-0,0160	2,49929	-0,018
3,0	2,99879	-0,0202	2,99930	-0,018
3,5	3,49821	-0,0298	3,49965	-0,009
4,0	3,99828	-0,0287	3,99985	-0,004
4,5	4,49802	-0,0330	-	-
5,0	4,99776	-0,0373	-	-
5,5	5,49744	-0,0427	-	-
6	5,99765	-0,0392	-	-
Zakres pomiarowy	0 + 6 kG/cm <sup>2</sup>		0 + 4 kG/cm <sup>2</sup>	
Temperatura	19,5°C		22°C	
Ciśnienie barometryczne	748 mm Hg		749 mm Hg	

Model nr II / 41

Tablica 29

Ciężnienie poprawne kg/cm <sup>2</sup>	Błąd temperaturowy w % w temperaturze otoczenia			Błąd temperaturowy w % / 1°C w temperaturze otoczenia			Średnia bezwzględna wartość błędów temp. % / 1°C
	0°C	30°C	40°C	0°C	30°C	40°C	
0	-0,0394	0,0515	0,1114	-0,0021	0,0048	0,0052	0,0040
1	-0,0561	0,0847	0,1606	-0,0030	0,0079	0,0075	0,0061
2	-0,0697	0,1152	0,2132	-0,0038	0,0108	0,0099	0,0082
3	-0,0796	0,1333	0,2924	-0,0043	0,0125	0,0136	0,0101
4	-0,0968	0,1635	0,3795	-0,0052	0,0153	0,0177	0,0127
5	-0,1277	0,1838	0,4311	-0,0069	0,0172	0,0201	0,0148
6	-0,1545	0,2392	0,4810	-0,0084	0,0224	0,0224	0,0177

-58-

61

Model nr III/16

Tablica 30

Ciśnienie poprawione kg/cm <sup>2</sup>	Błąd temperaturowy w % w temperaturze otoczenia			Błąd temperaturowy w %/1°C w temperaturze otoczenia			Średnia bezwzględna wartość błędów temp. %/1°C
	0°C	30°C	40°C	0°C	30°C	40°C	
0	-0,1840	0,0493	0,1010	-0,0084	0,0049	0,0051	0,0061
1	-0,2477	0,0651	0,1486	-0,0113	0,0065	0,0074	0,0084
2	-0,3270	0,0970	0,2038	-0,0149	0,0097	0,0102	0,0116
3	-0,4223	0,1265	0,2620	-0,0192	0,0127	0,0131	0,0150
4	-0,5395	0,1595	0,3365	-0,0245	0,0160	0,0168	0,0191

59

62

## 5.2. Podstawowe przyrządy i urządzenia używane podczas badań

Podczas badań rezonatorów, modeli czujników rezonatorowych i miernika cyfrowego oraz modeli aparatury pomiarowej stosowano n/w przyrządy i urządzenia:

- ciśnieniomierz wzorcowy f-my Paroscientific /USA/ o zakresie pomiarowym 0 + 200 psia,
- manometr rtęciowy f-my Wallace and Tiernan /Anglia/, typ FA 187, klasy 0,03,
- manometry obciążnikowo-tłokowe o odpowiednich zakresach pomiarowych, typu MT, klasy 0,02 i 0,05,
- prasa powietrzno-hydrauliczna typ PPH-25,
- komory klimatyczne,
- woltomierz cyfrowy, typ Data Precision 3500,
- opornik wzorcowy RN-1-10 $\Omega$  , kl. dokł. 0,01,
- termometr cyfrowy o dokładności 0,1 $^{\circ}$ C,
- zasilacze laboratoryjne,
- częstotściomierz cyfrowy typu PFL28A,
- oscyloskop typ OS102,
- termometry szklane - różne,
- barometr rtęciowy.

## 6. W n i o s k i

Opracowanie, wykonanie i badania modeli aparatury pomiarowej pozwalają *na* sformułowanie n/w wniosków:

1. Modele aparatury pomiarowej z czujnikami cylindrycznymi wykazują dobre właściwości metrologiczne i pozwalają realizować założone funkcje oraz uzyskać założone parametry techniczne.

Do najważniejszych należy zaliczyć:

- uzyskanie założonego typoszeregu zakresów pomiarowych od - 0,1 MPa do 6 MPa,
- uzyskanie dokładności pomiarów 0,1% i lepszej,
- poprawność przyjętej koncepcji mikroprocesorowego miernika cyfrowego do współpracy z czujnikami rezonatorowymi



2. Modele czujników z rezonatorem cylindrycznym mają znacznie lepsze właściwości metrologiczne niż czujniki z rezonatorami membranowymi.

W czujnikach z rezonatorem membranowym, które miały być stosowane do pomiarów ciśnień w zakresie do około 300 kPa, nie udało się uzyskać założonej dokładności pomiarów ani powtarzalności /w poszczególnych egzemplarzach/ charakterystyki czujników wykonanych w jednej serii; dotyczy to też niepowtarzalności częstotliwości początkowej  $f_0$ . Przyczynami tych różnic i przekroczeń są różne naprężenia w poszczególnych membranach lub brak naprężenia wstępnego po przyspawaniu membran do obrzeża korpusu. Wystąpiła również duża /ponad 10%/ nieliniowości charakterystyki.

W związku z powyższym dalszych prac nad tymi czujnikami nie prowadzone.

Wyeliminowanie czujników z rezonatorem membranowym nie spowoduje ograniczenia zakresu mierzonych ciśnień, ponieważ ich modele były modelami alternatywnymi a wykonanie ich miało na celu wybór optymalnego rozwiązania.

3. Badania temperaturowe wykazały, że elinwar tytanowy, z którego wykonane zostały rezonatory, nie jest wystarczająco skompensowany termicznie.

W związku z tym należy kontynuować współpracę z Instytutem Metaloznawstwa i Spawalnictwa Politechniki Śląskiej w Gliwicach w zakresie opracowania procesu technologicznego obróbki cieplnej elinwaru tytanowego w celu uzyskania zbliżonej do zera wartości współczynnika temperaturowego modułu sprężystości.

Po zakończeniu w/w pracy należy wykonać co najmniej 3 szt. rezonatorów cylindrycznych dla przeprowadzenia badań pozwalających określić stopień skuteczności opracowanego procesu technologicznego. Pozwoli to odpowiedzieć na pytanie czy czujniki rezonatorowe wymagać będą stosowania dodatkowego układu kompensacji wpływu temperatury otoczenia czy też mogą się bez niego obejść. Jest to sprawa niezmiernie istotna, ponieważ układ kompensacji temperaturowej komplikuje konstrukcję.

