

440

BE 10

OŚRODEK POMIARÓW RUCHU I CZASU

Główny wykonawca

mgr inż. Lech Nowakowski

Wykonawcy

mgr inż. Ignacy Bojanek
.....
.....

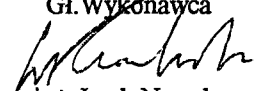
[„Przepływomierz masowy Coriolisa - badania pełne”]

[(tytuł pracy, numer i tytuł etapu)]

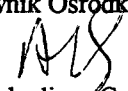
Zleceniodawca

PIAP

Gł. Wykonawca


mgr inż. Lech Nowakowski

Kierownik Ośrodka


mgr inż. Arkadiusz Cybulski

Prace zakończono dnia 22.04.97r

Nr arch. **7423**Nr zlecenia **S 1409**

Analiza dyskryptowa

Abstrakt

Tytuły poprzednich sprawozdań

Rozdzielnik

Egz. 1 **OIN**

Egz. 2 **ORC**

Egz. 3.

SPIS TREŚCI

STRONA

1.	Sprawy formalne.	3
1.1.	Przedmiot pracy.	3
1.2.	Podstawa wykonania pracy.....	3
2.	Opis prac wykonanych w wyniku realizacji tematu.....	3
3.	Opis badań.	3
3.1.	Omówienie wyników badań.	8
4.	Omówienie wyników prac związanych z opracowaniem.	9
	zmienionej konstrukcji czujnika przepływomierza.	

1. Sprawy formalne.

1.1. Przedmiot pracy.

Przedmiotem pracy jest zbadanie wykonanych w ramach wcześniej realizowanego zlecenia prototypów przepływomierza masowego Coriolisa i przygotowanie na tej podstawie dokumentacji do produkcji seryjnej.

1.2. Podstawa wykonania pracy.

Podstawą wykonania pracy jest zlecenie PIAP S1409 .

1.3. Zakres pracy.

Praca miała doprowadzić poprzez badanie prototypów do opracowania dokumentacji produkcyjnej przepływomierza masowego wykorzystującego efekt Coriolisa.

2. Opis prac wykonanych w wyniku realizacji tematu.

Badaniom poddano dwa prototypy czujników przepływomierza masowego: jeden dla zakresu przepływów 15 000 kg/h z rurami pomiarowymi o średnicy zewnętrznej 20mm i grubości ścianki 0.5 mm oraz drugi dla zakresu do 25 000 kg/h z rurami pomiarowymi o średnicy zewnętrznej 25 mm i grubości ścianki 0.6 mm.

Badania obejmowały wyznaczenie charakterystyk przetwarzania czujników z uwzględnieniem wpływu czynników zewnętrznych, określenie strat ciśnienia wprowadzanych przez czujniki a także badanie stabilności podstawowych parametrów w czasie.

Ze względu na stwierdzenie w trakcie badań efektu zmiany punktu zerowego czujników główny ciężar prac skoncentrowany został na badaniu przyczyny występowania tego zjawiska oraz próbach zmian w konstrukcji czujnika i przetwornika mikroprocesorowego mających na celu eliminację wspomnianego efektu. Jednocześnie rozszerzono zakres pracy o opracowanie nowej wersji konstrukcyjnej przepływomierza.

3. Opis badań.

Badania czujników wykonano w laboratorium DPQ na stanowisku pomiarowym umożliwiającym uzyskanie maksymalnego przepływu 30 000 kg/h i średnicy instalacji 50 mm z kalibrowanym zbiornikiem przelewowym.

Dla obu typów czujników wykonano serie pomiarów ,każda w 20 punktach pomiarowych ,dla różnych natężeń przepływów w pełnym zakresie pomiarowym czujników, w każdej serii powtarzając pomiary w kilku dowolnie wybranych punktach pomiarowych. Każdorazowo po zainstalowaniu czujnika na

stanowisku starannie odpowietrzano instalację. Przed rozpoczęciem pomiarów przez kilkanaście minut zadawano maksymalny przepływ dla wyrównania temperatur czujnika i wody znajdującej się w instalacji.

Kalibrację czujników przeprowadzono klasyczną metodą start-stop.

Po ustaleniu żądanej wartości natężenia przepływu otwierano zbiornik przelewowy. Kłapa zbiornika sprzężona jest z przerzutnikiem elektromechanicznym, którego styki są odpowiednio zwierane i rozwierane po otwarciu i zamknięciu kłapy zbiornika. Styki przerzutnika połączone są przez łącze szeregowo przetwornika mikroprocesorowego z układem pomiarowym. Otwarcie zbiornika i zwarcie styków przerzutnika inicjuje start procedury totalizera i sumowanie liczby impulsów odpowiadającej przesunięciom fazowym przeciwnych ramion czujnika we wszystkich kolejnych okresach drgań czujnika. Zamknięcie kłapy zbiornika i rozwarcie styków przerzutnika zatrzymuje proces sumowania. Zgromadzona w czasie otwarcia zbiornika liczba impulsów przechowywana jest w odpowiednich rejestrach i wyprowadzana na wyświetlacz cyfrowy. Liczba ta jest wprost proporcjonalna do masy wody zgromadzonej w zbiorniku w czasie jego otwarcia.

