

WYKAZ WAŻNIEJSZYCH OZNACZEŃ

- A – powierzchnia tensometru
 C_k – pojemności kształtki czujnika kwarcowego
 d – gęstość właściwa
 E – moduł Younga
 F – siła
 f – częstotliwość
 f_0 – częstotliwość rezonansowa
 H_v – twardość wg Knoppa
 k – wektor falowy
 K – stała piezoelektryczną
 l – długość tensometru
 R_m – wytrzymałość mechaniczna
 p – ciśnienie
 p_t – ciśnienie dynamiczne
 p_s – ciśnienie całkowite
 p_{st} – ciśnienie statyczne
 p_{am} – amplituda ciśnienia akustycznego
 R_a – rezystancja rezonansowego obwodu zewnętrznego
 Q – ładunek elektryczny
 S – powierzchnia
 t – czas
 U – napięcie
 V_0 – prędkość przepływu
 α – współczynnik rozszerzalności cieplnej
 $^*\alpha_{ij}$ – współczynnik czułości na naprężenia
 σ_{ij} – składowe naprężeń mechanicznych w układzie współrzędnych prostokątnych
 σ_r – składowa promieniowa naprężeń
 σ_r, σ_l – składowe naprężenia poprzeczną i wzdłużną.
 λ – współczynnik przewodnictwa cieplnego
 ρ – rezystywność materiału
 π_r, π_l – współczynniki w kierunku odpowiednio wzdłużnym i poprzecznym
 ν – współczynnik Poissona

1. WSTĘP

Jakkolwiek może to zabrzmieć zbyt patetycznie, to w warunkach ziemskich trudno sobie wyobrazić sytuację, w której ciśnienie nie oddziaływałoby na materię zarównożywioną, jak i nieożywioną. Fakt ten znajduje odbicie w literaturze naukowej począwszy od XVII wieku. Potwierdza to spostrzeżenie zaczerpnięte z listu Evangelisty Torricelliego pisanego w 1664 roku do Michelangela Ricci: „Żyjemy zanurzeni w oceanie powietrza i wiemy, dzięki niepodważalnym doświadczeniom, że powietrze ma ciężar” [129]. Od tego czasu datuje się nieprzerwane zainteresowanie zjawiskiem ciśnienia – zarówno teorią, jak i metodami jego pomiaru. Obserwowany w XX wieku szybki rozwój cywilizacyjny stał się stymulatorem niezwykle dynamicznego rozwoju metod i technik pomiarowych. Szczególnie upowszechnienie elektronicznego przetwarzania informacji (technik komputerowych) wymusiło gwałtowny rozwój technologii czujników wielkości nieelektrycznych, które stały się „zmysłami” większości inteligentnych systemów pomiarowych. Zagadnienie pomiaru ciśnienia jako wielkości wskazującej na poprawność lub niepoprawność działania organizmów żywych, instalacji przemysłowych czy prognozowania zjawisk przyrodniczych stało się więc jedną z najbardziej dynamicznie rozwijających się dziedzin metrologii. W ostatnich dwóch dekadach obserwuje się duże zainteresowanie pracami badawczymi tak konstrukcyjnymi, jak i technologicznymi, dotyczącymi czujników ciśnienia, a także ich aplikacjami w takich dziedzinach jak motoryzacja, medycyna, przemysł spożywczy czy ochrona środowiska.

Z wymienionych wyżej powodów autorka podjęła próbę metodologicznego przedstawienia zagadnień związanych z przyrządami do pomiaru ciśnienia, zwłaszcza zasad ich działania, technologii wytwarzania oraz przystosowania do różnorodnych zastosowań. Niniejsza monografia składa się z sześciu rozdziałów. W rozdziale 2 przedstawiono podstawowe definicje, jednostki, rodzaje ciśnień, zjawiska (metody) wykorzystywane do pomiaru ciśnień oraz ogólną klasyfikację przyrządów do pomiarów ciśnień.

W rozdziale 3 omówiono materiały, konstrukcje i technologie stosowane do wytwarzania czujników ciśnienia, ze szczególnym uwzględnieniem najnowszych osiągnięć technologicznych m.in. mikromechaniki krzemowej. W rozdziale tym poświęcono szczególną uwagę technologiom montażu czujników ciśnienia oraz możliwościom ich zastosowań. Zostało to spowodowane faktem, że w przeciwieństwie do produkcji struktur czujników (szczególnie krzemowych), montaż czujników w obudowach własnej konstrukcji i oferowanie ich do nietypowych aplikacji nie wymaga zbyt dużych nakładów finansowych. Prace tego typu można wykonywać nawet w niedużych, specjalizowanych firmach. Jak wykazały wieloletnie obserwacje rynku, zakup czujników w postaci struktur, a następnie wykonanie montażu w specjalizowanej firmie jest metodą pozwalającą na uzyskanie najlepszych efektów ekonomicznych w tej branży, gdyż struktura czujnika stanowi na ogół nie więcej niż 10 % kosztów wytworzenia obudowanego i skalibrowanego czujnika [51].

W rozdziale 4 omówiono zagadnienia wykorzystania czujników do konstrukcji i wytwarzania przetworników ciśnienia, różnicy ciśnień i poziomu przeznaczonych do zastosowań przemysłowych. Przedstawiono konstrukcje głowic pomiarowych, układów przetwarzających, układów wejść/wyjść. Ponadto omówiono metody kompensacji błędów

przetworników, jak również metody podwyższania niektórych ich parametrów eksploatacyjnych. W rozdziale tym rozważono również problemy eksploatacyjne przetworników ciśnienia przeznaczonych do pracy w różnych obszarach zagrożeń. Zwrócono także uwagę na problemy związane z iskrobezpieczeństwem oraz ochroną czujników przed niepożądanym działaniem środowiska pomiarowego.

Rozdział 5 jest poświęcony systemom pomiarowym zawierającym przyrządy do pomiaru ciśnienia. Po krótkim omówieniu przyrządów laboratoryjnych, szczególną uwagę zwrócono na przyrządy przenośne (kalibratory ciśnienia).

W rozdziale 6 przedstawiono krótką prognozę rozwoju konstrukcji i technologii przyrządów do pomiaru ciśnienia, a także kilka uwag na temat aspektów ekonomicznych związanych z tą dziedziną. Natomiast w Załączniku autorka przedstawiła prace związane z pomiarami, w których sama brała aktywny udział.

Z uwagi na to, że literatura dotycząca montażu czujników jest publikowana głównie w języku angielskim, typowe terminy występujące w niniejszej pracy są podane w nawiasach po angielsku. Definicje polskie oraz tłumaczenia niektórych terminów oparto na wydanych przez Instytut Technologii Elektronowej słowniczku pt. „Angielskie terminy technologiczne w mikromechanice” [48].

Jak wspomniano wcześniej, intencją autorki było, aby przykłady realizacji konkretnych przyrządów pomiarowych prezentowanych w monografii były zaczerpnięte bądź z prac, w których sama brała udział, bądź z prac prowadzonych w polskich ośrodkach badawczych. Natomiast do minimum zostały ograniczone przykłady konstrukcji podobnych przyrządów wytwarzanych przez światowe firmy, gdyż są one szeroko przedstawione na powszechnie dostępnych internetowych stronach tych firm [121].

Autorka pragnie wyrazić pogląd, że ma świadomość, iż zawarte w pracy rozważania – z uwagi na interdyscyplinarność i ogromną różnorodność rozwiązań technicznych – nie wyczerpują wszystkich zagadnień tej szerokiej dziedziny. Autorka ma jednak nadzieję, że przedkładana praca okaże się interesującą i użyteczną dla osób związanych z tą tematyką badań, a może również być pomocna dla studentów odpowiednich wydziałów i kierunków szkół technicznych.

2. PODSTAWOWE DEFINICJE I METODY POMIARU CIŚNIENIA

2.1. Zarys historii pomiarów ciśnienia

W nowożytnej historii techniki pierwsze prace związane z badaniami istoty ciśnienia i metod jego pomiarów datuje się od Galileusza. W 1586 r. **Galileusz, Galileo Galilei** (1564-1642), włoski fizyk, astronom i filozof, zbudował pompę hydrostatyczną. W 1594 r. uzyskał patent na maszynę do pompowania wody z rzeki dla systemu irygacyjnego. Urządzenie działało na zasadzie strzykawki. Galileusz odkrył, że pompa może zassać wodę tylko do wysokości 10 m, jednak nie potrafił wytłumaczyć tego zjawiska.

Evangelista Torricelli (1608-1647), włoski fizyk i matematyk, uczeń Galileusza, wykazał doświadczalnie istnienie ciśnienia atmosferycznego. Rurę o wysokości 1 m hermetycznie zamkniętą z jednej strony napełnił rtęcią. Po obróceniu rury o 180 stopni, wysokość słupa rtęci zawsze opadał do tego samego poziomu (760 mm). Torricelli wytłumaczył to zjawisko siłą przyciągania ziemskiego; ponadto stwierdził, że przestrzeń nad rtęcią jest pusta i nazwał ją próżnią. Torricelli podał również prawo mówiące, że prędkości wypływu cieczy z naczynia jest zależna od wysokości słupa cieczy w tym naczyniu.

Blaise Pascal (1623-1662) w 1653 r. wytłumaczył doświadczenia Galileusza i Torricellogo, stwierdzając, że wysokość rtęci w kolumnie utrzymywana na poziomie 760 mm odpowiada ciężarowi powietrza znajdującego się powyżej. Przewidział, że wysokość słupa rtęci będzie się zmniejszać wraz ze wzrostem wysokości nad poziomem morza i na tej podstawie wyliczył ciężar powietrza.

Otto von Guericke (1602-1686), niemiecki fizyk i wynalazca, w 1650 r. wynalazł pompę próżniową, w 1654 r. wykonał doświadczenie z tzw. półkulami magdeburskimi wykazujące istnienie ciśnienia atmosferycznego. Doświadczenie polegało na wyszaniu przez pompę próżniową powietrza pomiędzy dwóch dużych metalowych półkul, pomiędzy którymi znajdował się tylko uszczelniający smar, następnie do każdej z półkul zaprzęgnięto po osiem koni, które nie były w stanie ich rozerwać. Guericke zbudował pierwszy barometr wodny, za pomocą którego wyznaczył ciśnienie powietrza i stwierdził jego zależność od wysokości nad poziomem morza i stanu pogody.