4. Uzyskaną w badaniach modeli aparatury pomiarowej wartość współczynnika temperaturowego rzędu  $0,2\%/10^{\circ}\text{C}$  uważa się za zbyt dużą dla przyrządu o zakładanej dokładności pomiaru do  $0,1\%$ . W związku z tym należy dążyć do zmniejszenia wartości tego współczynnika do wartości nie przekraczającej wartości błędu podstawowego.

W ramach opracowywania dokumentacji prototypu należy kontynuować prace nad układem stabilizacji temperaturowej /termostatowaniem/ rezonatora.

Celowym jest również rozważenie możliwości zastosowania w czujniku rezonatorowym przetwornika temperatury, którego sygnał zależny od temperatury w przestrzeni rezonatora, byłby przesyłany do miernika mikroprocesorowego. Miernik, mając specjalnie opracowany program, będzie samoczynnie wprowadzać do wskazań ciśnienia poprawki temperaturowe, kompensując wpływ zmian temperatury otoczenia. W metodzie tej niezbędne jest doświadczalne wyznaczenie wartości błędów temperaturowych indywidualnie dla każdego czujnika rezonatorowego.

5. Zakład DPP-PIAP nie posiada manometrów wzorcowych klasy  $0,005 + 0,007\%$ , które pozwoliłyby stwierdzić, czy opracowana aparatura pomiarowa spełnia wymagania dla dokładności  $0,02\%$ . Czynnione w latach 1987 i 1988 usiłowania zakupu w firmach zachodnich /II obszar płatniczy/ ciśnieniowej aparatury pomiarowej o bardzo wysokiej dokładności rzędu  $0,005 + 0,007\%$  nie dały pozytywnego wyniku.
6. Modele mikroprocesorowego miernika cyfrowego spełniają dane przedstawione w założeniach. Stwierdzono jednak, że prototyp użytkowy powinien zostać zrealizowany w innej konstrukcji mechanicznej. Pozwoli to na zmniejszenie gabarytów miernika i zastosowania bardziej funkcjonalnego rozkładu klawiatury. Duża ilość informacji jaką powinna posiadać obsługa miernika wymaga zastosowania klawiatury wielofunkcyjnej pozwalającej na obsługę miernika bez ciągłego odwoływania się do instrukcji obsługi. Powinien także zostać zmieniony układ wyświetlaczy z siedmiosegmentowych na ciekłokrystaliczne mozaikowe.

Wyświetlacze te umożliwiają proste przedstawienie typu pomiaru, jednostek mierzonych wielkości i pozwolą na wygodniejszą komunikację użytkownika z przyrządem. Generator wzorcowy powinien zostać umieszczony poza pakietem pomiarowym. Umożliwi to stosowanie różnych generatorów w zależności od potrzeb użytkownika /klasa przyrządu, wzorcowanie/, co ma wpływ na koszty przyrządu.

W trakcie realizacji pracy stwierdzono, że różne wersje mikroprocesorowych mierników ciśnienia mogą się różnić oprogramowaniem i zastosowanym zestawem pakietów.

Przeprowadzona unifikacja w zakresie oprogramowania i sprzętu pozwoli na realizację różnych wersji mierników w jednakowej obudowie mechanicznej z jednolitą klawiaturą. Podstawowa różnica pomiędzy różnymi wersjami występuje na poziomie oprogramowania. Procedury sterujące poszczególnymi funkcjami miernika należy uaktywniać lub blokować w trakcie instalacji oprogramowania. Przy zastosowaniu takiego rozwiązania będzie można w łatwy sposób rozbudowywać miernik wyposażając go w dodatkowe funkcje. Pozwoli to na realizację mierników spełniających indywidualne wymagania użytkowników.

Przy opracowywaniu dokumentacji prototypu i wykonawstwie prototypów należy uwzględnić w/w uwagi.

7. Należy podkreślić, że ciśnieniowa aparatura pomiarowa z czujnikami rezonatorowymi jest nowością na rynku światowym i tylko nieliczne firmy zachodnie, jak wspomniano we wstępie sprawozdania, produkują aparaturę o wysokiej i bardzo wysokiej dokładności pomiaru.
8. Wnioskuje się o kontynuację prac w zakresie aparatury pomiarowej z czujnikami z rezonatorem cylindrycznym zgodnie z harmonogramem.

Miernik cyfrowy do współpracy z czujnikami rezonatorowymi. I wersja - unroboczość; Wymaganie

Miernik cyfrowy może współpracować z czujnikami rezonatorowymi ciśnienia albo innymi czujnikami lub przetwornikami ciśnienia o wyjściu częstotliwościowym.

Algorytm mierzenia jest obliczanie na bieżąco danych w oparciu o sygnały wejściowe /częstotliwość/ i wyświetlanie wyników w postaci cyfrowej na polu odczytowym.

Miernik może być opcjonalnie wyposażony w jeden z dwóch interfejsów do współpracy z drukarką albo komputerem albo w przetwornik c/a.

Wymagania realizowane przez miernik.

a/ Pomiar ciśnień

    / naciśnienia,

    b/ podciśnienia,

    c/ różnicy ciśnień,

    d/ stosunku ciśnień.

    e/ różnicy ciśnień,

    f/ stosunku ciśnień.

1.1. Ciśnienie może być obliczane wg jednego z dwóch algorytmów:

$$P_{obl1} = f_1/t, P_{bar} = P_1/$$

lub

$$P_{obl2} = f_2/t, P_{bar} = P_2/$$

$$P_1 = K_1 / Ax^5 + Bx^4 + Cx^3 + Dx^2 + Ex + Fx^0 /$$

lub

$$P_2 = K_1 / Ax^5 + Bx^4 + Cx^3 + Dx^2 + Ex + Fx^0 / + K_2$$

gazior

$t$  - temperatura czujnika ,

$P_{bar}$  - ciśnienie barometryczne otoczenia .

sposób korekcji wartości ciśnienia od temperatury minimum czujnika i ciśnienia barometrycznego zostanie określony w późniejszym terminie.

$A, B, C, D, E, F$  i  $K_2$  stałe równania umieszczone w pamięci EPROM ,

$x$  - prosta funkcja analityczna  $f$  i  $f_0$  np:

$$x = f - f_0 ; \quad x = \frac{f}{f_0} ,$$

$K_1$  - stała służąca do przeliczania jednostek - wprowadzona na stałe do pamięci.

wybró algorytmu  $P_{1obl}$  lub  $P_{2obl}$  w zależności od położenia oddzielnego klawisza na płycie czołowej.

## 1.2. Różnica ciśnień

$$\Delta p = p_m - p_n$$

$p_m$  i  $p_n$  wg algorytmu w p.1.1, przy włączonych dwóch czujnikach, przy założeniu że  $n > m$  i  $n = m + \frac{\text{ilość czujników}}{2}$ .