Po każdym pomiarze odczytywano ilość wody zgromadzonej w kalibrowanym zbiorniku. Na wyświetlaczu cyfrowym ilość impulsów zgromadzonych przez układ totalizera oraz liczbę okresów drgań czujnika w czasie pomiaru. Liczba ta pomnożona przez czas trwania jednego okresu pozwala wyznaczyć czas otwarcia zbiornika. Dla uniknięcia błędów związanych z czasem otwierania i zamykania kłapy zbiornika wybierano odpowiedni długi czas trwania pomiaru.

Tak otrzymane dane pomiarowe posłużyły do obliczenia stałych kalibracji każdego z czujników oraz do określenia występujących błędów pomiarowych. W większości przeprowadzonych serii pomiarowych uzyskano potwierdzenie dobrych własności metrologicznych dla obu typów badanych czujników, jednak w kilku przypadkach zaobserwowano efekt przesunięcia charakterystyk przetwarzania czujników, związany ze zmianą położenia „zera” czujnika w czasie trwania serii pomiarowej. Omawiane zjawisko powoduje znaczny wzrost błędu pomiarowego zwłaszcza w zakresie mniejszych natężeń przepływu. Ze względu na skokowy charakter zmiany punktu zerowego sądzono początkowo, że przyczyną zjawiska jest zapowietrzanie się instalacji w czasie pomiaru. Jednak dokładne odpowietrzanie instalacji po wykonaniu badań w każdym punkcie pomiarowym wyklucza taką możliwość. Jednocześnie po każdym ponownym zamontowaniu czujnika w stanowisku dokładnie sprawdzano jakość montażu aby wykluczyć możliwość zmiany położenia czujnika względem elementów instalacji zewnętrznej. W czasie trwania każdej serii pomiarowej kontrolowano wartość temperatury oraz ciśnienia wody w instalacji co pozwoliło na jednoznaczne wyeliminowanie wpływu tych czynników na występowanie opisywanego efektu.

Dalsze działania polegały na sprawdzaniu poszczególnych węzłów konstrukcyjnych mogących być źródłem niekontrolowanej zmiany położenia punktu zerowego.

W pierwszej kolejności sprawdzono prawidłowość działania układu stabilizacji amplitudy drgań rur pomiarowych i wprowadzono zmiany zwiększające dokładność działania układu automatycznej regulacji wzmocnienia.

Jednocześnie dokładnie skontrolowano prawidłowość mocowania cewki i magnesu stałego układu wzbudzającego do elementów nośnych konstrukcji czujnika aby wykluczyć możliwość zmiany ich położenia w wyniku długotrwałych drgań. Podobne sprawdzenie dotyczyło elementów optoelektronicznych czujników położenia realizujących pomiar przesunięcia fazowego.

Wprowadzono również zmiany w oprogramowaniu mikroprocesorowego przetwornika pomiarowego współpracującego z czujnikami polegające na wprowadzeniu dodatkowej procedury wprowadzania położenia miejsca zerowego czujnika. Jeden z przełączników monostabilnych wyprowadzonych na obudowę przetwornika wykorzystano do inicjacji procedury zerowania po zamontowaniu czujnika w instalacji. Po napełnieniu czujnika cieczą i zamknięciu przepływu wciśnięcie przycisku zerowania wyzwało procedurę odczytania liczby impulsów odpowiadających przesunięciu fazowemu w każdym kolejnym okresie drgań czujnika. Po zebraniu odpowiedniej ilości danych i odrzuceniu wartości skrajnych wartość średnia wprowadzana jest do pamięci jako „zero” czujnika. Czas trwania procedury w zależności od warunków pomiaru wnosi od 30 do 60 sekund. W przypadku dużych rozrzutów kolejnych wartości sygnalizowany jest błąd. Dopiero po wykonaniu zerowania możliwe jest uruchomienie pomiaru.

Dalsze badania polegały na powtarzaniu wielogodzinnych cykli pomiarowych sprawdzania „zera” każdego z czujników. Po zamontowaniu czujnika w stanowisku dokładnym jego odpowietrzeniu i wyzerowaniu, czujnik pozostawiano w instalacji przy zamkniętym przepływie sprawdzając zmianę wartości wskazania zerowego. Dla obu typów badanych czujników stwierdzono kilkakrotną zmianę wartości zerowej w nieregularnych odstępach czasu w wielodobowych cyklach pomiarowych. Zmiany wskazania zerowego przebiegały w obu kierunkach względem wartości początkowej i miały zawsze charakter skokowy, bez stałej tendencji malejącej ani rosnącej. Sposób wykonania badań zera, przy zamkniętym przepływie wyklucza związek zmiany wskazania zerowego z histerezą czujnika.

Maksymalne wartości odchylenia względem wartości początkowej dla obu typów czujników oraz ich wpływ na błąd pomiaru na krańcach zakresu przedstawiono w tabelach na końcu niniejszego punktu sprawozdania.

Jednocześnie dla pełniejszego obrazu w oddzielnych tabelach zestawiono podstawowe parametry obu czujników uzyskane w tych seriach pomiarów w których wartość wskazania zerowego utrzymywała stałą wartość w czasie trwania pełnej serii.

Próby zredukowania opisywanego efektu poprzez dokładną kontrolę i zmiany w tych węzłach konstrukcyjnych gdzie możliwa jest regulacja nie przyniosły w żadnym przypadku zauważalnych rezultatów.