Robert Boyle (1627-1691), angielski chemik, fizyk i filozof; współtwórca nowoczesnej chemii, sformułował jedno z podstawowych praw gazowych, mówiące, że w ustalonej temperaturze objętość V danej masy gazu jest odwrotnie proporcjonalna do ciśnienia p . Prawo to nosi nazwę Boyle'a-Mariotte'a. Mariott odkrył je niezależnie od Boyle'a w 1676 r.

Louis Joseph Gay-Lussac (1778-1850), francuski fizyk i chemik, w 1802 r. sformułował jedno z podstawowych praw gazowych (prawo Gay-Lussaca) opisujące proces izobaryczny i głoszące, że objętość V danej masy gazu rośnie wprost proporcjonalnie do jego temperatury bezwzględnej T przy stałym ciśnieniu. Gay-Lussac sformułował również jedno z podstawowych praw chemicznych zwane prawem stosunków objętościowych.

Eugene Bourdon (1808-1884), francuski inżynier i przemysłowiec, skonstruował jedno z pierwszych mechanicznych urządzeń do pomiaru ciśnienia – metalowy manometr oraz jeden z typów barometrów metalowych. Wykorzystując opatentowany w 1843 r.

przez **Luciena Vidie** anemometr sprężynowy, opracował ciśnieniomierz oparty na odpowiednio wyprofilowanej, metalowej rurce, która nosi nazwę rurki Bourdona.

W 1930 r. zbudowano we Francji pierwszy przetwornik ciśnienia z sygnałem elektrycznym. Przyrząd działał na zasadzie ruchu mieszka, membrany lub rurki Bourdona, które połączone z suwakiem potencjometru, powodowały zmianę rezystancji tegoż potencjometru [21, 87].

W 1938 r. w Kalifornijskim Instytucie Technologicznym opracowano metalowe tensometry do pomiaru ciśnienia, siły i naprężeń. W 1958 r. firmy Kulite, Honeywell i Microsystem wprowadziły na rynek pierwsze komercyjne tensometry krzemowe. W 1966 r. firma Honeywell opracowała pierwszy krzemowy czujnik ciśnienia, którego cienka membrana była wytwarzana metodą drażenia elektronowego. Czujniki wykonywane według tej technologii były produkowane w Polsce w latach 70. i 80., w Mera Pnfał i OBREUS Toruń, na podstawie licencji firmy Honeywell [16].

W 1976 r. w USA przedstawiono pierwsze czujniki z membraną wykonaną metodą trawienia anizotropowego. W Polsce pierwsze czujniki z trawionymi membranami zostały opracowane i wdrożone do produkcji w połowie lat 80. przez Mera Pnfał i OBREUS Toruń. Prace nad nowymi technologiami czujników ciśnienia były prowadzone również w Instytucie Technologii Elektronowej w Warszawie oraz w Instytucie Technologii Elektronowej Politechniki Wrocławskiej [36, 121, 128]. W latach 80. i 90. ubiegłego stulecia obserwowano ogromny rozwój technologii czujników ciśnienia, szczególnie technologii krzemowych. Powstały serie czujników obejmujących zakresy ciśnień od 100 mbar do 1500 bar.

Obecnie pracuje się nad zintegrowanymi mikrosystemami pomiarowymi zawierającymi w jednej strukturze, oprócz wielu czujników różnych wielkości (ciśnienie, ciśnienie absolutne, temperatura) i elementów wykonawczych (zawory, pompki), również bardzo rozbudowane układy elektroniczne i oprogramowanie pozwalające na realizację różnorodnych funkcji i pomiarów.

2.2. Ciśnienie – podstawowe definicje i pojęcia

Przez ciśnienie rozumiemy proces oddziaływania jednego ośrodka na drugi poprzez powierzchnię oddzielającą. Kształt powierzchni może być dowolny, w szczególnym przypadku może być płaski [87]. Efektem oddziaływania ciśnienia jest siła jaką jeden ośrodek wywiera na drugi. Zgodnie z przyjętą definicją [21], ciśnienie rozumie się jako stosunek siły z jaką jeden ośrodek oddziałuje na drugi ośrodek przez elementarną powierzchnię tj.:

$$p = \lim_{\Delta S \rightarrow 0} \frac{\Delta F}{\Delta S} = \frac{\Delta f}{\Delta s} \quad (2.1)$$

Jeżeli siła oddziaływania F jest rozłożona równomiernie na powierzchni S , to zależność (2.1) upraszcza się do postaci:

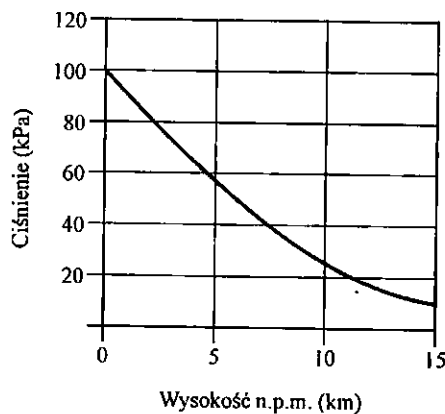
$$p = \frac{F}{S} \quad (2.2)$$

Podstawowym prawem sformułowanym dla cieczy nieściśliwych jest prawo Pascala. Zgodnie z tym prawem, ciśnienie wywierane z zewnątrz na ciecz w stanie spoczynku rozchodzi się jednakowo we wszystkich kierunkach i ma w całej objętości cieczy jednakową wartość, równą wywieranemu ciśnieniu. Parcie jest skierowane prostopadłe do ścian naczynia, w którym znajduje się ciecz. Ciśnienie to nazywa się **ciśnieniem statycznym**.

Powyższa konkluzja ma również znaczenie praktyczne. Została ona wykorzystywana w wielu urządzeniach np. w hamulcach hydraulicznych czy w prasie hydraulicznej.

W warunkach ziemskich rozważania związane z ciśnieniem muszą uwzględniać powszechne oddziaływanie grawitacji. Należy w związku z tym podchodzić z rozwagą do pomiaru ciśnienia na granicy różnych ośrodków, szczególnie pamiętając, że niektóre podstawowe prawa odnoszące się do ciśnienia mogą nie uwzględniać tego zjawiska. W związku z powyższym, na ciecz znajdującą się w naczyniu, obok ciśnienia statycznego, oddziałuje również **ciśnienie hydrostatyczne** wywołane ciężarem cieczy. Jego wartość jest zależna tylko od słupa cieczy (głębokości zanurzenia) i jej ciężaru właściwego. Ciśnienie wywierane na dno naczynia nie zależy od kształtu naczynia. Stwierdzenie to nazywa się paradoksem hydrostatycznym [9, 21]. Jak stwierdzono powyżej, w pomiarach ciśnienia należy pamiętać o powszechnym działaniu siły grawitacji, co jest szczególnie istotne przy pomiarach zależnych od pomiaru ciężaru. W praktyce poprawki związane z wpływem przyciągania ziemskiego na wynik pomiaru ciśnienia muszą być brane pod uwagę jedynie przy bardzo dokładnych pomiarach wykonywanych wzorcami pierwszego rzędu.

Przedstawione wyżej rozważania dotyczyły cieczy nieściśliwych. W przypadku gazów (z uwagi na ich ściśliwość oraz zdolność do wypełniania całej objętości zamkniętych zbiorników) obliczenia są bardziej skomplikowane. Przykładem ściśliwości gazów jest nieliniowa zmiana ciśnienia atmosferycznego wraz z wysokością, co zilustrowano na rys. 2.1.



Rys. 2.1. Zmiana ciśnienia atmosferycznego zależnie od wysokości nad poziomem morza

W funkcji opisującej ciśnienie w dziedzinie czasu, można wyróżnić składową stałą (ciśnienie statyczne) i składową zmienną nazywaną **ciśnieniem dynamicznym**. W praktyce uważa się, że ciśnienie dynamiczne powstaje w płynach, w których pojawia się ruch (przepływ). Jest ono zależne od kinetycznej energii płynu:

$$p_d = \rho V_0^2 / 2 \quad (2.3)$$

gdzie: ρ jest gęstością płynu; V_0 – prędkością przepływu.

Wykorzystywane wyżej pojęcie płynu jest pojęciem ogólnym odnoszącym się zarówno do cieczy, jak i gazów. Podstawową teorią traktującą o pomiarach ciśnienia dynamicznego jest teoria Bernoulliego, zgodnie z którą dla przepływu równoległego do osi symetrii rurociągu, można podać:

$$p_s = p_{st} + p_d \quad (2.4)$$

gdzie: p_s jest ciśnieniem całkowitym; p_{st} – ciśnieniem statycznym; p_d – ciśnieniem dynamicznym.

Powyższa zależność jest wykorzystywana do określania prędkości przepływu płynów przy wykorzystaniu pomiaru różnicy ciśnień. Klasycznym przykładem pomiaru ciśnienia, w którym istotna jest jego składowa zmienna, jest pomiar ciśnienia krwi, w którym składowa zmienna ciśnienia niesie użyteczne dla lekarza informacje.

Innym przykładem ciśnienia dynamicznego jest powszechnie występujące **ciśnienie akustyczne**. Ciśnienie akustyczne jest to ciśnienie wywołane drganiami akustycznymi w ośrodku płynnym, będące różnicą między wartością chwilową ciśnienia $p(t)$ w określonym punkcie ośrodka a wartością średnią ciśnienia w stanie równowagi ośrodka, równą ciśnieniu statycznemu p_{st} .

$$p_a(t) = p(t) - p_{st} \quad (2.5)$$

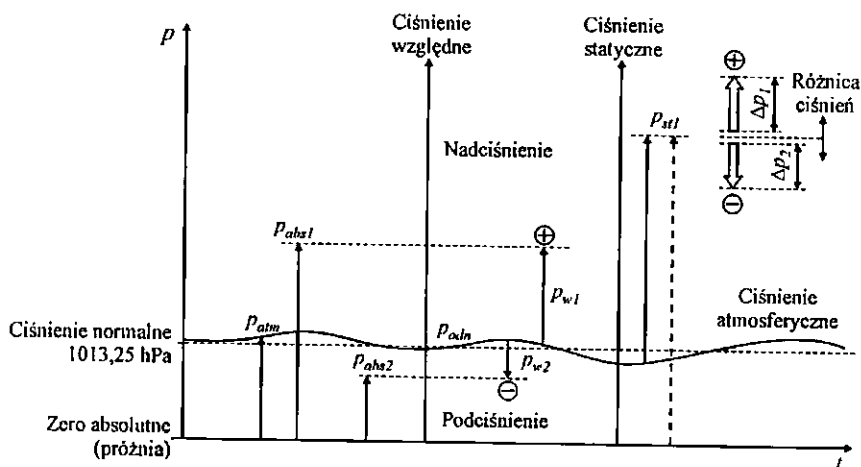
Ciśnienie akustyczne w danym punkcie ośrodka zależy od rodzaju wywołujących je drgań akustycznych. W najprostszym przypadku, tzn. dla drgań akustycznych sinusoidalnych o częstotliwości f , ciśnienie akustyczne zależy od czasu t

$$p_a(t) = p_{am} \sin 2\pi f t \quad (2.6)$$

gdzie p_{am} jest amplitudą ciśnienia akustycznego.