## 1.3. Stosunek ciśnień

$$\frac{p_m}{p_n}$$

$p_m$  i  $p_n$  wg algorytmu w p.1.1 przy włączonych dwóch czujnikach przy założeniu że  $n > m$  i  $n = m + \frac{\text{ilość czujników}}{2}$ .

## 1.4. Opak. przeliczania

Przy pomocy dodatkowego przycisku dla funkcji pomiaru ciśnień, z wyjątkiem różnicy i stosunku ciśnień, uruchomić

... przy przeliczaniu /przebiegania/. Powoduje ona kolejne  
 włączanie wartości poszczególnych ciśnień ze wszystkich  
 ... czujników z częstotliwością co 5s. W przypadku  
 ... wartości ciśnień są przekazane  
 ... i rejestrowane z częstotliwością określoną przy  
 ... jest wielkością  
 ... 5s x ilość czujników/.

### ... czastotliwosci drzan

#### ... okresu drzan

Dla pomiaru częstotliwości i okresu drzań możliwe jest  
 ... w sposób opisany w p.1.4.

### ... wyniki

... powinny być wyświetlane na 7 1/2 cyfrowym  
 ... kropką.

Wydruk wyników pomiarów powinien następować z inicjacji  
 ... /w ustalonych odstępach czasu  
 ... /.

#### ... 1

... dla realizowanego pomiaru powinien  
 ... / np.za pomocą  
 ... /.

... dla różnicy i stosunku  
 ... powinny być  
 ... za  
 ... /.

... przy pomiarze podciśnienia i ujemnej  
 ...

12. Wybór jednostek - przezycznikiem klawiszowym.

- a) ... jednostka mierni... nie zawiera... Miernik mo...
- b) ... /na wyznaczeniu zamawiającego/ wyposażony...
- c) ... /z dokładnością do 0,1% /zakres 0-20 lub 4-20mA...
- d) ...
- e) ...
- f) ...
- g) ...
- h) ...
- i) ...
- j) ...
- k) ...
- l) ...
- m) ...
- n) ...
- o) ...
- p) ...
- q) ...
- r) ...
- s) ...
- t) ...
- u) ...
- v) ...
- w) ...
- x) ...
- y) ...
- z) ...

*[Handwritten signature]*

6. w przypadku interfejsu na drukarkę wydruk wyników pomiarów i obliczeń.
7. sygnalizacja stanów przekroczeń i błędnego działania
- brak napięcia sieciowego - gaśnięcie LED,
  - brak sygnału wejściowego z czujnika,
  - nieprawidłowo wybrana funkcja,
- } Wyświetlanie informacji np. w postaci En
- przekroczenie górnej granicy zakresu pomiarowego /np: mruganie diody -LED/; gdy przekroczenie osiąga wartość n-krotną - sygnał akustyczny wyłączany przez operatora / 1,3Sn ≤ 2 /.

#### 4.2. Wymagania Konstrukcyjne i metrologiczne

1. Wejścia dla czujników do miernika
  - 6 wejść dla czujników o wyjściu częstotliwościowym,
  - 6 wejść dla analogowych czujników temperatury /do kompensacji wpływu temperatury/,
  - 1 wejście dla analogowego czujnika barometrycznego /do kompensacji ciśnienia barometrycznego/.
2. Zakres częstotliwości czujników rezonatorowych  $2 \pm 20$  kHz.
3. Sygnał wejściowy czujników analogowych  $0 \pm 10$  V.
4. Napięcie zasilania czujników  $\pm 12$  V lub  $\pm 15$  V.
5. Napięcie zasilania miernika 220V/50Hz.
6. Temperatura otoczenia  $5 \pm 40$  °C.
7. Wskaźnik 7 1/2 cyfr; minimalna wysokość cyfr 15 mm.
8. Dokładność pomiaru 0,001%.
9. Czas repetycji wskazań 1s.
10. Wybór algorytmów przy pomocy zadajników kodu BCD lub klawiszy funkcyjnych lub w sposób zaproponowany przez PIR.
11. Należy rozważyć możliwość użycia zadajników kodu BCD



Moduł pomiarowy, mierniki cyfrowe do współpracy z czujnikami rezonatorowymi, II wersja - laboratoryjna. Wymagania

Miernik cyfrowy może współpracować z czujnikami rezonatorowymi ciśnienia albo innymi czujnikami lub przetwornikami ciśnienia wyjściu częstotliwościowym.

Zadaniem miernika jest obliczanie na bieżąco danych w oparciu o sygnały wejściowe /częstotliwość/ i wyświetlanie wyników w postaci cyfrowej na polu odczytowym lub polach odczytowych. Miernik może być opcjonalnie wyposażony w interfejs do drukarki i komputera oraz dokładny przetwornik a/c / wykorzystywany przy liczeniu błędów względnych/.

Funkcje realizowane przez miernik

- a) ciśnienie,
- b) ciśnienia,
- c) podciśnienia,

- d) różnicy ciśnień,
- e) stosunku ciśnień.

1.1. Ciśnienie może być obliczane wg jednego z dwóch algorytmów:

$$p_{0011} = f_1 / t, p_{bar}, p_1 /$$

$$p_{0012} = f_2 / t, p_{bar}, p_2 /$$

$$p_1 = K_1 / Ax^5 + Bx^4 + Cx^3 + Dx^2 + Ex + Fx^0 /$$

$$p_2 = K_1 / Ax^5 + Bx^4 + Cx^3 + Dx^2 + Ex + Fx^0 / + K_2$$

t - temperatura czujnika

$p_{bur}$  - ciśnienie barometryczne otoczenia ,  
 $A, B, C, D, E, F$  i  $K_2$  - stałe wprowadzane przez użytkownika  
z klawiatury ,

$x$  - prosta funkcja analityczna  $f$  i  $f_0$  np:

$$x = f - f_0; \quad x = \frac{f}{f_0}$$

$K_1$  - stała służąca do przeliczania jednostek - wprowadzona  
na stałe do pamięci.

Wybór algorytmu  $p_{1obl}$  lub  $p_{2obl}$  w zależności od położenia  
oddzielnego klawisza na płycie czołowej.

## 2. Różnica ciśnień

$$p = p_m - p_n$$

$p_m$  i  $p_n$  wg algorytmu w p.1.1 przy włączonych dwóch czujnikach.  
Wybór czujników o numerach  $m$  i  $n$  przez operatora.