Tabela 1. Wykaz podstawowych parametrów badanych czujników uzyskanych w seriach pomiarowych w których nie wystąpiła zmiana wskazania zerowego.

Rodzaj badanego czujnika	Zakres pomiarowy natężeń przepł. Q	Stała kalibracji K1	Stała K2	Strefa ciśnienia dla Q_{max}	Błąd pomiarowy
	kg/h	imp/kg	$\frac{\Delta \text{imp}}{\Delta Q=100\text{kg/h}}$	bar	%
Wersja czujnika z rur $\varnothing=20\text{mm}$	1500 ÷ 15000	42100	230	0,59	± 0,4
Wersja czujnika z rur $\varnothing = 25\text{mm}$	2500 ÷ 25000	27320	124,8	0,53	± 0,3

Tabela 2. Wykaz maksymalnych zmian wskazania zerowego i ich wpływ na wartość błędu pomiarowego.

Rodzaj czujnika	Maksymalna dodatnia zmiana „0”	Maksymalna ujemna zmiana „0”	Błąd pomiaru dla Q_{min}	Błąd pomiaru dla Q_{max}
	imp.	imp.	%	%
Czujnik z rurami $\varnothing 20$	18	13	5,1	0,51
Czujnik z rurami $\varnothing 25$	9	11	3,5	0,35

Tabela 3. Dane dotyczące strat ciśnienia wprowadzanych przez badane czujniki w zależności od natężenia przepływu.

Rodzaj czujnika	Wartość natężenia przepływu	Strefa ciśnienia Δp
	1000kg/h	bar
czujnik z rurami $\varnothing = 20 \text{ mm}$	5	0,1
	10	0,25
	15	0,53
	20	0,9
czujnik z rurami $\varnothing = 25\text{mm}$	5	0,04
	10	0,11
	15	0,23
	20	0,38
	25	0,59

3.1. Omówienie wyników badań.

Jak wynika z przedstawionych w tabelach danych pomiarowych zmiany wskazania zerowego mają zasadniczy wpływ na wielkość błędu pomiaru dla obu typów badanych czujników w szczególności dla dolnych wartości zakresu natężeń przepływu. Wpływ zmiany zera ma charakter dominujący w stosunku do innych czynników jak np. temperatura czy też ciśnienie wody w instalacji pomiarowej. Maksymalna zaobserwowana wartość błędu osiąga 5,1% wartości chwilowej dla czujnika o zakresie pomiarowym 15 000 kg/h i 3.5% dla czujnika o zakresie 25 000 kg/h. Wyklucza to możliwość stosowania czujników jako wiarygodnego przyrządu pomiarowego do rozliczeń masowych.

Jednocześnie ,należy podkreślić, że w wyniku przesuwania zera nie następowała zmiana stałych kalibracji czujników przepływu.

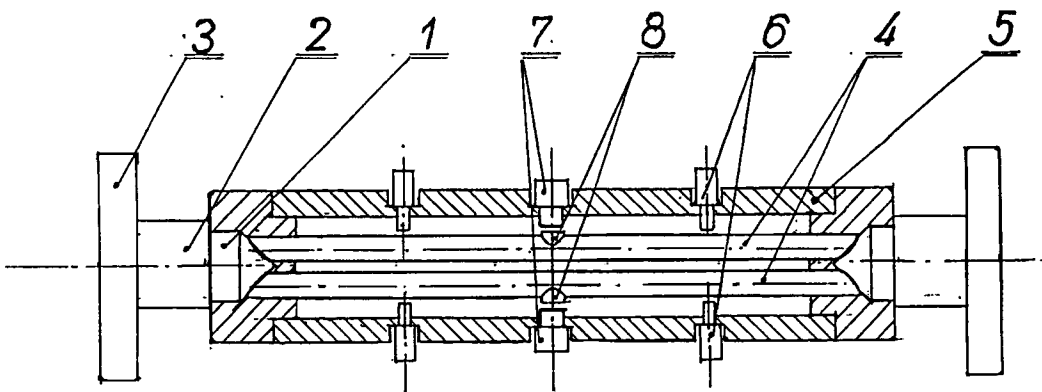
Analiza występującego efektu prowadzi do wniosku, że jego przyczyną jest nałożenie się kilku błędów technologicznych w fazie wykonywania i montażu poszczególnych elementów czujnika. Podstawowe źródło tego rodzaju błędów stanowiła technologia gięcia rur pomiarowych w kształt litery U. Zastosowany sposób gięcia polegający na wypełnianiu rur piaskiem, a następnie ich gięciu na gorąco pomimo zastosowania specjalnie opracowanego oprzyrządowania nie wykluczał w pełni możliwości pozostawienia naprężeń oraz lokalnych zmian strukturalnych w materiale rury. Jednocześnie niedokładności wymiarowe wynikające z zastosowanej technologii spowodowały konieczność doginania końców każdej z rur w trakcie ich montażu w rurze przepływowej (kolektorze). Dokładna ocena ilościowa opisanych efektów jest trudna do oceny ze względu na brak możliwości kontroli parametrów procesu. Oprócz naprężeń i zmian strukturalnych ,niedokładności wymiarowe są źródłem asymetrii całego układu pomiarowego. Innym etapem fazy wykonawczej prowadzącym do powstania naprężeń i zaburzeń w strukturze materiału rur pomiarowych mogło być spawanie do ich powierzchni podzespołów konstrukcyjnych służących do zamocowania elementów układu wzbudzania drgań i czujników położenia. Efektem występowania naprężeń mechanicznych i obszarów nieciągłości w strukturze materiału może być zmiana położenia osi i płaszczyzny względem której następuje skręcanie przeciwległych ramion każdej z pętli pomiarowych. Zmiana taka może następować w wyniku długotrwałych drgań jakim poddawane są rury pomiarowe. Opisana zmiana geometrii układu pomiarowego w czasie drgań objawia się niekontrolowaną zmianą fazy drgań każdej z pętli pomiarowych i związaną z tym skokową zmianą wartości wskazania zerowego czujnika. Dokładna analiza zjawiska wymagałaby