Relatywne pomiary ciśnień

Pomiary ciśnienia mają charakter względny (relatywny), co oznacza, że w danym punkcie pomiarowym mierzone ciśnienie jest odniesione do innego ciśnienia, zwanego ciśnieniem odniesienia. Ciśnieniem odniesienia może być ciśnienie atmosferyczne, ciśnienie absolutne lub ciśnienie w jakiejś zamkniętej objętości. Na rys. 2.2 przedstawiono różne rodzaje ciśnień zależnie od punktu odniesienia.



Rys. 2.2. Rodzaje ciśnień i związki pomiędzy nimi

W metrologii wyróżniamy następujące rodzaje ciśnień:

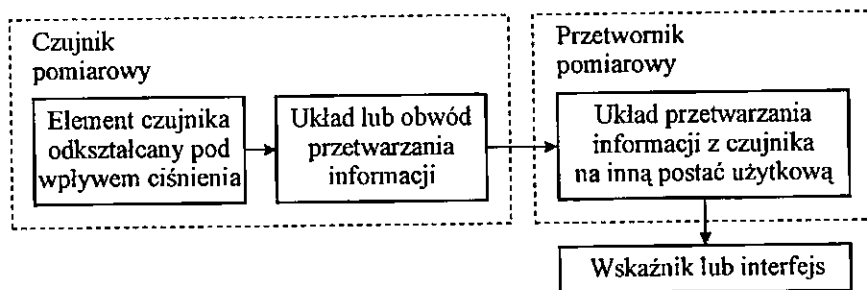
- **ciśnienie absolutne** – jest to ciśnienie wyznaczone względem próżni absolutnej;
- **ciśnienie atmosferyczne** – (barometryczne) jest to ciśnienie jakie wywiera na powierzchnię kuli ziemskiej otaczająca ją atmosfera; ciśnienie barometryczne jest zależne od położenia geograficznego, wysokości nad poziomem morza i dynamiki zmian atmosfery;
- **nadciśnienie** – jest to „nadwyżka” ciśnienia ponad ciśnienie atmosferyczne;
- **podciśnienie** – jest to niedobór ciśnienia względem ciśnienia atmosferycznego;
- **różnica ciśnień** – jest to różnica ciśnień pomiędzy ciśnieniami określonymi w dwóch punktach pomiarowych. Poziomem odniesienia jest z reguły ciśnienie niższe.

Ponadto przy niektórych rodzajach pomiarów można wyróżnić pewne, szczególne rodzaje ciśnień np. ciśnienie słupa wody przy pomiarach hydrostatycznych. Innym rodzajem specyficznego ciśnienia jest ciśnienie statyczne występujące w rurociągach i mające wpływ na pomiar przepływu w tych rurociągach.

Przez określenie **pomiar ciśnienia** rozumie się wyznaczenie wartości ciśnienia za pomocą ciśnieniomierza. Na rys. 2.3 przedstawiono ogólny schemat przyrządu do pomiaru ciśnienia.

Wyodrębnienie poszczególnych elementów składowych typowego ciśnieniomierza stwarza pewne trudności z uwagi na niejednoznaczne używanie terminów i nazw do poszczególnych jego części zarówno w literaturze, jak i katalogach handlowych. Szczególnie dotyczy to czujników krzemowych, w których istnieje możliwość integracji kilku elementów składowych czujnika w jednej strukturze czujnika. W skrajnym przypadku wszystkie przedstawione na rys. 2.3 elementy mogą być zintegrowane w jednej strukturze czujnika, a taki przyrząd przybiera nazwę mikrosystemu pomiarowego.

Na potrzeby niniejszej pracy zaproponowano schemat przyrządu do pomiaru ciśnienia składający się z następujących bloków (rys. 2.3.): czujnika ciśnienia, układów przetwarzania informacji (sygnałów) z czujnika oraz układów interfejsu i wskaźników.



Rys. 2.3. Ogólny schemat przyrządu do pomiaru ciśnienia

Podstawowym blokiem pomiarowym czujnika ciśnienia (*pressure sensor*) jest element przetwarzający ciśnienie na użyteczny sygnał pomiarowy. W większości czujników elektronicznych struktura czujnika (*chip*) składa się z elementu odkształcanego przez ciśnienie oraz układu przetwarzającego to przekształcenie na sygnał elektryczny. Przykładem takiego rozwiązania są piezorezystory zmieniające swą rezystancję pod wpływem działającego na nie odkształcenia mechanicznego. W wielu zastosowaniach bezpośredni sygnał z czujnika wymaga dodatkowego przetworzenia na inny sygnał np. związany z konkretną aplikacją (np. sygnał stałoprądowy 4 – 20 mA), tworząc przetwornik pomiarowy (*transducer* lub *transmitter*). Przetwornik ciśnienia jest z reguły wyposażony w elementy odczytowe (wskaźnik) oraz w odpowiednie interfejsy.

Na podstawie dotychczasowych rozważań można sformułować wniosek, że pomiar ciśnienia jest pomiarem porównawczym. Z reguły mierzone ciśnienie jest określane względem ciśnienia wzorcowego mierzonego za pomocą ciśnieniomierza o wyższej dokładności (etalonu). Zakłada się, że dokładność przyrządu wzorcowego powinna być co najmniej 3 razy wyższa od dokładności przyrządu wzorowanego [21].

Podstawową jednostką ciśnienia w układzie SI jest paskal: $1 \text{ Pa} = 1 \text{ N}/1 \text{ m}^2$, gdzie w układzie SI: N (niuton) jest jednostką siły, m (metr) – jednostką długości. W praktyce, najczęściej są używane wielokrotności tej jednostki, m.in. hPa, kPa, MPa, GPa. W wielu

obszarach aplikacyjnych używane są nadal jednostki spoza układu SI, np. bar, mmHg przy pomiarze ciśnienia krwi. Wartość ciśnienia może być również kryterium rodzaju pomiaru [21]:

- pomiary w zakresie próżni (do 2500 Pa),
- pomiary bardzo niskich ciśnień – mikromanometria (do 6000 Pa),
- pomiary niskich ciśnień (do 0,25 MPa),
- pomiary średnich ciśnień (do 60 MPa),
- pomiary wysokich ciśnień (do 4000 MPa),
- pomiary bardzo wysokich ciśnień (powyżej 4000 MPa).

2.3. Metody pomiaru i klasyfikacja przyrządów do pomiaru ciśnienia

Metody pomiaru ciśnienia można podzielić na dwie podstawowe grupy, a mianowicie:

- metody bezpośrednie, w których ciśnienie (wielkość wejściowa) jest bezpośrednio przetwarzane na inną wielkość, bez konieczności stosowania dodatkowych źródeł zasilających,
- metody pośrednie, (parametryczne), w których czujnik pod wpływem zmian ciśnienia zmienia jeden ze swoich parametrów kosztem energii dostarczanej z zewnętrznego źródła.

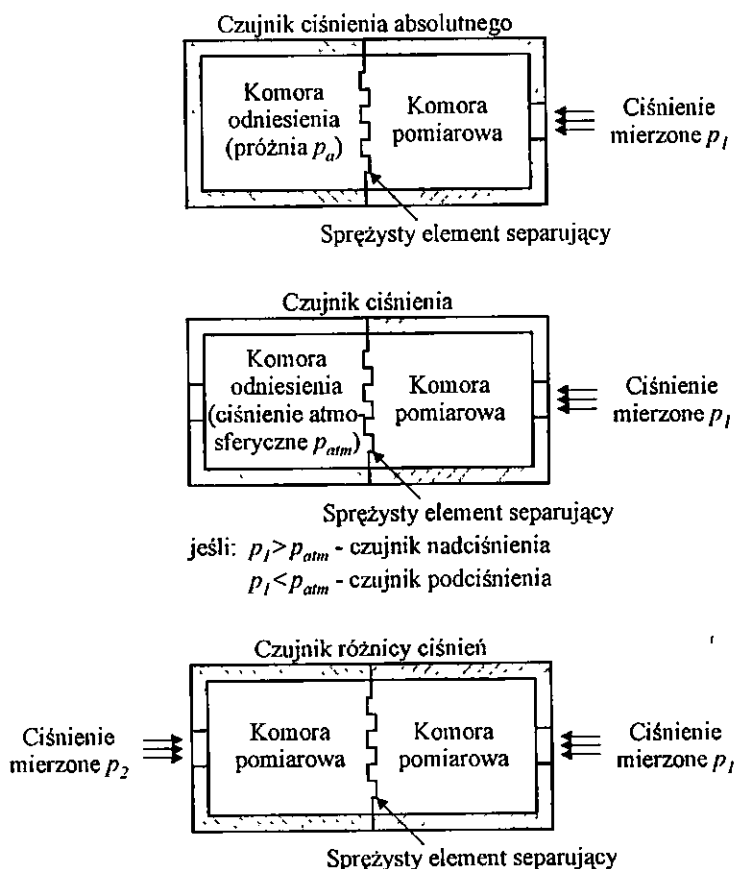
Podstawowym elementem wykorzystywanym do pomiaru ciśnienia jest czujnik (*pressure sensor*), który wywierane na niego ciśnienie przekształca na odpowiedni, użyteczny sygnał; najczęściej jest to sygnał elektryczny. Sygnał ten może być następnie traktowany jako źródło informacji w układach pomiarowych lub sygnalizacyjnych. Ze względu na dużą różnorodność czujników wykorzystywanych w różnego rodzaju urządzeniach i systemach pomiarowych, ich klasyfikacja jest zadaniem dość złożonym. Klasyfikację tę najczęściej przyprawdza się według następujących kryteriów:

- kryterium rodzaju mierzonego ciśnienia (m.in. czujniki ciśnienia, różnicy ciśnień, ciśnienia absolutnego),
- kryterium wykorzystywanego zjawiska fizycznego (m.in. zjawisko piezorezystancji, piezoelektryczne, pojemnościowe),
- kryterium technologii wykonania (mikromechaniczne półprzewodnikowe, cienko- i grubo warstwowe, kwarcowe),
- kryteria metrologiczne (wzorcowe, techniczne itp.).