## 3. Stosunek ciśnień

$$\frac{p_m}{p_n}$$

$p_m$  i  $p_n$  wg algorytmu w p.1.1 przy włączonych dwóch czujnikach,  
o numerach  $m$  i  $n$  przez operatora.  
*↑ Wybór czujników*

## 1.4. Opcja przeszukiwania

Przy pomocy dodatkowego przycisku dla funkcji pomiaru  
ciśnień /z wyjątkiem różnicy i stosunku ciśnień/ uruchomić  
opcję przeszukiwania /przemiatania/. Powoduje ona kolejne  
wyswietlanie wartości poszczególnych ciśnień ze wszystkich  
podłączonych czujników z częstotliwością co 5s. W przypadku ~~niekierowny~~  
dotarczenia któregoś z interfejsów wartości ciśnień są przekazy-  
wane przez interfejs i rejestrowane z częstotliwością określoną

obliczony, przy pomocy starej  $K_3$  umieszczonej w pamięci / $K_3$  jest  
wskazaniem wyrażenia  $5s \times$  ilość czujników/.

2. Sprawdzanie czujników, przetworników i mierników ciśnienia  
oraz obliczanie błędu względnego sprawdzanego przyrządu

a/ Sprawdzanie zewnętrznego miernika ciśnienia

$$\delta = \frac{W_s - W_p}{W_{100}} \times 100\%$$

gdzie:

$W_s$  -- wskazanie chwilowe przyrządu badanego wprowadzone  
do pamięci przez użytkownika,

$W_p$  -- wskazanie chwilowe miernika

$W_{100}$  -- zakres pomiarowy przyrządu badanego wprowadzony  
do pamięci przez użytkownika,

1./ Sprawdzenie czujnika rezonatorowego .

Operator wprowadza zakres pomiarowy  $W_{100}$  oraz numery  
czujników wzorcowego i sprawdzanego. Miernik oblicza wartość  
błędu wg wzoru na  $\delta$ .

b/ Możliwość wyznaczenia błędów względnych przetworników ciśnienia

Wejście przez dokładny przetwornik a/c. Operator musi wprowadzić  
współczynnik  $W_{100}$  oraz wartość sygnału przetwornika  
/standard  $0 \pm 20, 4 \pm 20 \text{mA}$  /.

Moмент rejestracji z inicjatywy operatora.

3. Wzorowanie czujników rezonatorowych

Możliwe w przypadku współpracy z komputerem zewnętrznym.

Przesyłanie danych

do komputera lub drukarki z inicjatywy operatora. Do komputera  
przesyłane są dane dotyczące okresu lub częstotliwości.

Możliwość zaprogramowania z zewnątrz innych funkcji /przy  
pomocy komputera/.

44

api dla kilku, sprawdzanych czujników powinna istnieć możliwość <sup>mierzenia</sup> ciśnienia w tej samej ustalonej przez operatora chwili /praktycznie w bardzo małych odstępach czasu/ i zarejestrowania wyników pomiarów<sup>x</sup>.

5. Pomiar częstotliwości drgań

6. Doświadczenie okresu drgań

Przy pomiarze częstotliwości i okresu drgań możliwe jest przeszukiwanie wyników pomiarów w sposób opisany w p.1.4.

7. W przypadku opcji miernika z zastosowaniem interfejsu na drukarkę lub komputer możliwe powinno być wykonywanie funkcji pozwalającej na sprawdzanie lub liczenie błędów wszystkich podłączonych czujników o numerach 5+8 lub 6+10 zależnie od ilości wejść /III.1/.

8. Możliwość sterowania pracą miernika przez komputer.

II. Wizualizacja wyników

1. Wyniki pomiarów powinny być wyświetlane na dwóch 7 1/2 cyfrowych wskaźnikach w postaci z pływającą kropką.

2. Górny wskaźnik:

- przy wzorcowaniu lub sprawdzaniu wyświetla się wartość ciśnienia kontrolnego /czujnika wiodącego/,

- przy pomiarze stosunku i różnicy ciśnień wyświetla się wartość ciśnienia  $p_m$ .

3. <sup>Dolny wskaźnik:</sup>  
- wyniki pomiarów ciśnień poszczególnych czujników,

- wynik pomiaru różnicy ciśnień oraz zamiennie wartość ciśnienia  $p_n$ .

- wynik pomiaru stosunku ciśnień oraz zamiennie wartość ciśnienia  $p_n$ ;

- wartości częstotliwości lub okresu ;

- przy sprawdzaniu czujników, przetworników i mierników

4. Możliwość odłączenia wskaźnika górnego  $p_n$  w przypadku pomiaru  $\sigma$  stosunku lub różnicy ciśnień odrębnym przyściskiem.
5. Wydruk wyników pomiarów powinien następować z inwencji operatora lub automatycznie / w ustalonych odstępach czasu lub uzgodnionych przez użytkownika/.
6. Symbol jednostki ciśnienia, wybrany dla realizowanego pomiaru, powinien być sygnalizowany przez cały czas pomiaru / np. za pomocą diód -LED-ów; klawiszy podświetlanych/.
7. Numer czujnika /numery czujników dla różnicy i stosunku ciśnień/ oraz rodzaj realizowanej funkcji powinny być wybierane zadajnikami BCD lub sygnalizowane za pomocą diód /LED-ów/.
8. Wyświetlanie znaku "-" przy pomiarze podciśnienia i ujemnej różnicy ciśnień, sprawdzaniu oraz wzorcowaniu czujników, przetworników i mierników podciśnienia.
9. Sygnalizacja stanów przekroczeń i błędnego działania
  - brak napięcia sieciowego - gaśnięcie LED,
  - brak sygnału wejściowego z czujnika,
  - nieprawidłowo wybrana funkcja,
  - wprowadzanie niedostatecznej liczby danych,
  - jedna ze stałych wpisana do pamięci zmienia swoją wartość po ostatnim wyłączeniu miernika,
  - przekroczenie górnej granicy zakresu pomiarowego /np. mruganie diody LED/, gdy przekroczenie osiąga wartość  $n$  krotną - sygnał akustyczny wyłączony /<sup>przez</sup> operatora / $1,3 \leq n \leq 2$ /.
10. W przypadku interfejsu na dwukrotną drukarkę wydruk wyników pomiarów i obliczeń.