zastosowania badań defektoskopowych wykonanych prototypów czujników przepływomierza. Należy sądzić, że naprężenia mechaniczne wprowadzone w wyniku obróbki cieplnej, gięcia oraz spawania jak również wywołane tymi procesami niejednorodności materiału spowodowały zmianę podstawowych parametrów materiału, jak np. gęstość i wartość modułu sprężystości Younga. Nierównomierny rozkład tych zmian na poszczególnych odcinkach rur pomiarowych powoduje trudne do przewidzenia efekty po poddaniu ich ciągłym drganiom mechanicznym.

Próby konstrukcji czujnika przepływomierza o w pełni powtarzalnych parametrach metrologicznych z wykorzystaniem kształtowanych w różnej formie odcinków rur pomiarowych wymagają opanowania technologii gięcia i kształtowania rur. Technologia ta musi opierać się na nowoczesnych urządzeniach zapewniających pełną kontrolę parametrów procesu.

4. Opis wyników prac związanych z opracowaniem zmienionej konstrukcji czujnika przepływomierza.

Sformułowane powyżej wnioski skłoniły wykonawców do poszukiwania innej koncepcji rozwiązania. W wyniku konsultacji i przeglądu rozwiązań czujników masowych oferowanych przez różne firmy zachodnie podjęto próbę opracowania i wykonania prototypu czujnika z wykorzystaniem prostych odcinków rur pomiarowych. Szkicowy rysunek przedstawiający ideę takiej konstrukcji przedstawiono poniżej.



Końce równoległych odcinków rur pomiarowych osadzone są sztywno w komorach wlotowych (1) ukształtowanych w formie stożka dla zapewnienia równomiernego rozdziału strumienia doprowadzanej cieczy oraz wytworzenia równomiernego rozkładu ciśnienia. Komory wlotowe (1) przedłużone są krótkimi odcinkami rur (2) zakończonych kołnierzami (3) umożliwiającymi montaż czujnika w zewnętrznej instalacji. Komory wlotowe oraz rury pomiarowe (4)

umieszczone są symetrycznie wewnątrz grubościennej rury osłonowej (5) pełniącej funkcję dodatkowej szczelnej obudowy zewnętrznej, zabezpieczającej rury pomiarowe przed uszkodzeniem. Sztywna rura osłonowa zapewnić ma jednocześnie skuteczne tłumienie drgań pochodzących z instalacji zewnętrznej. Rura ta stanowi także element nośny konstrukcji na którym zamontowane są czujniki położenia (6) oraz cewki układu generacji drgań (7).

Na powierzchni bocznej każdej z rur pomiarowych w osi symetrii czujnika umieszczone są cylindryczne magnesy stałe układu wzbudzającego (8).

Współpracujące z nimi współśrodkowo cewki osadzone są w zewnętrznej rurze osłonowej. Czujniki przemieszczenia wykrywające różnicę fazy drgań pomiędzy przeciwnie położonymi względem środka punktami rur osadzone są symetrycznie po obu stronach cewek pomiarowych w rurze osłonowej.

Podstawową zaletą opisaną konstrukcji jest możliwość uniknięcia kłopotliwej technologii gięcia rur. Operacje spawania ograniczają się do zamocowania na powierzchni bocznej rur pomiarowych elementów służących do mocowania magnesów stałych układu wzbudzającego. Pozostałe podzespoły pomiarowe przepływomierza tzn. czujniki przesunięć oraz cewki układu wzbudzającego montowane są w zewnętrznej rurze osłonowej.

Proponowane rozwiązanie ułatwia zachowanie pełnej symetrii układu oraz zdecydowanie ogranicza ilość operacji technologicznych mogących wprowadzać naprężenia i zaburzenia strukturalne w materiale rur pomiarowych. Jednocześnie w znaczący sposób zredukowano masę elementów montowanych na rurach pomiarowych co zwiększa czułość układu na działanie przyspieszenia Coriolisa i ogranicza wielkość błędów pomiarowych. Rozmieszczenie wszystkich elementów zakończonych wyprowadzeniami w zewnętrznej rurze osłonowej całkowicie eliminuje problemy z prowadzeniem wiązek przewodów na drgających elementach konstrukcji. Wykluczona jest w ten sposób możliwość mechanicznego uszkodzenia połączeń jak również powstania dodatkowych drgań zakłócających pomiar wskutek oddziaływania pomiędzy wiązkami przewodów i stykającymi się z nimi drgającymi elementami konstrukcji.

Następną korzyścią wynikającą ze stosowania prostych rur przepływowych jest lepsze kształtowanie strumienia płynącej cieczy oraz równomierny rozkład ciśnienia. Zapobiega to skutecznie powstawaniu turbulencji i zaburzeń przepływu zakłócających pomiar.