2.3.1. Kryterium rodzaju mierzonego ciśnienia

Struktury czujników stosowanych do pomiaru zależnie od rodzaju mierzonego ciśnienia pokazano na rys. 2.4.

Czujnik ciśnienia można przedstawić schematycznie w postaci dwóch oddzielonych hermetycznie od siebie komór, tj. komory pomiarowej i komory odniesienia. Elementem oddzielającym jest na ogół element sprężysty, który ugina się pod wpływem działającego ciśnienia.



Rys. 2.4. Schemat budowy czujników ciśnienia zależnie od rodzaju mierzonego ciśnienia

Rodzaj czujnika ciśnienia można w tym przypadku określić zależnie od rodzaju ciśnienia działającego na komorę lub komory czujnika:

- czujnik ciśnienia absolutnego, w którym p_1 jest ciśnieniem mierzonym, p_2 – ciśnieniem absolutnym,
- czujnik nadciśnienia, w którym p_1 jest ciśnieniem mierzonym, p_2 – ciśnieniem atmosferycznym,
- czujnik podciśnienia, w którym p_1 jest ciśnieniem atmosferycznym, p_2 – ciśnieniem mierzonym,
- czujnik różnicy ciśnień, w którym mierzona jest różnica pomiędzy dwoma ciśnieniami p_1 i p_2 . W przypadku czujników różnicy ciśnień, z reguły przyjmuje się, że ciśnienie mierzone wywierane na komorę pomiarową ma większą wartość od ciśnienia wywieranego na komorę odniesienia.

2.3.2. Kryterium wykorzystywanego zjawiska fizycznego

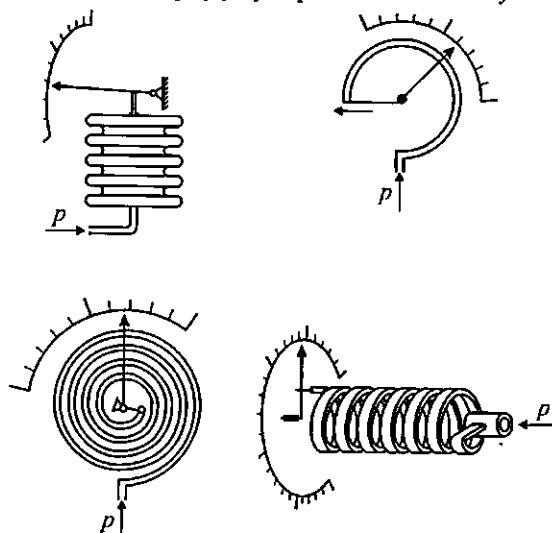
Zjawiskami fizycznymi najczęściej wykorzystywanymi do pomiaru ciśnienia są odkształcenia mechaniczne, zjawisko piezorezystancji, zjawisko piezoelektryczne, zmiana częstotliwości drgań. Odpowiednio czujnikami wykorzystującymi te zjawiska są:

- czujniki mechaniczne, w których zmiana położenia elementu sprężystego pod wpływem działania ciśnienia powoduje przesunięcie wskazania przyrządu,
- czujniki piezoelektryczne,
- czujniki piezorezystancyjne,
- czujniki pojemnościowe,
- czujniki częstotliwościowe,
- czujniki ultradźwiękowe.

Poniżej omówiono najczęściej wykorzystywane rodzaje czujników i przedstawiono charakterystyczne dla każdej grupy przykłady rozwiązań konstrukcyjnych.

2.3.2.1. Czujniki mechaniczne

Zasadniczym elementem konstrukcyjnym czujników mechanicznych jest element sprężysty, który pod wpływem działania ciśnienia ulega przesunięciu lub odkształceniu. Wielkość powstającego odkształcenia lub przesunięcia jest miarą ciśnienia. Według tej zasady działają: membrany, rurki Bourdona i różnego rodzaju mieszki. Elementy sprężyste powinny być wytwarzane z materiałów o odpowiedniej sprężystości oraz charakteryzujących się znikomym pełzaniem i małą histerezą. Ponadto efekty procesu starzenia powinny być niezauważalne w okresie eksploatacji. Przykładami takich materiałów są m.in. stal martenzytyczna, stopy miedzi (brąz, mosiądz), a także kwarc [94]. Przykłady typowych konstrukcji mechanicznych elementów sprężystych przedstawiono na rys. 2.5.



Rys. 2.5. Typowe konfiguracje konwencjonalnych mechanicznych elementów sprężystych [21]

Najprostszym przykładem czujnika mechanicznego zintegrowanego z mechanicznym układem przekazywania informacji jest szeroko wykorzystywany w pomiarach ciśnienia aneroid. W przyrządzie tym nie występuje elektroniczny blok przekazywania informacji, a rolę wskaźnika spełnia wskazówka z odpowiednią podzielną. Innym przykładem elementów sprężystych jest membrana, która może być zintegrowana z kondensatorem różnicowym, którego wartość pojemności zależy od odkształcenia membrany spowodowanego zmianą działającego na nią ciśnienia. Kolejnym sposobem wykorzystania odkształcenia membrany jest zmiana kąta odbicia padającego na nią promienia świetlnego.

2.3.2.2. Czujniki piezoelektryczne

Zjawiskiem fizycznym wykorzystywanym w czujnikach piezoelektrycznych jest efekt piezoelektryczny polegający na pojawieniu się ładunku elektrycznego na elektrodach, pomiędzy którymi znajduje się deformowany kryształ (np. pod wpływem zmian ciśnienia). Efekt ten tłumaczy się przesunięciem ładunku jonowego spowodowanego odkształceniami siatki krystalograficznej materiału wykazującego właściwości piezoelektryczne. Zjawisko piezoelektryczne jest odwracalne, to znaczy, że pojawienie się na ściankach materiału piezoelektrycznego napięcia spowoduje powstanie w tym materiale mechanicznych odkształceń.

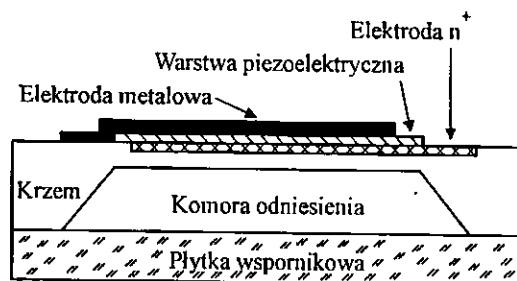
Materiałami, które wykazują właściwości piezoelektryczne są kryształy tytanianu baru (BaTiO_3) stosowane do wytwarzania czujników niskich ciśnień, soli Seignette'a ($\text{NaKC}_4\text{H}_4\text{O}_6$) – do czujników bardzo wysokich ciśnień. Jednak najczęściej używanym w technice materiałem jest kwarc (SiO_2).

Właściwości czujnika piezoelektrycznego zależą od rodzaju cięcia kryształu kwarcu, dzięki czemu zależnie od zastosowania można maksymalizować czułość czujników lub minimalizować wpływ temperatury na jego parametry. Czujniki piezoelektryczne mogą pracować w różnych układach: przy działaniu dużych sił kryształ poddaje się naprężeniom ściskającym, przy mniejszych siłach stosuje się zginanie lub skręcanie płytek [21]. Należy jednak pamiętać, aby naprężenia w płytce kwarcowej były tak wytwarzane, aby nie tłumiły jej drgań.

Typowy czujnik piezoelektryczny składa się z dwóch grzebieniowych (międzypalczastych) przetworników (*interdigital transducer*). Jeden z nich przekształca energię elektryczną na mechaniczną energię fal, a drugi z powrotem przekształca mechaniczną energię fal na energię pola elektrycznego.

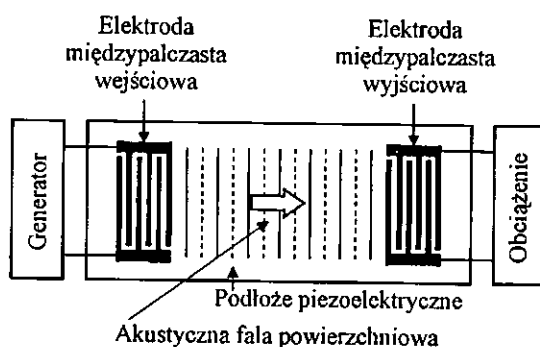
Generalnie można wyróżnić dwa rodzaje czujników piezoelektrycznych: czujniki z objętościowymi falami akustycznymi i czujniki z powierzchniowymi falami akustycznymi. W pierwszym przypadku propagacja fali odbywa się pomiędzy górną a dolną powierzchnią płytki. Zmiany napięcia pomiędzy elektrodami umieszczonymi pomiędzy tymi powierzchniami są spowodowane zmianami naprężeń generowanych w płytce. Zaletami czujników z objętościową falą akustyczną jest dobra stabilność temperaturowa, dobra odporność na oddziaływanie środowiska pomiarowego (w tym cieczy). Typowo czujniki takie mogą pracować w zakresie częstotliwości 5 – 30 MHz. Zwiększenie częstotliwości można uzyskać poprzez zmniejszanie grubości płytek piezoelektrycznych,

jednak poniżej pewnych grubości płytki stają się zbyt delikatne mechanicznie, co znacznie utrudnia ich produkcję i montaż. Problem ten rozwiązuje się poprzez wykorzystanie technologii mikromechaniki krzemowej. Na rys. 2.6 przedstawiono konstrukcję piezoelektrycznego czujnika ciśnienia wykonanego w takiej technologii. Na cienkiej membranie krzemowej została naniesiona warstwa piezoelektryczna, na której naniesiono metodą napylenia elektrodę grzebieniową służącą do pobudzenia fal akustycznych w czujniku.