wyświetlanie inf,  
np. w postaci En

~~11. Wprowadzenie danych do pamięci dwustopniowe /gotowości wejścia/.~~

### III. Wymagania konstrukcyjne i metrologiczne

1. Wejścia do miernika
  - 8 lub 10 wejść dla czujników rezonatorowych,
  - 8 lub 10 wejść dla analogowych czujników temperatury / do kompensacji wpływu temperatury/,
  - 1 wejście dla analogowego czujnika barometrycznego / do kompensacji wpływu ciśnienia barometrycznego/,
  - 1 wejście - przetw. A/C / wejście pomiarowe/ 0÷20 mA lub 4÷20 mA, użytkownik definiuje standart.
2. Zakres częstotliwości czujników rezonatorowych 2÷20 MHz.
3. Sygnał wejściowy czujników analogowych 0÷10 V.
4. Napięcie zasilania czujników  $\pm 12V$  lub  $\pm 15V$
5. Napięcie zasilania miernika  $\sim 220V/Hz$ .
6. Temperatura otoczenia 5÷40°C.
7. Dwa wskaźniki 7 1/2 cyfry; minimalna wysokość cyfr 15 mm.
8. Dokładność pomiaru 0,001%.
9. Czas repetycji wskazań 1s.
10. Wartość stałych A, B, C, D, E, F, K<sub>1</sub>, K<sub>2</sub>, K<sub>3</sub> wprowadzanych do pamięci przez użytkownika przy pomocy klawiatury - w postaci liczby siedmicyfrowej z wykładnikiem,  $\frac{\text{znak} \text{ liczby} \text{ "+"} \text{ lub} \text{ "-"}}{n_{\text{max}}} = \pm 12/$ .
11. Wprowadzenie danych do pamięci dwustopniowe /"gotowość", "wejście"/.
12. Wprowadzenie danych tylko przez przełącznik uruchamiany kluczykiem.
13. Dane /tzn. symbol stałej i jej wartość/ wyświetlane są na wskaźnikach cyfrowych.
14. Wybór algorytmów zadajnikami kodu BCD lub przy pomocy klawiszy funkcyjnych lub w sposób zaproponowany przez PIE.
15. Przy braku zasilania nieulotność pamięci powinna być zapewniona przez okres co najmniej 6 miesięcy.
16. Współpraca z drukarką lub komputerem.
17. Wejście do pamięci - ...

77

18. Sygnalizacja LED-ami następujących funkcji :

- włączenie zasilania miernika ,
- jednostki wg następującej <sup>pozycji</sup> pozycji: hPa, kPa, MPa, bar, kg/cm<sup>2</sup> psi. Na żądanie powinna być możliwość dokonywania pomiarów ciśnienia w innych jednostkach.

19. Wejścia czujników na płycie tylnej.

20. Elementy przełączające, wskaźniki cyfrowe oraz sygnalizacja optyczna na płycie przedniej.

21. Podłączenie dla drukarki lub komputera na płycie tylnej.

*M.B.*

A N A L I Z A    B Ł Ę D Ő W  
PRZYJĘTEGO MODELU MATEMATYCZNEGO  
REZONATOROWEGO MIERNIKA CIŚNIENIA RMC

A u t o r y :

mgr inż. J. Rucinski

mgr inż. A. Szczerba

Warszawa , czerwiec 1988 r.



## S P I S   T R E Ś C I

1. Oszacowanie błędu pomiaru ciśnienia.
2. Oszacowanie błędu kompensacji temperatury czujnika.
3. Oszacowanie błędu kompensacji ciśnienia barometrycznego.
4. Wnioski.
5. Podstawowe wzory.

gdzie :

$v$  - liczba okresów mierzonego sygnału,

$T$  - czas pomiaru  $N$  okresów,

$f_w$  - częstotliwość generowana przez czujnik dla ciśnienia normalnego.

Po uwzględnieniu błędów reprezentacji danych oraz błędów operacji arytmetycznych otrzymujemy :

$$x = \frac{N(1+\xi_0)}{\pi(1+\xi_w) \cdot f_w(1+\xi_r)(1+\xi_0)} \quad /1.2/$$

gdzie :

$\xi_0$  - błąd operacji arytmetycznej,

$\xi_r$  - błąd reprezentacji  $f_w$ ,

$\xi_w$  - błąd wzorca.

błąd względny wartości  $x$  wynosi :

$$\xi_x = \xi_w + \xi_r + 2\xi_0 \quad /1.3/$$

Po podstawieniu odpowiednich wartości otrzymujemy :

$$\xi_x = (10 + 1 + 2) \cdot 2^{-24} = 13 \cdot 2^{-24}$$

Wartość ciśnienia jest wyliczana z następującego wzoru :

$$P = K_1(Ax^5 + Bx^4 + Cx^3 + Dx^2 + Ex + F) + K_2 \quad /1.4/$$

Wzór ten można zapisać w postaci :

$$P = K_1 \left( \sum_{i=0}^5 A_i x^i \right) + K_2 \quad /1.5/$$

gdzie :

$K_1$  oraz  $K_2$  - stałe równania,

$F_1$  - stała służąca do przeliczania jednostek.

gdzie wprowadzamy przez wielomian wyliczonego ze wzoru :

$$\left[ \sum_{i=0}^5 A_i (1 + \alpha_i) [x(1 + \beta)]^i (1 + \varepsilon_m)^i \right] (1 + \varepsilon_d) \quad /1.6/$$

gdzie :

$\alpha_i$  - błąd reprezentacji stałej  $A_i$ ,

$\beta$  - błąd reprezentacji  $x$ ,

$\varepsilon_m$  - błąd operacji mnożenia,

$\varepsilon_d$  - błąd operacji dodawania.

Błąd każdego składnika wielomianu wyliczonego ze wzoru :

$$\lambda_i = \alpha_i + i\beta + i\varepsilon_m + \sum_{j=1}^5 \varepsilon_d \quad ; \quad \varepsilon_d = 0 \text{ dla } i=0 \quad /1.7/$$

błędy poszczególnych składników wynoszą :

$$\lambda_0 = 6 \times 2^{-24}$$

$$\lambda_1 = 20 \times 2^{-24}$$

$$\lambda_2 = 33 \times 2^{-24}$$

$$\lambda_3 = 46 \times 2^{-24}$$

$$\lambda_4 = 59 \times 2^{-24}$$

$$\lambda_5 = 72 \times 2^{-24}$$

błąd wielomianu można oszacować za pomocą następującej nierówności :

$$\varepsilon_{WW} \leq \max_i |\lambda_i| \frac{\sum_i |A_i x^i|}{\left| \sum_i A_i x^i \right|} \quad ; \quad \text{dla każdego } i \in \mathbb{N} \quad /1.8/$$

jeżeli wszystkie składniki wielomianu mają jednakowe znaki,

wówczas :

$$\varepsilon_{WW} \leq \max_i |\lambda_i|$$

Nieco inaczej w przypadku różnych znaków należy określić

wskaznik uwarunkowania zadania, czyli stosunek sumy modułów

do modułu sumy. Wskaznik ten wyliczono po zakończeniu pełnej

analizy błędów i przedstawiono w p.4.