W stosunku do wszelkich konstrukcji opartych na profilowanych rurach przepływowych omawiane rozwiązanie jest mniej podatne na gromadzenie się zanieczyszczeń. Możliwość optycznej kontroli drożności rur przepływowych bardzo ułatwia oczyszczanie czujnika z zanieczyszczeń zgromadzonych w czasie jego eksploatacji.

Praktyczna realizacja założonej koncepcji oprócz wymienionych zalet narzuca jednak dość istotne ograniczenie dotyczące długości rur przepływowych, ze względu na dostosowanie gabarytów czujnika do montażu w rzeczywistych instalacjach. W dotychczas stosowanym rozwiązaniu dzięki wygięciu rur

przepływowych w kształt litery U efektywna długość czujnika przepływomierza była ponad dwukrotnie mniejsza od długości rur pomiarowych.

Z wymienionych przyczyn konieczne będzie zastosowanie odcinków rur o długości prawie trzykrotnie mniejszej w stosunku do konstrukcji opartej na rurach wygiętych. Powoduje to znaczne zwiększenie sztywności całej konstrukcji, co wymaga zastosowania większej mocy układu wzbudzania drgań. Jednocześnie przy tych samych natężeniach przepływów maksymalna amplituda przesunięć związanych z występowaniem efektu Coriolisa będzie kilkakrotnie mniejsza. Narzuca to szczególnie ostre wymagania dotyczące dokładności zastosowanych czujników położenia. Z uwagi na mniejsze wartości przesunięć fazowych wymagane jest również zwiększenie częstotliwości generatora podstawy czasu w przetworniku mikroprocesorowym.

Zwiększenie mocy układu wzbudzającego oraz częstotliwości generatora nie stanowi istotnego problemu. Poważne trudności związane były z doбором odpowiednio dokładnych czujników przemieszczeń. W wyniku współpracy

nawiązanej z Instytutem Technologii Elektronowej oraz Instytutem Optoelektroniki WAT uzyskano ofertę wykonania światłowodowych czujników odbiciowych umożliwiających pomiar przesunięcia z dokładnością $\pm 2\mu\text{m}$.

W czujniku tym punktowa wiązka światła wysyłana przez światłowód nadawczy oświetla punkt na powierzchni badanego obiektu i powraca do światłowodu odbiorczego jako promieniowanie zmodulowane proporcjonalnie do przesunięcia obiektu względem czujnika. Bardziej szczegółowy opis zasady działania tego typu czujników oraz różne metody ich realizacji opisano w artykule stanowiącym załącznik do sprawozdania.

W przyjętej koncepcji rozwiązania zakładano użycie czterech takich czujników pracujących parami. Każda para czujników zamontowana jest w rurze osłonowej dokładnie naprzeciw siebie wzdłuż osi prostopadłej do płaszczyzny względem której wzbudzone są drgania. Pary współpracujące położone są w przeciwległych punktach symetrycznych względem środka rur przepływowych.

Sygnal każdego z czujników dokładnie odzwierciedla ruch punktu na rurze przepływowej naprzeciw której umieszczony jest czujnik.

Układ elektroniczny współpracujący z każdą parą czujników wyznacza różnicę sygnałów tych czujników i określa położenie czasowe kolejnych maksimum, generując odpowiedni sygnał logiczny w chwili wystąpienia maksimum. Różnica czasowa pomiędzy wystąpieniem tych sygnałów w przeciwległych parach czujników określa wartość przesunięcia fazy drgań równoległych rur pomiarowych pomiędzy wlotem i wylotem czujnika, która jest wprost proporcjonalna do natężenia przepływu masy.

Próby przeprowadzone z kilkoma modelami czujników odbiciowych nie potwierdziły zakładanej dokładności pomiaru przesunięcia. Stwierdzono znaczną

nieliniowość charakterystyk czujników powyżej zakresu 0.5 mm oraz brak powtarzalności pomiarów. Zmiany konstrukcyjne proponowane przez zespół z ITE polegające na zastosowaniu światłowodów o lepszej jakości oraz zmianie przetwornika elektronicznego układu zakładały wzrost kosztów wykonania jednego czujnika do ok. 2500 zł. bez pełnej gwarancji uzyskania zakładanych parametrów. Problemy z uzyskaniem wystarczającej dokładności i zakresów badanych przesunięć w kilku działających modelach czujników odbiciowych nie dawały dostatecznej gwarancji wykonania w pełni powtarzalnych prototypów, pomimo zakładanych zmian konstrukcyjnych.

Z wymienionych przyczyn oraz z uwagi na bardzo wysoki koszt wykonania jednego kompletu czujników zrezygnowano z zamówienia prototypów.

Brak dostatecznie dokładnych czujników przemieszczeń stał się przyczyną rezygnacji z praktycznej realizacji czujnika przepływomierza masowego z wykorzystaniem prostych odcinków rur przepływowych. Pracę przerwano na etapie wykonania szkicowej dokumentacji konstrukcyjnej czujnika przepływomierza i niektórych detali.

Jednocześnie wydaje się, że w związku opisanymi wcześniej problemami technologicznymi wybrana koncepcja rozwiązania stanowi jedyną realną możliwość wykonania powtarzalnych egzemplarzy czujników przepływomierza masowego Coriolisa o dokładności zapewniającej ich stosowanie w rozliczeniach masowych.