Rys. 2.6. Przykład konstrukcji piezoelektrycznego czujnika ciśnienia wykonanego w technologii mikromechaniki krzemowej

Czujniki w zakresie większych częstotliwości (25 – 500 MHz) wytwarza się obecnie przy wykorzystaniu akustycznych fal powierzchniowych (SAW – *surface acoustic wave*). Akustyczne fale powierzchniowe (AFP) zostały odkryte przez lorda Rayleigha w 1887 r. Uzyskanie fal Rayleigha na powierzchni płytki wymaga pobudzenia tej powierzchni w taki sposób, aby zostały wytworzone dwie składowe fale: poprzeczna i podłużna, które są przesunięte wzajemnie o 90°. Warunki takie można stworzyć za pomocą pola elektrycznego przyłożonego w odpowiedni sposób do powierzchni płytki piezoelektrycznej, odpowiednio wyciętej do osi krystalograficznych [97]. Na rys. 2.7 przedstawiono schematycznie konstrukcję piezoelektrycznego czujnika z akustyczną falą powierzchniową zbudowanego na podłożu kwarcowym.



Rys. 2.7. Zarys konstrukcji piezoelektrycznego czujnika z akustyczną falą powierzchniową zbudowanego na podłożu kwarcowym

Podstawowym elementem konstrukcyjnym jest kształtka wykonana z materiału o silnych właściwościach piezoelektrycznych. Odształcenie kształtki powoduje powstanie ładunku na elektrodach czujnika $Q = KF$ oraz napięcia $U = KF/C$, gdzie: K jest stałą piezoelektryczną, C – sumą pojemności kształtki (C_k) i obwodu połączonego z elektrodami kształtki (C_p). Naładowane podczas odształcenia elektrody rozładowują się przez rezystancję obwodu zewnętrznego tak, że mimo dalszego działania siły napięcie po odpowiednio długim czasie zanika. W związku z tym czujniki te mogą pracować jedynie w warunkach działania ciśnień dynamicznych [21]. Warunkiem prawidłowego wykonania pomiaru jest separacja elektryczna czujnika od współpracującego z nim przetwornika. Innymi słowy, dołączenie układu przetwornika nie powinno wpływać na wielkość i rozkład ładunków na jego elektrodach. Używając terminologii układów elektronicznych, współpracujący z czujnikiem piezoelektrycznym układ elektroniczny powinien charakteryzować się nieskończenie dużą impedancją wejściową. Typowym przykładem elementu elektronicznego stosowanego w takim przypadku jest tranzystor polowy z izolowaną bramką typu MOS.

Zaletami czujników piezoelektrycznych są: duża częstotliwość odpowiedzi, duży sygnał wyjściowy, niewielkie wymiary, zwarta i lekka konstrukcja, odporna na oddziaływanie środowiska pomiarowego. Ponadto, czujniki piezoelektryczne mogą pracować bez zakłóceń nawet do 500 °C. Ważną zaletą wyżej opisanych rezonatorów jest ich stosunkowo prosta konstrukcja mechaniczna oraz fakt, że struktura rezonatora znajduje się tylko po jednej stronie płytki kwarcowej. Dzięki temu druga strona płytki może być poddawana działaniu czynników zewnętrznych bez groźby uszkodzenia rezonatora. Sam kwarc jako materiał czujnika ma niewątpliwe zalety takie jak doskonałe właściwości mechaniczne i wysoka odporność chemiczna. [96, 97].

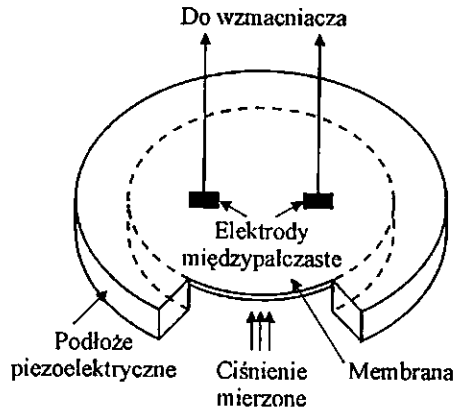
Wykorzystanie rezonatorów do budowy czujników umożliwia fakt, że akustyczna fala powierzchniowa (AFP) jest wrażliwa na warunki fizyczne panujące na powierzchni piezoelektryka. Można tę właściwość wykorzystać do skonstruowania czujników takich wielkości jak: temperatura, ciśnienie, siła czy przyspieszenie. Można również, po naniesieniu odpowiedniej warstwy chemoczułej, konstruować różnego rodzaju czujniki chemiczne lub bioczujniki. Zmiana warunków propagacji fali powierzchniowej prowadzi do zmiany jej prędkości rozchodzenia, co może być mierzone jako zmiana opóźnienia sygnału odbitego lub zmiana częstotliwości rezonansowej rezonatora.

Przykładową konstrukcję czujnika ciśnienia wykonanego w postaci okrągłej membrany kwarcowej, na powierzchni której naniesiono dwie struktury rezonatorowe przedstawiono na rys. 2.8 [97, 130].

Częstotliwość drgań rezonatora AFP zależy między innymi od występujących w podłożu naprężeń mechanicznych. Zależność tę można wyrazić wzorem:

$$\frac{\Delta f}{f_0} = \sum \alpha_{ij} \sigma_{ij} \quad (2.7)$$

gdzie α_{ij} jest współczynnikiem czułości na naprężenia, σ_{ij} – składowymi naprężeń mechanicznych w układzie współrzędnych prostokątnych



Rys. 2.8. Geometria okrągłej płytki z rezonatorami AFP

Wartość naprężeń w membranie sztywno zamocowanej, obciążonej ciśnieniem statycznym wyraża się wzorem [124]:

$$\sigma_r = q \left(\frac{1}{8}(2+\nu) \frac{z^3}{c^3} - \frac{3}{32}(3+\nu) \frac{r^2}{c^3} - \frac{3}{40}(2+\nu) \frac{z}{c} + \frac{3}{32}(3+\nu) \frac{a^2 z}{c^3} \right) \quad (2.8)$$

gdzie σ_r – składowa promieniowa naprężeń, $2c$ – grubość płytki, $2a$ – średnica płytki, q – jednorodne ciśnienie hydrostatyczne prostopadłe do powierzchni płytki, ν – współczynnik Poissona, z – odległość od środkowej powierzchni przekroju płytki (dla powierzchni płytki $z = c$)

Czujniki typu AFP są czujnikami pasywnymi (nie wymagają zasilania), mają niewielkie wymiary, koszty ich wytwarzania są stosunkowo niskie. Ponadto nie wymagają żadnych szczególnej ochrony przed oddziaływaniem środowiska pomiarowego. Jednak największą ich zaletą jest możliwość pracy bezprzewodowej, dzięki czemu są obecnie szeroko stosowane w ruchomych obiektach, których klasycznym przykładem jest pomiar ciśnienia w oponach samochodowych.

2.3.2.3. Czujniki tensometryczne i piezorezystancyjne

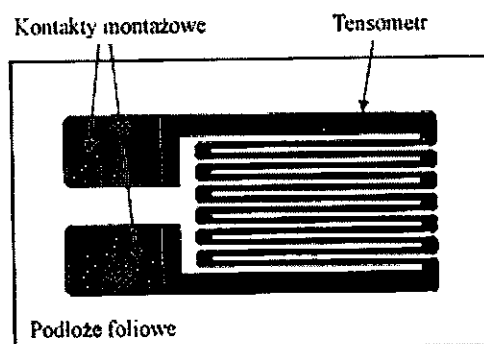
Jednym z najczęściej wykorzystywanych efektów w czujnikach ciśnienia jest zmiana rezystancji rezystora pod wpływem naprężeń powstających pod wpływem zmian ciśnienia w elemencie sprężystym, na którym ten rezystor jest umieszczony. Rezystancję rezystora wyraża klasyczna zależność:

$$R = \rho l / A \quad (2.9)$$

gdzie: ρ jest rezystywnością materiału, l – długością rezystora, A – jego powierzchnią.

Jeżeli zmiana rezystancji jest spowodowana głównie zmianami wymiarów geometrycznych rezystora, to zjawisko takie nosi nazwę: tensometryczne, a rezystor przyjmuje nazwę tensometr. Jeżeli przy zmianie rezystancji dominuje zmiana rezystywności materiału, to mamy do czynienia ze zjawiskiem piezorezystancji, a rezystor przyjmuje nazwę: piezorezystor.

Zjawisko tensometryczne najsilniej występuje w niektórych metalach. Typowy tensometr jest wykonany w postaci cienkiej warstwy metalowej w formie grzebieniowej naniesionej na podłoże sprężyste (rys. 2.9). Tensometry można umieszczać bezpośrednio na elementach sprężystych o dowolnych kształtach. W czujnikach ciśnienia jest to najczęściej cienka membrana wykonana z folii, metalu lub ceramiki.

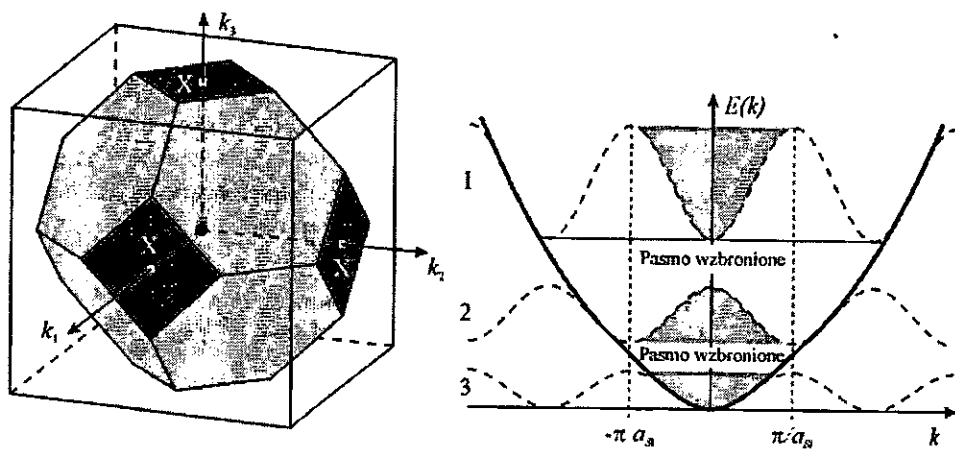


Rys. 2.9. Metalowy tensometr umieszczony na foliowym podłożu izolacyjnym [69]

Czułość tensometru oporowego jest ilorzem względnego przyrostu rezystancji ($\Delta R/R$) i względnego wydłużenia ($\Delta l/l$). Z kolei względne wydłużenie jest proporcjonalne do mechanicznego naprężenia, wyrażonego ilorzem siły przez pole powierzchni przekroju poprzecznego (F/A) i odwrotnie proporcjonalne do modułu Younga (E) materiału danej konstrukcji.