Błąd pomiaru ciśnienia oszacowano zgodnie ze wzorem /1.5/ :

$$P = [K_1(1 + \varepsilon_r) \left[ \sum_{i=0}^5 A_i x^i (1 + \lambda_i) \right] (1 + \varepsilon_o) + K_2(1 + \varepsilon_r)] (1 + \varepsilon_o) / 1.9 /$$

gdzie :

$\varepsilon_r$  - błąd reprezentacji,

$\varepsilon_o$  - błąd operacji arytmetycznej.

$$\varepsilon_p = \varepsilon_r + \max \lambda_i + \varepsilon_o + \varepsilon_o \quad /1.10/$$

$$\varepsilon_p = (1 + 72 + 1 + 1) \cdot 2^{-24} = 75 \times 2^{-24} = 4,47 \cdot 10^{-6}$$

$$\varepsilon_p < 10^{-5}$$

Powyższym wykazano, że błąd pomiaru jest mniejszy od założonego, a wskaźnik uwarunkowania zadania jest większy od 2. Oszacowany błąd nie zawiera błędu kompensacji temperatury i błędu kompensacji ciśnienia barometrycznego.

## 2. Oszacowanie błędu kompensacji temperatury czujnika

Na podstawie pomiarów ciśnienia w funkcji temperatury przedstawionych przez zamawiającego, założono :

- liniową zależność  $\delta_p$  w funkcji P dla  $t = \text{const.}$ ,
  - liniową zależność  $\delta_p$  w funkcji t dla  $P = \text{const.}$ ,
- gdzie  $\delta_p$  - błąd ciśnienia w funkcji temperatury.

Dla obliczania  $P' = P(1 + \delta_p)$  określono cztery charakterystyczne punkty, w których należy dokonywać pomiarów  $\delta_p$  :

- 20%  $P_z + P_m$ ; 20%  $t_z + t_m$ ;  $\delta_{p22}$
- 80%  $P_z + P_m$ ; 20%  $t_z + t_m$ ;  $\delta_{p82}$
- 20%  $P_z + P_m$ ; 80%  $t_z + t_m$ ;  $\delta_{p28}$
- 80%  $P_z + P_m$ ; 80%  $t_z + t_m$ ;  $\delta_{p88}$

gdzie:

$$P_m = P \text{ min,}$$

$$t_m = t \text{ min,}$$

$$P_z = P \text{ max} - P \text{ min,}$$

$$t_z = t \text{ max} - t \text{ min.}$$

Na podstawie danych z pomiarów w tych czterech punktach można obliczyć różnicę między ciśnieniem obliczonym a rzeczyw. stym.

Oznaczenia :

$$t_{20} = 20\% \times t_z + t_m,$$

$$t_{80} = 80\% \times t_z + t_m,$$

$t_a$  - temperatura czujnika,

$$P_{20} = 20\% \times P_z + P_m,$$

$$P_{80} = 80\% \times P_z + P_m,$$

$P_a$  - wartość ciśnienia obliczona bez poprawki,

$\sigma_{2x}$  - błąd względny ciśnienia dla  $P_{20}$  i  $t_x$ ,  
 $\sigma_{8x}$  - błąd względny ciśnienia dla  $P_{80}$  i  $t_x$ ,  
 $\sigma_{xx}$  - błąd względny ciśnienia dla  $P_x$  i  $t_x$ .

$$\sigma_{2x} = \sigma_{22} + \frac{(\sigma_{28} - \sigma_{22})(t_x - t_{20})}{(t_{80} - t_{20})} \quad /1.11/$$

$$\sigma_{8x} = \sigma_{82} + \frac{(\sigma_{88} - \sigma_{82})(t_x - t_{20})}{(t_{80} - t_{20})} \quad /1.12/$$

$$\sigma_{xx} = \frac{(P_x - P_{20})}{(P_{80} - P_{20})} (\sigma_{8x} - \sigma_{2x}) \quad /1.13/$$

$$P = P_x (1 + \sigma_{xx}) \quad /1.14/$$

W celu określenia błędu pomiaru ciśnienia  $P$  należy określić błąd pomiaru temperatury i błąd pomiaru  $\sigma_{28}$ ,  $\sigma_{22}$ ,  $\sigma_{82}$  oraz  $\sigma_{88}$ . W kanale pomiarowym temperatury miernika zaproponowano ośmio-bitowy przetwornik sygnału analogowego, a zatem błąd reprezentacji danych temperatury wynosi 0,4%. Błąd  $\sigma$  jest obciążony błędem pomiaru częstotliwości, temperatury i ciśnienia i można go oszacować na poziomie 0,1%.

Błędy obliczania błędów wartości ciśnienia dla poszczególnych wzorów wynoszą :

$$\text{dla 1.11} \quad \varepsilon_{2x} = \varepsilon_{\sigma} + \varepsilon_o + \varepsilon_{tx} + \varepsilon_o + \varepsilon_o + \varepsilon_t + \varepsilon_o + \varepsilon_o$$

$$\text{dla 1.12} \quad \varepsilon_{8x} = \varepsilon_{\sigma} + \varepsilon_o + \varepsilon_{tx} + \varepsilon_o + \varepsilon_o + \varepsilon_t + \varepsilon_o + \varepsilon_o$$

$$\text{dla 1.13} \quad \varepsilon_{xx} = \varepsilon_{px} + \varepsilon_o + \varepsilon_p + \varepsilon_o + \varepsilon_o + \varepsilon_{2x} + \varepsilon_o + \varepsilon_o$$

$$\text{dla 1.14} \quad \varepsilon_{pt} = \varepsilon_{px} + \varepsilon_o + \varepsilon_{xx} + \sigma_{xx} + \varepsilon_o + \varepsilon_{xx}$$

z tego :

$\varepsilon_{\sigma}$  - błąd pomiaru błędu wartości ciśnienia ,

$\varepsilon_0$  - błąd operacji arytmetycznej ,

$\varepsilon_{ux}$  - błąd pomiaru temperatury w procesie kompensacji ,

$\varepsilon_u$  - błąd pomiaru temperatury w procesie wzorcowania /określania błędu ciśnienia/ ,

$\varepsilon_{px}$  - błąd obliczania wartości ciśnienia ,

$\varepsilon_{pt}$  - błąd pomiaru ciśnienia w procesie wzorcowania /określania błędu ciśnienia/.