Światłowodowy czujnik odbiciowy do pomiarów przesunięć submikronowych

JAN BAR

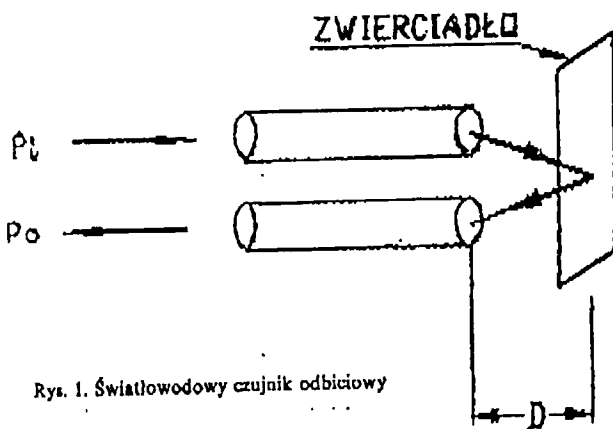
Rozwój światłowodowej techniki telekomunikacyjnej przyczynił się do powstania wielu typów czujników światłowodowych. Czujnik taki przekształca mierzony sygnał na zmianę albo modulację fazy lub amplitudy promieniowania transmitowanego światłowodem.

Światłowodowe czujniki odbiciowe są proste, w praktycznym użyciu nie wymagają skomplikowanych elektrycznie i mechanicznie układów pomiarowych, zapewniając wystarczającą czułość dla wielu zastosowań. Doprowadzone światłowodem promieniowanie, oświetlające badany obiekt, powraca do światłowodu odbiorczego jako zmodulowane proporcjonalnie do przesunięcia obiektu.

Światłowodowe czujniki interferencyjne, wykrywające zmianę fazy, chociaż są bardzo czułe, nie są odporne na szum fazowy, który powstaje w jednomodowych światłowodach pod wpływem zmian ciśnienia temperatury otoczenia. Kompensacja tych zmian znacznie komplikuje układy pomiarowe z tymi czujnikami.

Światłowodowy czujnik odbiciowy

Pomysł zastosowania światłowodu do wykonania odbiciowego czujnika przesunięcia opatentowano w USA w latach 1966-1967 [1, 2]. Od tamtej pory światłowodowe czujniki odbiciowe zastosowano w wielu dziedzinach techniki [3]. Prosty czujnik (rys. 1) składa się ze światłowodu nadawczego, z którego końca jest emitowana całkowita moc optyczna promieniowania P_0 , docierająca do ruchomego zwierciadła, oraz ze światłowodu odbiorczego, do którego wnika moc P_1 , odbita od zwierciadła. Współczynnik transmisji mocy wynosi $\eta = P_1/P_0$. Działanie odbiciowego czujnika światłowodowego, zbudowanego ze światłowodu o skokowej zmianie współczynnika załamania (ang. *step index*) według [3, 4] jest następujące (rys. 2).

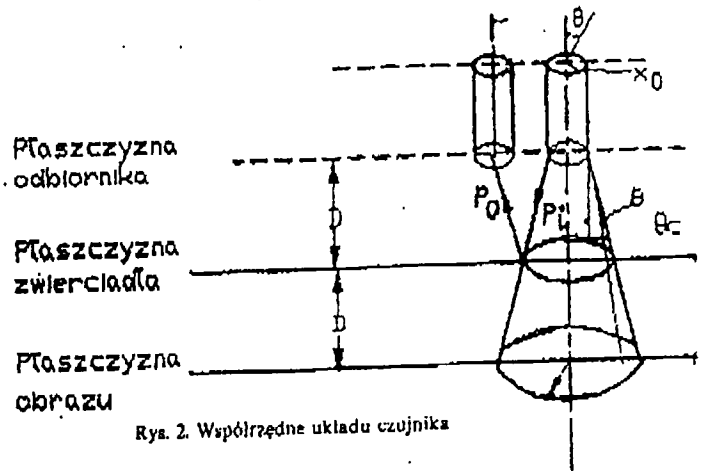


Rys. 1. Światłowodowy czujnik odbiciowy

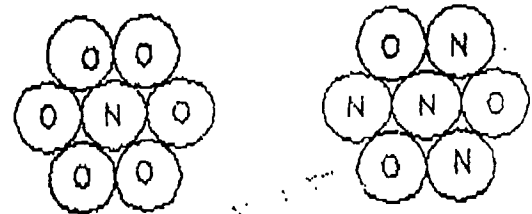
Promieniowanie wprowadzone do światłowodu nadawczego opuszcza go pod maksymalnym kątem odcięcia $\theta_c = \arcsin(NA/n)$ i tworzy rozkład intensywności w płaszczyźnie odbiornika. NA jest tutaj aperturą numeryczną światłowodu, natomiast n - współczynnikiem załamania promieniowania w otoczeniu.

Czujnik dwuświatłowodowy (rys. 1) odbiera jedynie niewielką część mocy P_1 . Pokazane na rys. 3 zakończenia czujników składających się z siedmiu światłowodów pozwalają na odbieranie większej ilości mocy odbitej, gdyż moc promieniowania docierająca do fotodetektora $P_1 = NP_0$, zaś $N = 6$ dla układu z rys. 3a i $N = 9$ dla układu z rys. 3b.