W monokrystalicznych materiałach półprzewodnikowych zmiana geometryczna piezorezystorów jest pomijalnie mała w porównaniu ze zmianami rezystywności materiału, dlatego też w tych materiałach na zmianę rezystancji rezystorów ma decydujący wpływ zjawisko piezorezystancji. Zjawisko to zostało odkryte przez Smitha z Bell Laboratories w 1954 roku [1]. Od tego czasu pojawiło się szereg prac dotyczących charakteru tego zjawiska w różnych materiałach półprzewodnikowych, przede wszystkim w krzemie [2, 3]. Szczegółowy opis zjawiska piezorezystancji wymaga szerokiego omówienia modelu pasmowego półprzewodników, co wykracza poza ramy niniejszej monografii. Poniżej zostaną przedstawione jedynie te problemy, które są niezbędne przy konstruowaniu piezorezystancyjnych czujników ciśnienia.

Na rys. 2.10 przedstawiono podstawowy wykres zależności energii elektronu E w funkcji wektora falowego k .



Rys. 2.10. Energia $E(k)$ w funkcji wektora falowego k dla krystalu krzemu

Paraboliczny przebieg funkcji energii elektronu ulega zakłóceniu przy zbliżaniu się do wartości wektora $\pm\pi/a$, gdzie a jest stałą sieciową krystalu. Zakres od $-\pi/a$ do $+\pi/a$ nazywa się pierwszą strefą Brillouina. Model pasmowy dla krzemu, w przestrzeni falowej zawartej w pierwszej strefie Brillouina ma sześć węzłów, w których występują najgłębsze minima energetyczne pasma przewodnictwa. Przy braku oddziaływania czynnika mechanicznego, minima energetyczne mają jednakową głębokość, a nośniki prądu są między nimi równo podzielone. Symetria rozkładu nośników prądu w węzłach sprawia, że mimo istnienia anizotropii ruchliwości związanej z przynależnością do określonego minimum energetycznego, sumaryczna ruchliwość nośników prądu jest wielkością izotropową. W konsekwencji, rezystancja półprzewodnika wolnego od mechanicznego naprężenia jest niezależna od kierunku sieci krystalicznej [10, 11]. Pod wpływem mechanicznego naprężenia sieć krystaliczna ulega deformacji, a wraz z nią zmieniają się wartości energii pasm w poszczególnych węzłach przestrzeni falowej. Nośniki prądu dążąc do zajęcia stanu o najniższej energii, przemieszczają się z węzłów o relatywnie wyższych energiach do węzłów o energiach relatywnie niższych. To powoduje, że pewne węzły zostają bardziej wypełnione nośnikami, a inne mniej. Konsekwencją tego zjawiska jest większy udział w przewodzeniu prądu nośników związanych z danym węzłem i ujawnienie się związanej z tym węzłem anizotropii ruchliwości. Matematyczny model oparty na pasmowej teorii ciała stałego, opisujący zjawisko piezorezystancji został zaproponowany przez Bira i Pikusa, który szczegółowo jest omówiony w [11]. Wykorzystanie tego modelu w konkretnych przykładach mechanicznego obciążenia krzemu przedstawiono w [128]. Jak stwierdzono w [128] model Bira i Pikusa z inżynierskiego punktu widzenia dostatecznie dobrze opisuje fizyczne podstawy piezorezystancji i pozwala na

zrozumienie jego istoty, a także na oszacowanie współczynników piezorezystancji dla konkretnych technologii wytwarzania czujników. Znajomość współczynników piezorezystancji jest niezbędna do projektowania czujników piezorezystancyjnych. Określają one zależność pomiędzy zmianą rezystywności materiału a naprężeniami powodującymi te zmiany. Dla membranowego piezorezystancyjnego czujnika ciśnienia, wykonanego na podłożu krzemowym o orientacji krystalograficznej (100) i typie przewodnictwa rezystorów p, uproszczona zależność czułości ma postać:

$$\Delta V/V = \pi_{44}/2 (1 - \nu)(a/h)^2 \Delta P \quad (2.10)$$

gdzie: $\Delta V/V$ jest czułością czujnika wyrażoną przez względną zmianę jego napięcia wyjściowego, ν – modułem Poissona, a wyraża połowę wymiaru boku membrany, h jest grubością membrany, natomiast ΔP jest różnicą ciśnień oddziałujących z przeciwnych stron na membranę czujnika.

Z równania tego, dla konkretnego czujnika, można wyznaczyć współczynnik π_{44} . Konkretnie dane związane z obliczaniem współczynników piezorezystancji dla konstrukcji i technologii piezorezystancyjnych czujników ciśnienia i przyspieszenia wytwarzanych w Instytucie Technologii Elektronowej w Warszawie są podane w [128].

Zjawisko piezorezystancji występuje nie tylko w monokryształach krzemu, ale również w warstwach polikrystalicznych i amorficznych. Materiał polikrystaliczny jest zbudowany z małych ziaren o budowie kryształu odseparowanych od siebie poprzez granice tych ziaren. Całkowita rezystancja warstwy składa się z rezystancji ziaren i rezystancji powstałej na ich granicy. Zaletą warstw polikrystalicznych jest możliwość uzyskania małego wpływu temperatury na parametry czujnika. Właściwości piezorezystancyjne, oprócz krzemu wykazują również inne materiały półprzewodnikowe m.in.: german typu n, antymonek galu typu p, antymonek indu typu p [3, 10].

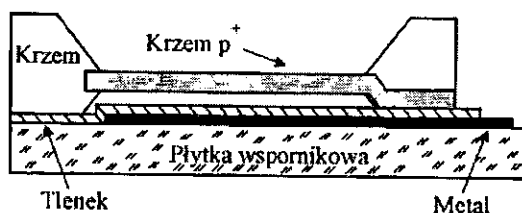
2.3.2.4. Czujniki pojemnościowe

Podstawowym elementem konstrukcyjnym czujnika pojemnościowego jest kondensator, którego pojemność zmienia się pod wpływem zmian naprężeń mechanicznych np. siły lub ciśnienia. Zmiana pojemności kondensatora może nastąpić na skutek:

- zmian położenia dielektryka względem nieruchomych okładek kondensatora,
- zmian położenia ruchomej okładki kondensatora względem drugiej, nieruchomej,
- zmian przenikalności elektrycznej dielektryka na skutek pojawiających się w nim naprężeń (tzw. czujnik elektrosprężysty).

W praktycznych zastosowaniach najczęściej jest wykorzystywana konstrukcja z odkształcanymi okładkami kondensatora. Okładki ruchome są najczęściej wykonywane jako cienka membrana uginająca się względem jednej nieruchomej elektrody (czujnik ciśnienia) lub umieszczona pomiędzy dwoma, nieruchomymi elektrodami (czujnik różnicy ciśnień) [63, 74]. Membrany czujników pojemnościowych mogą być wykonane z metalu, ceramiki lub krzemu. W czujnikach mikroelektronicznych pomiędzy elektrodami naj-

częściej jest próżnia, natomiast elektrody nieruchome są wykonywane ze szkła, na które są nanoszone cienkie warstwy elektrycznych wyprowadzeń.



Rys. 2.11. Zarys konstrukcji pojemnościowego krzemowego czujnika ciśnienia do pomiaru niskich ciśnień [131]

W porównaniu z czujnikami piezorezystancyjnymi, czujniki pojemnościowe charakteryzują się znacznie większą czułością, nawet ponad 10-krotną [121]. Dzięki temu mogą być używane do pomiaru bardzo niskich ciśnień, nawet w zakresie zbliżonym do próżni. Niestety, charakterystyki ciśnieniowe czujników pojemnościowych są nieliniowe, zwłaszcza przy większych odkształceniach. Wymaga to stosowania dodatkowych układów kompensacyjnych. Kolejnym problemem konstrukcyjnym w czujnikach pojemnościowych, jest konieczność eliminacji pojemności pasożytniczych, zarówno występujących w samej strukturze, jak i w zewnętrznych układach przetwarzających, przez co czujniki pojemnościowe wymagają dość skomplikowanych układów przetwarzających. W przypadku czujników pojemnościowych bardzo korzystna jest integracja w jednej obudowie, a w przypadku technologii krzemowych integracja nawet na jednej strukturze czujnika i układu przetwarzania informacji, charakteryzującego się dobrą stabilnością i niskim poziomem szumów własnych. W przeciwnym przypadku trudno jest uzyskać czujniki o parametrach zadowalających użytkowników. Czujniki pojemnościowe mogą być stosowane do pomiaru ciśnień zarówno statycznych, jak i dynamicznych.