Wobec tego, że nie wszystkie wartości błędów były dostępne, obliczeń dokonano według własnych założeń :

$$\varepsilon_{\sigma} = 10^{-3}$$

$$\varepsilon_0 = 6 \times 10^{-8}$$

$$\varepsilon_{ux} = 4 \times 10^{-3}$$

$$\varepsilon_u = 10^{-3}$$

$$\varepsilon_{px} = 5 \times 10^{-6}$$

$$\varepsilon_p = 2 \times 10^{-5}$$

$$\varepsilon_{\sigma} \approx 6 \times 10^{-3}$$

$$\varepsilon_{ux} \approx 6 \times 10^{-3}$$

$$\varepsilon_{ux} \approx 6 \times 10^{-3}$$

$$\varepsilon_{px} \approx 5 \times 10^{-6} + 3 \times 10^{-6} \text{ dla } \sigma_{xx} = 0,05\%$$

$$\varepsilon_p \approx 5 \times 10^{-6} + 1,2 \times 10^{-6} = 6,2 \times 10^{-6} \text{ dla } \sigma_{xx} = 0,02\%$$

Błąd  $\varepsilon_p$  jest mniejszy od wartości założonej  $10^{-5}$ . Obliczeń

$\varepsilon_p$  dokonano dla dwóch typowych wartości  $\sigma$ :

$$\sigma \leq 0,05\% \text{ dla czujników do } 30 \text{ kg/cm}^2$$

$$\sigma \leq 0,02\% \text{ dla czujników do } 7,5 \text{ kg/cm}^2 .$$

2. Oszacowanie błędu kompensacji ciśnienia barometrycznego.

W trakcie realizacji pracy nie zostały dostarczone żadne materiały określające zależność  $P = f(p_b)$ . Z tego względu nie oszacowano błędu kompensacji ciśnienia barometrycznego. Można jednak stwierdzić, że układ kompensacji ciśnienia barometrycznego powinien być tak zrealizowany, ażeby ten błąd nie przekraczał  $1,2 \cdot 10^{-6}$  i utrzymywał się na poziomie błędu kompensacji temperatury czujnika.



#### 4. Wnioski

Stwierdzono, że założona dokładność pomiaru ciśnienia  $10^{-5}$  jest osiągalna.

Poszczególne składniki błędu oszacowano na następujących poziomach :

- błąd pomiaru ciśnienia  $\mathcal{E}_p$   $5 \cdot 10^{-6}$

Wskaźnik uwarunkowania zadania powinien być na poziomie 1,2 - co zostało sprawdzone na dwóch dostępnych zestawach danych.

- błąd kompensacji temperatury  $\mathcal{E}_{pt}$   $3 \cdot 10^{-6}$

Jeżeli błąd kompensacji ciśnienia barometrycznego  $\mathcal{E}_{pb}$  będzie mniejszy od  $10^{-6}$ , wówczas całkowity błąd

$$\mathcal{E} = \mathcal{E}_p \cdot WU + \mathcal{E}_{pt} + \mathcal{E}_{pb}$$

gdzie :

WU - wskaźnik uwarunkowania.

$$\mathcal{E} = 5 \cdot 10^{-6} \cdot 1,2 + 3 \cdot 10^{-6} + 10^{-6} = 10^{-5}$$

Jeżeli  $\mathcal{E}_{pb}$  będzie większy od  $10^{-6}$ , wtedy w celu spełnienia założeń należy zmniejszyć  $\mathcal{E}_{pt}$  lub  $\mathcal{E}_p$ .

$\mathcal{E}_{pt}$  można zmniejszyć stosując dziesięcio-bitowy przetwornik w torze pomiaru temperatury czujnika ,

$\mathcal{E}_p$  można zmniejszyć wydłużając czas pomiaru lub stosując inny generator /o większej częstotliwości/ i inny układ licznika /przystosowany do tej częstotliwości/.

W kolejnych etapach realizacji tematu powinny zostać przeprowadzone prace potwierdzające tezę, że wskaźnik uwarunkowania jest mniejszy od 1,2 dla rezonatorowych czujników ciśnienia. W przypadku gdyby okazało się, że niektóre czujniki mają większy wskaźnik uwarunkowania, wówczas należałoby również przeprowadzić prace w zakresie mechaniki, umożliwiające uzyskanie wskaźnika uwarunkowania na założonym poziomie.

5. Wzory podstawowe:

1. Szacowany błąd mnożenia i dzielenia :

$$f = A (1 + \varepsilon_a) B (1 + \varepsilon_b) (1 + \varepsilon_o)$$

$$f = \frac{A (1 + \varepsilon_a)}{B (1 + \varepsilon_b)} (1 + \varepsilon_o)$$

$$\varepsilon_{ab} = \varepsilon_a + \varepsilon_b + \varepsilon_o$$

2. Szacowany błąd dodawania i odejmowania :

$$f = [A(1 + \varepsilon_a) + B(1 + \varepsilon_b)] (1 + \varepsilon_o)$$

$$f = [A(1 + \varepsilon_a) - B(1 + \varepsilon_b)] (1 + \varepsilon_o)$$

$$\varepsilon_{ab} \leq \varepsilon_a + \varepsilon_o \quad \text{jeżeli } \varepsilon_a > \varepsilon_b$$

$$\varepsilon_{ab} \leq \varepsilon_b + \varepsilon_o \quad \text{jeżeli } \varepsilon_b > \varepsilon_a$$

$$\varepsilon_{ab} = \varepsilon_a + \varepsilon_o = \varepsilon_b + \varepsilon_o$$

gdzie:

$\varepsilon_a$  - błąd reprezentacji A ,

$\varepsilon_b$  - błąd reprezentacji B ,

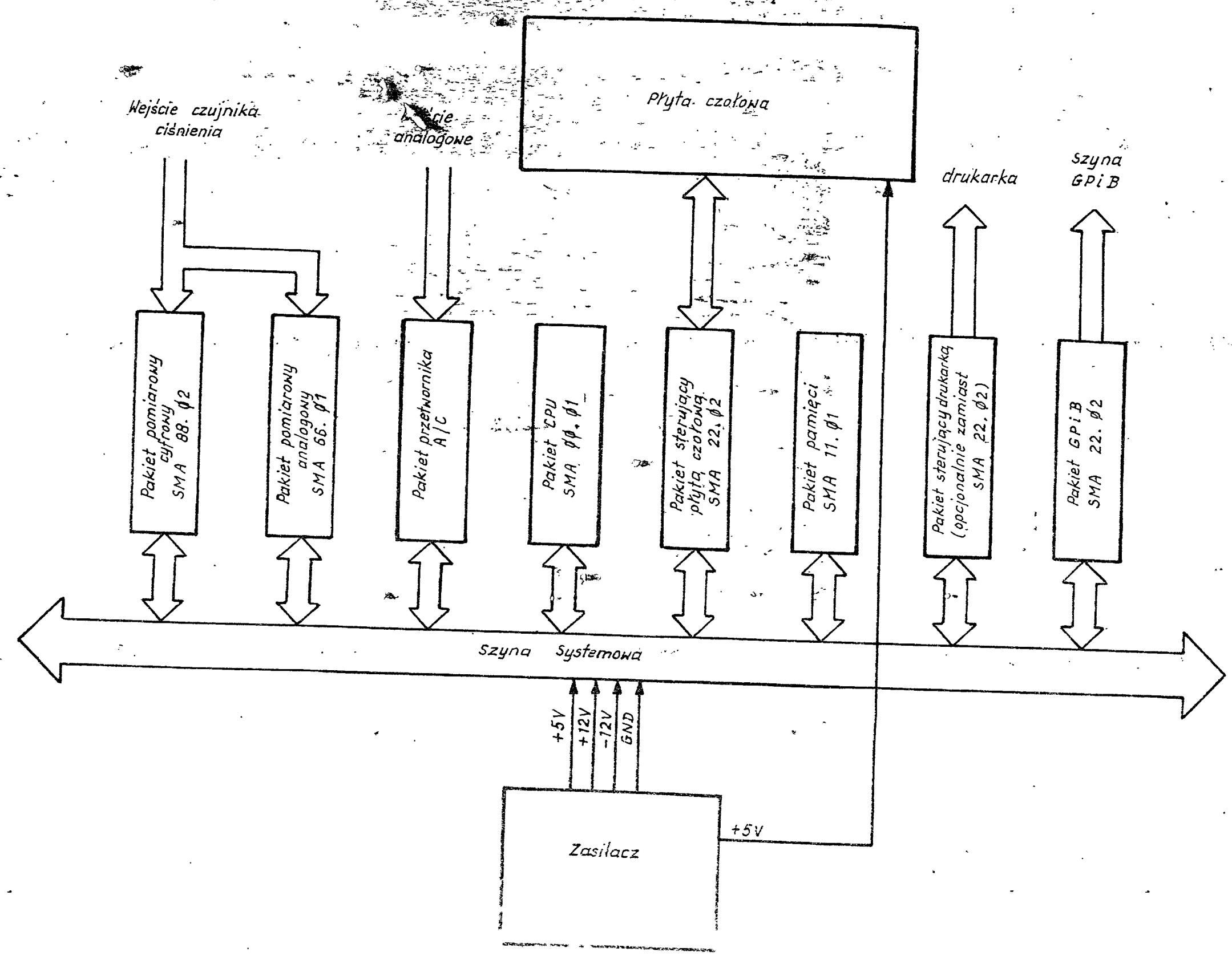
$\varepsilon_o$  - błąd operacji arytmetycznej,

$\varepsilon_{ab}$  - błąd wyniku operacji arytmetycznej .

3. Szacowany błąd wielomianu :

$$\left| \frac{\sum_i A (1 + \varepsilon_{ia}) B (1 + \varepsilon_{ib}) - \sum_i AB}{\sum_i AB} \right| =$$

$$= \left| \frac{\sum_i AB (\varepsilon_{ia} + \varepsilon_{ib})}{\sum_i AB} \right| \leq \max_i |\varepsilon_{ia} + \varepsilon_{ib}| \left| \frac{\sum_i |AB|}{\sum_i AB} \right|$$



Schemat blokowy mikroprocesorowego miernika cyfrowego

Charakterystyka przyjętego rozwiązania  
miernika cyfrowego do współpracy  
z czujnikami rezonatorowymi

Miernik zbudowany został w oparciu o następujące pakiety:

1. Pakiet procesora
2. Pakiet pamięci
3. Pakiet sterujący płytą czołową
4. Pakiet pomiarowy cyfrowy
5. Pakiet pomiarowy analogowy
6. Pakiet przetwornika A/C
7. Pakiet interfejsu GPIB

Pakiety te połączone są ze sobą poprzez szynę systemową kompatybilną z szyną systemu MSA-8000, w oparciu o którą produkowane są w zakładach "CEMI-SZCZYTNO" modułowe systemy mikroprocesorowe.

Zasilanie wszystkich pakietów odbywa się poprzez szynę systemową. Wyjątek stanowi zasilanie wyświetlaczy płyty czołowej, do której napięcie zasilające doprowadzone jest bezpośrednio z zasilacza. Wynika to ze stosunkowo dużego poboru prądu jaki potrzebny jest do zasilania wyświetlaczy. Napięć zasilających dostarcza typowy zasilacz produkowany przez ZDEMP-Gliwice.

Centralna jednostka sterująca miernika zbudowana jest na dwóch pakietach: pakiecie procesora i pakiecie pamięci.

Zestaw ten steruje pracą całego miernika oraz dokonuje odpowiednich obliczeń matematycznych, związanych z przyjętymi algorytmami.

Od strony przedniej miernika znajduje się płyta czołowa zawierająca system wizualizacji oraz klawiaturę do wprowadzania odpowiednich poleceń dla miernika.

Przy pomocy tej klawiatury możliwe jest również wprowadzanie parametrów równań aproksymujących charakterystyki czujników ciśnienia o wyjściach częstotliwościowych. Dane te wprowadzane są do pamięci miernika. Pamięć RAM, w której przechowywane są wszystkie parametry, posiada zasilanie buforowane akumulatorem, co pozwala na zapewnienie nieulotności tej pamięci po wyłączeniu zasilania.

Zespół płyty czołowej sterowany jest pakietem, który spełnia rolę bufora transmisji danych pomiędzy centralną jednostką sterującą a płytą czołową. Tak więc pakiet ten umożliwia przesyłanie sygnałów zadawanych z klawiatury do centralnej jednostki sterującej oraz przesyłanie sygnałów stanowiących treść wyświetlanych informacji z centralnej jednostki sterującej.

Podstawowym pakietem pomiarowym jest pakiet pomiarowy cyfrowy. Pakiet ten umożliwia dołączenie ośmiu czujników ciśnienia o wyjściach częstotliwościowych. Odczytywanie częstotliwości z tych czujników następuje w systemie multipleksowym. Centralna jednostka sterująca wysyła odpowiednie adresy do multipleksera wejściowego na tym pakiecie, co powoduje dołączenie wyjść wybranych czujników

do wejść pakietu. Pakiet obsługuje na raz dwa czujniki w systemie równoległym. Tak więc w danej chwili czasowej obsługiwane są dwa czujniki na raz.

Komunikacja pomiędzy miernikiem a urządzeniami zewnętrznymi odbywać się może po zainstalowaniu pakietu GPIB lub pakietu sterującego drukarką.

Poprzez pakiet GPIB możliwa jest współpraca z komputerem nadrzędnym a więc zarówno wysyłanie wszelkich informacji z miernika jak i zadawanie poleceń do miernika.

W przypadku zainstalowania pakietu sterującego drukarką możliwe jest wyprowadzanie wyników pomiarów na drukarkę.