Zastosowanie w konstrukcji czujnika sprzęgacza światłowodowego typu „Y” pozwala na wykonanie go z jednoświatłowodowym zakończeniem, a tym samym jego miniaturyzację.



Rys. 2. Współrzędne układu czujnika



Rys. 3. Przykładowe zakończenia czujnika: N - światłowod nadawczy, O - światłowod odbiorczy

Definicje podstawowych parametrów

Czułość na przesunięcie jest definiowana względem zmiany mocy P_1 wywołanej zmianą odległości D i wyraża się wzorem:

$$S_d = pR_f d(P_1)/dD = pNR_f P_1 \Gamma = pR_f P_1 Q_d \quad [V/m]$$

gdzie:

- p - czułość bezwzględna fotodetektora [A/W],
- R_f - rezystancja obciążenia fotodetektora [Ω],
- N - efektywna liczba światłowodów odbiorczych,
- Q_d - współczynnik modulacji,

$$Q_d = 1/P_1 d(P_1)/dD = \Gamma/n \quad [1/m]$$

Znormalizowana czułość:

$$\Gamma = d(\eta)/dD \quad [1/m]$$

(η) znormalizowana zmiana odbieranej mocy optycznej czujnika światłowodowego.

Minimalna wykrywalne przesunięcie jest zdefiniowane jako minimalna wykrywalna zmiana odległości D , ograniczona szumami śrutowymi fotodetektora:

$$\Delta D_{min} = \frac{1}{\theta_c} \left(\frac{2 \cdot e \cdot B}{p P_1} \right)^{1/2}$$

gdzie:

- e - ładunek elektronu [As]
- B - pasmo energetyczne [Hz]

Zakres dynamiczny czujnika:

$$DY = 20 \log \frac{Y}{\Delta D_{min}} = 20 \log \left\{ Y Q_d \left(\frac{p P_1}{2eB} \right)^{1/2} \right\} \quad [dB]$$

gdzie Y - maksymalny przedział liniowości czujnika, w którym czułość S_d jest prawie stała. W tym przedziale sygnał wyjściowy czujnika jest linowo proporcjonalny do zmian odległości D . Przedział liniowości można określać dla zmiany czułości S_d wynoszącej 1,5 lub 10%.

14

Najważniejszy spośród parametrów jest znormalizowana czułość Γ . Jej wartość jest uzależniona od odległości czujnik-zwierciadło. Istotny wpływ na zależność $\Gamma = f(D)$ mają parametry światłowodu – apertura numeryczna NA , stosunek promienia płaszczu r_0 do promienia rdzenia x_0 światłowodu oraz odległość pomiędzy osiami światłowodów.

Na podstawie zależności $\Gamma = f(D)$ można, stosując przytoczone wyżej wzory, obliczyć podstawowe parametry czujnika. Przebieg zależności $\Gamma = f(D)$ podano w [6]. Wpływ parametrów światłowodu na parametry czujnika pokazano w tabeli.

Wykonano wiele światłowodowych czujników odbiciowych składających się z jednego oraz siedmiu światłowodów „step index” PCS o średnicy rdzenia 200 μm , średnicy płaszczu 380 μm i apertury numerycznej 0,37. Przekrój zakończenia czujnika pokazano na rys. 4.

Wyniki pomiarów

Typowe, zmierzone zależności parametrów czujnika 7-swiatłowodowego od odległości pokazano na rys. 5, natomiast czujnika jednoświatłowodowego ze sprzęgaczem „Y” na rys. 6.

Parametry czujników odbiciowych:

$S_{D_{max}}$ 200...1080 V/m

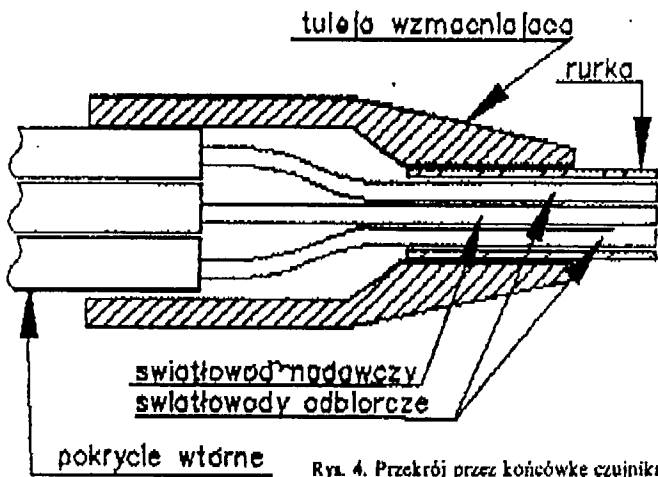
D_{opt} 550...1000 μm

D_{min} 2,3...15,0 $\times 10^{-11}$ m

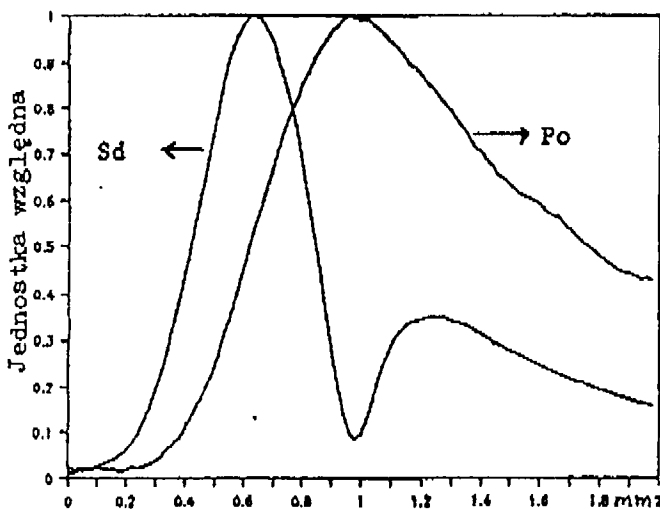
Zależność parametrów czujnika odbiciowego od parametrów światłowodu