2.3.2.5. Przykłady innych rozwiązań konstrukcyjnych czujników ciśnienia

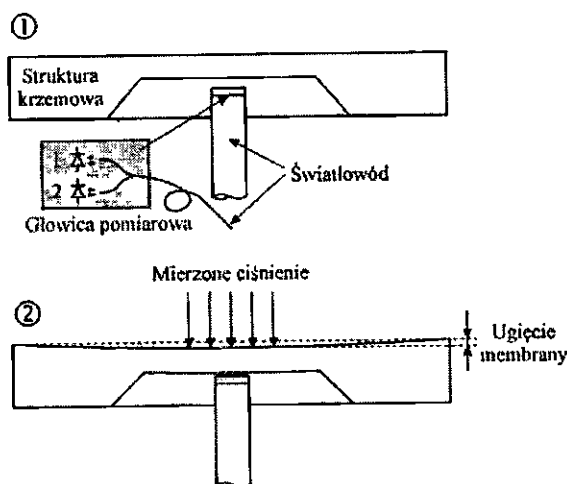
Opisane powyżej zjawiska są najczęściej wykorzystywane w czujnikach ciśnienia, jednak w wielu laboratoriach i firmach prowadzone są badania nad wykorzystaniem innych zjawisk fizycznych czy właściwości materiałów do pomiaru ciśnień. W ramach tych prac powstały m.in. czujniki światłowodowe, indukcyjne, wykorzystujące tensometry strunowe czy wykonane z materiałów magnetycznych wykorzystujące efekt Halla. Do najnowszych prac należy zaliczyć badania nad zjawiskami, które umożliwiłyby zbudowanie czujników pracujących poza atmosferą ziemską, tj. niewrażliwych na promieniowanie kosmiczne lub silne zmiany pola magnetycznego [26].

Czujniki rezonatorowe

Pod pojęciem czujnika rezonatorowego rozumie się element sprężysty, którego właściwości rezonansowe są identyfikowane przez sprzężony z nim obwód przetwarzania informacji. Innymi słowy, zmiana częstotliwości rezonansu mechanicznego może być potraktowana jako informacja o oddziaływającym ciśnieniu. W ogólnym przypadku układ sprężysty może być pobudzany bezpośrednio przez oddziaływanie ciśnienia lub pośrednio przez zewnętrzny obwód wymuszający [64]. Wykorzystanie zmiany częstotliwości rezonansowej w drgającym elemencie kwarcowym pozwoliło na wytworzenie jednego z najbardziej precyzyjnych przyrządów do pomiaru ciśnienia. Firma Paroscientific przedstawiła czujniki ciśnienia wykonane z kwarcu w postaci rurek Bourdona pobudzanych kwarcowym generatorem drgań. Zmiana ciśnienia, powodująca zmiany naprężeń w rurce, powoduje zmiany częstotliwości rezonansowej układu pomiarowego. Tak skonstruowany czujnik pozwala mierzyć ciśnienia w zakresie od 0,1 MPa do 270 MPa z dokładnością 0,01 % górnej granicy zakresu pomiarowego i rozdzielczością 0,0001 % tej granicy [121]. Rezonatorowe czujniki ciśnienia charakteryzują się bardzo małym zużyciem mocy i z tego powodu są atrakcyjne dla zastosowań bezprzewodowych. Ponadto, połączone z technologią czujników piezoelektrycznych mogą stać się jednymi z pierwszych czujników, w których zarówno sygnał zasilający, jak i odbiorczy są przesyłane metodą bezprzewodową.

Czujniki optyczne

Opisane w literaturze czujniki optyczne można podzielić na dwie podstawowe grupy. W pierwszej z nich promień świetlny odgrywa rolę wskaźnika. Do tej grupy można zaliczyć czujniki, których zasada działania polega na pomiarze zmiany kąta odbicia promienia świetlnego od elementu sprężystego np. membrany ugiętej się pod wpływem ciśnienia (rys. 2.12).

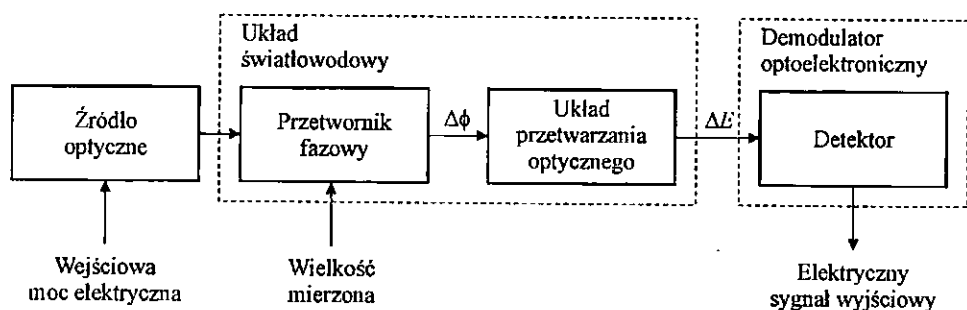


Rys. 2.12. Krzemowy czujnik światłowodowy z uginającą się membraną

Czujnik ciśnienia składa się z trzech głównych elementów: głowicy zawierającej membranę uginającą się pod wpływem ciśnienia, kabla światłowodowego oraz optycznego układu zawierającego m.in. źródło światła (np. diodę LED) oraz odbiornik światła (np. fotodiodę). Miarą ciśnienia działającego na membranę jest zmiana kąta odbicia światła od niej.

Membrany można wykonywać zarówno z metalu, jak i krzemu. Na rys. 2.12 przedstawiono schemat optoelektronicznego czujnika ciśnienia wykonanego w technice mikromechaniki krzemowej. W tym przypadku na powierzchnię cienkiej membrany krzemowej nanosi się cienką warstwę lustrzaną spełniającą rolę zwierciadła odbijającego [26, 35, 83].

Zasada działania innego typu czujników optycznych polega na zmianie parametrów promienia świetlnego przechodzącego przez światłowód. W tym przypadku ciśnienie oddziałuje bezpośrednio na światłowód. Pod wpływem zmian ciśnienia, naprężenia powstające w światłowodzie zmieniają modulację fazy światła przechodzącego przez ten światłowód. Zmiana ta jest odczytywana przez układ pomiarowy na wyjściu światłowodu i stanowi miarę ciśnienia. Na rys. 2.13 przedstawiono ideowy schemat interferencyjnego czujnika światłowodowego [53].



Rys. 2.13. Schemat ideowy interferencyjnego czujnika światłowodowego

Światłowodowy czujnik interferencyjny składa się ze źródła światła, które zmienia energię elektryczną na energię optyczną, układu światłowodowego oraz układu detektora zamieniającego energię świetlną z powrotem na elektryczną. Układ światłowodowy zawiera element czujnikowy, w którym wielkość mierzona wywołuje zmiany fazy transmitowanej wiązki świetlnej. Uzyskanie informacji o mierzonej wielkości odbywa się w demodulatorze optoelektronicznym integralnie związanym z układem detektora. Do pomiaru ciśnienia są wykorzystane typowe konfiguracje interferometrów, takie jak Michelsona czy Macha-Zehndera [13, 26, 53]. Niewątpliwą zaletą czujników optycznych jest możliwość bezkontaktowego i zdalnego (nieingerencyjnego) odczytu. Dzięki tej właściwości czujniki te są odpowiednie do pomiarów w procesach technologicznych przeprowadzanych np. w obszarach zagrożonych wybuchem. Do innych zalet czujników optycznych należą: duża odporność na oddziaływanie środowiska pomiarowego oraz na

działanie wysokich temperatur, dzięki możliwości znacznego odsunięcia elementów czujnika czułych na temperaturę od strefy wysokich temperatur. Dlatego też czujniki optyczne doskonale nadają się do ciągłego pomiaru bardzo wysokich ciśnień (powyżej 300 bar), również w podwyższonych temperaturach (powyżej 300 °C). Kolejną zaletą omawianych czujników jest długoterminowa praca bez znaczącej zmiany parametrów, nawet do 10 lat, oraz wytrzymałość na setki tysięcy cykli ciśnieniowych [99].

Osobnym zagadnieniem jest pomiar ciśnienia w zakresach zbliżonych do próżni, który jest wykorzystywany głównie w urządzeniach technologicznych, takich jak napyłarki próżniowe czy implantatory. Do pomiaru w tych warunkach używa się głównie próżniomierzy wśród których można wyróżnić: próżniomierze próżni wstępnej o zakresie pomiarowym poniżej 1000 hPa, próżniomierze kompresyjne np. McLeoda lub Edwardsa o zakresie pomiarowym poniżej 100 – 10^{-4} Pa, próżniomierze jonowe o zakresie pomiarowym poniżej 10^{-6} Pa oraz próżniomierze radiometryczne o zakresie pomiarowym poniżej 10^{-7} Pa [21].

Jak zaznaczono wcześniej, kryteriów podziału czujników może być bardzo wiele. Czujniki można również podzielić zależnie od stopnia zintegrowania z innymi elementami układów pomiarowych na: czujniki bez kompensacji, czujniki z kompensacją wewnętrzną oraz czujniki inteligentne (*smart*), w których w jednej strukturze jest scalona struktura czujnika, elementy kompensujące, wzmacniacze A/D, układy mikroprocesorowej obróbki danych i interfejsowe. Takie czujniki mogą być już traktowane jako pełne mikrosystemy pomiarowe [119].

Często w branżowej literaturze spotyka się podziały według innych kryteriów, np. ze względu na zastosowania: czujniki do zastosowań w medycynie (pomiar ciśnienia krwi), w motoryzacji (czujniki do pomiaru ciśnienia oleju) czy w sprzęcie powszechnego użytku (czujniki do pomiaru siły ciągu odkurzacza). Można również dokonać podziałów według kryteriów metrologicznych związanych z zakresami pomiarowymi i dokładnością, zakresami temperatury pracy itp.

3. CZUJNIKI CIŚNIENIA – PROBLEMY KONSTRUKCYJNE, TECHNOLOGICZNE I APLIKACYJNE

Zgodnie z konwencją przyjętą na rys. 2.3 czujnik ciśnienia składa się następujących bloków funkcjonalnych: elementu czujnika oraz układu przetwarzania sygnału nieelektrycznego na sygnał elektryczny. Natomiast ze względów konstrukcyjnych w czujniku ciśnienia można wyróżnić dwie podstawowe części składowe: strukturę wewnętrzną czujnika (*chip*) i obudowę (*package*). W niniejszym rozdziale omówiono konstrukcje i technologie stosowane do wytwarzania wewnętrznych struktur czujników (ze szczególnym uwzględnieniem technologii krzemowych), technologie montażu wraz z przykładowymi rozwiązaniami konstrukcyjnymi obudów oraz niektóre aspekty aplikacji czujników ciśnienia.