	NA	r_0/x_0	x_0	r_0
Γ	+	-	+	-
S_d	+	-	+	-

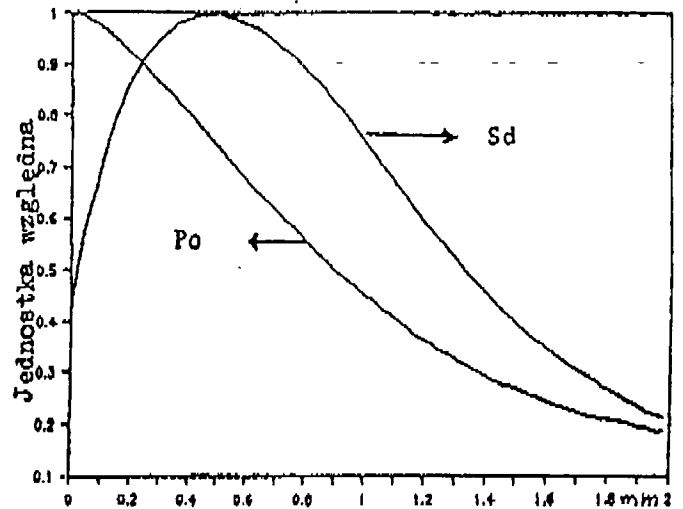
+ wpływ wprost proporcjonalny
- wpływ odwrotnie proporcjonalny



Rys. 4. Przekrój przez końcówkę czujnika



Rys. 5. Charakterystyka czujnika 7-swiatłowodowego w funkcji odległości



Rys. 6. Charakterystyka czujnika 1-swiatłowodowego w funkcji odległości

Uzyskane wartości czułości na przesunięcie S_d i minimalne wykrywalne zmiany przesunięcia ΔD_{min} stawiają wykonane czujniki w rzędzie czułych, prostych i jednocześnie odpornych na zakłócenia elektryczne oraz narażenia mechaniczno-klimatyczne detektorów drgań. Szerokość pasma wykrywanych drgań jest ograniczona jedynie przez układ wzmacniający i może dochodzić do setek megaherców.

Należy podkreślić, że prezentowane wyniki uzyskano dla czujników wykonanych ze światłowodu o parametrach dalekich od optymalnych, bez stosowania wyszukanych układów elektronicznych. Czujniki, w których zastosowano światłowody o lepszych właściwościach pozwalają na uzyskanie zdolności rozdzielczej D_{min} mniejszej o dwa rzędy wielkości.

Uwagi końcowe

Wykonane czujniki i wyniki pomiarów ich parametrów wykazały możliwość skonstruowania dobrze działających światłowodowych czujników odbiciowych. Użycie w konstrukcji czujników światłowodów „step index” o cieńszym płaszczu, przykładowo typu HCS firmy 3M, oraz źródeł promieniowania o większej mocy pozwoli zwiększyć rozdzielczość o 2...3 rzędy wielkości. Parametry czujników pozwalają przewidzieć wiele możliwości ich zastosowań. Jednym z nich może być mikrofon i ciśnieniomierz światłowodowy.

Czujniki mogą być stosowane w agresywnym środowisku, w szerokim zakresie temperatury, ograniczonym raczej przez obudowę czujnika niż przez światłowód. Samo zastosowanie światłowodu pozwala na oddalenie czułego, elektronicznego układu pomiarowego od miejsca pomiaru, które może znajdować się we wnętrzu reaktora jądrowego, na zaporze wodnej lub w tunelu aerodynamicznym. Odbiciowe czujniki światłowodowe są także stosowane w medycynie do ciągłego pomiaru ciśnienia krwi.

Literatura

- [1] W.E. Frank: *Detection and measurement device having a small flexible fiber transmission line*. U.S. Patent 3,273, 447, 20 Sept. 1966.
- [2] C.D. Kissinger: *Fiber optic proximity probe*. U.S. Patent 3,327,384, 27 Sept. 1967.
- [3] R.O. Cook, C. W. Hamm: *Fiber optic lever displacement transducer*. Applied Optics, vol. 18, no. 19 Oct. 1979.
- [4] G. He, F. Cuomo: *A light intensity function suitable for multimode fiber-optic sensors*. IEEE J. of Lightwave Technol., vol. 9, no. 4, Apr. 1991.
- [5] T.G. Giallorenzi et. al.: *Optical fiber sensor technology*. IEEE J. of Quantum Electronics, vol. QE-18, no. 4, Apr. 1982.
- [6] G. He, F. Cuomo: *Displacement Response, detection limit and dynamic range of fiber-optic lever sensors*. IEEE J. of Lightwave Technol., vol. 9, no. 11, Nov. 1991.