3.1. Krzemowe czujniki ciśnienia

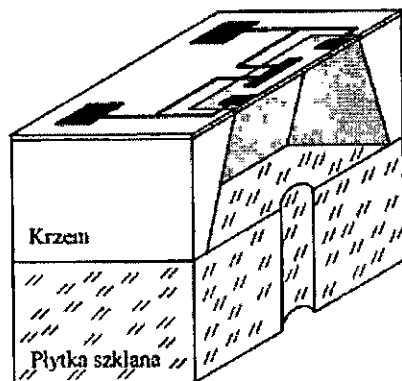
3.1.1. Konstrukcja krzemowych czujników ciśnienia

Krzem jako materiał półprzewodnikowy jest znany i szeroko stosowany w mikroelektronice od ponad pół wieku. Właściwości krzemu jako materiału do wytwarzania elektronicznych przyrządów półprzewodnikowych są znane i dostatecznie dobrze opisane w dostępnej literaturze [1, 2, 11, 14, 75, 122, 128].

Właściwości krzemu szczególnie przydatne przy konstruowaniu czujników są następujące:

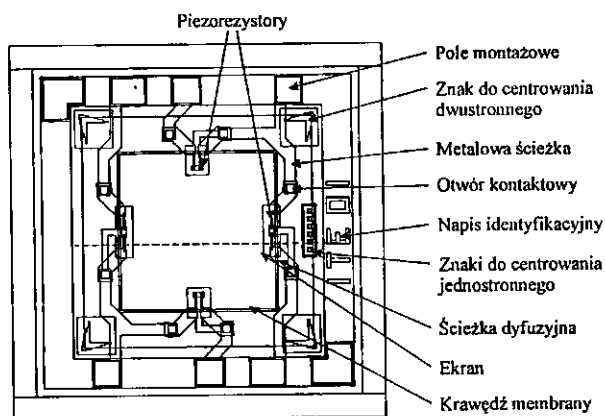
- struktura krystalograficzna krzemu i zdolność do anizotropowego trawienia pozwala na wytwarzanie skomplikowanych trójwymiarowych kształtów geometrycznych z dokładnością nawet $1\ \mu\text{m}$;
- duży współczynnik piezorezystancji pozwala na wytwarzanie czujników ciśnienia, siły, przyspieszenia o sygnale wyjściowym do 100 razy większym niż czujników wytworzonych np. z warstw metalicznych,
- duża odporność na naprężenia;
- dobre właściwości sprężyste krzemu w szerokim zakresie temperatury, co pozwala na wykorzystanie cienkich elementów np. membran czujników do pracy w szerokim zakresie temperatury, właściwość ta może być wykorzystywana ponadto do wytwarzania ruchomych elementów krzemowych sterowanych termicznie;
- duża odporność mechaniczna i korozyjna warstw związków krzemu m.in. azotku krzemu, co umożliwia wytwarzanie czujników odpornych na oddziaływanie środowiska pomiarowego. [11]

Parametrem materiałowym, który ogranicza zastosowania krzemu, jest jego stosunkowo niewielka odporność na kruche pękanie – zaledwie $0,9\ \text{MPa m}^{-1/2}$. Zestawienie parametrów mechanicznych krzemu i innych materiałów konstrukcyjnych używanych w technologii czujników są podane w [52, 128]. Typowa konstrukcja krzemowego czujnika ciśnienia jest przedstawiona na rys. 3.1.



Rys. 3.1. Zarys konstrukcji czujnika piezorezystancyjnego czujnika ciśnienia

Krzemowy czujnik ciśnienia składa się z krzemowej płytki, w której jest wytworzona cienka membrana. W membranie są wytworzone piezorezystory połączone najczęściej w konfigurację typowego mostka Wheatstone'a. Ponadto na membranie znajdują się połączenia pomiędzy elementami mostka oraz kontakty do wyprowadzeń montażowych, tworząc tzw. obszary metalizacji. W celu wzmocnienia konstrukcji mechanicznej płytki membranowej, a także w celu odseparowania cienkiej membrany od niepożądanych naprężeń mechanicznych powstających w trakcie montażu, płytkę membranową łączy się z płytką wspornikową, najczęściej wykonaną ze szkła. Na rys. 3.2 przedstawiono widok z góry (*layout*) płytki membranowej czujnika ciśnienia wykonanego w Instytucie Technologii Elektronowej (ITE) [128, 131].



Rys. 3.2. Widok z góry (*layout*) piezorezystancyjnego czujnika ciśnienia wykonanego w ITE [128]

Czujnik składa się z sześciu obszarów definiowanych w procesach fotolitografii. Są to: obszary dyfuzji p⁺, piezorezystory, membrana, otwory kontaktowe, metalizacja i otwory montażowe. Struktura ma kształt kwadratu o boku 2400 μm. Cztery piezorezystory są tak ułożone na membranie, aby dwa z nich podlegały naprężeniom rozciągającym, a dwa ściskającym. Z przedstawionego niżej zarysu analizy naprężeń w płycie kwadratowej sztywno podpartej wynika, że rezystory te powinny być umieszczone jak najbliżej krawędzi membrany [124]. Każde „rozcentryowanie” położenia rezystorów ma bezpośredni wpływ na parametry czujnika, szczególnie na jego czułość i napięcie niezrównoważenia [128]. W celu zwiększenia czułości czujnika piezorezystory są ze sobą połączone ścieżkami dyfuzyjnymi i tworzą typowy mostek pomiarowy Wheatstone'a. W przedstawionej wyżej konstrukcji piezorezystory zostały zabezpieczone, przed zaburzeniami pochodzącymi z otoczenia, metalowymi ekranami połączonymi z polami montażowymi uziemienia lub zasilania.

W procesie projektowania konstrukcji krzemowych czujników ciśnienia można wykorzystywać zarówno metody analityczne, jak i numeryczne.

W typowej konstrukcji czujnika ciśnienia membrana ma kształt płaskiej, kwadratowej płyty sztywno umocowanej na obrzeżach. Boki kwadratu membrany są równoległe do kierunków krystalograficznych <110> i <100>. Piezorezystory są ułożone w miejscach, gdzie naprężenia osiągają swoje maksimum. Analizowanie naprężeń w krzemowych membranach można ograniczyć się do małych naprężeń. W tym przypadku równanie różniczkowe opisujące odkształcenia cienkiej płyty ma postać [22, 128]:

$$\delta^4 w / \delta x^4 + 2\delta^4 w / \delta x^2 \delta y^2 + \delta^4 w / \delta y^4 = \Delta P / D \quad (3.1)$$

gdzie: D jest współczynnikiem przekroju poprzecznego na zginanie, ΔP – różnicą ciśnień działających na membranę czujnika, $w(x, y)$ – strzałką ugięcia.

Po wprowadzeniu warunków brzegowych maksymalne odkształcenie membrany występuje w jej centrum i wynosi:

$$w_{\max} = 0,01512 (1 - \nu^2) \Delta P L^2 / E h^3 \quad (3.2)$$

gdzie: L jest długością boku membrany, h – jej grubością, E – modułem Younga.

Maksymalny moment zginający M_x i naprężenia δ_{\max} występują pośrodku boków membrany i wynoszą:

$$M_x = -0,0513 P L^2 \quad (3.3)$$

$$\delta_{\max} = 0,3078 P_u (L/h)^2 \quad (3.4)$$

gdzie P_u jest maksymalnym, dopuszczalnym ciśnieniem, które nie powoduje uszkodzenia membrany czujnika.

Czułość ciśnieniowa wyrażona względną zmianą rezystancji spowodowaną naprężeniami mechanicznymi (przy założeniu punktowej lokalizacji piezorezystorów pośrodku boków membrany) ma postać:

$$\Delta R/R = -0,1539 \pi_{44} (1 - \nu) \Delta P (L/h)^2 \quad (3.5)$$

Zmiana napięcia wyjściowego pod wpływem zmian ciśnienia wynosi:

$$\Delta V_0 = V_c [(\Delta R/2R)\nu - (\Delta R/2R)_p] = 0,1539 \pi_{44} (1 - \nu) \Delta P (L/h)^2 V \quad (3.6)$$

a czułość czujnika wyraża się wzorem:

$$S = \Delta V_0 / V_c P = 0,1539 \pi_{44} (1 - \nu) (L/h)^2 \quad (3.7)$$

Należy zauważyć, że im większa wartość stosunku długości boku membrany do jej grubości, tym mniejsza sztywność mechaniczna membrany, dzięki czemu można uzyskać większą czułość czujnika. Również zwiększanie poziomu domieszkowania piezorezystorów powoduje zwiększenie czułości. Graniczne ciśnienie, powyżej którego membrana może ulec uszkodzeniu, można określić z wyrażenia:

$$P_u = 3,25 E (L/h)^2 \quad (3.8)$$

Narzędziami o wiele dogodniejszymi od analitycznej metody są programy komputerowe do symulacji i modelowania czujników krzemowych metodą elementów skończonych. Najbardziej rozpowszechnionymi programami są: ANASYS oraz SAMCEF działający na bazie systemu UNIX, który jest wykorzystywany do projektowania czujników w Instytucie Technologii Elektronowej. Szersze przedstawienie metod numerycznych do projektowania czujników wybiega poza ramy tej monografii. Natomiast czytelnicy zainteresowani tym tematem znajdują jego wyczerpujące omówienie w [138].

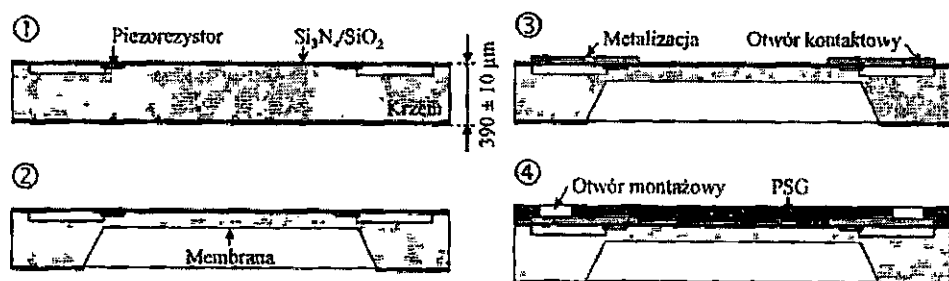
Przy projektowaniu krzemowych czujników ciśnienia należy pamiętać o silnym wpływie zmian temperatury na parametry czujnika. W większości przypadków czujniki takie wymagają wprowadzania dodatkowej kompensacji temperaturowej. Kompensację taką można wykonać bądź na poziomie producenta czujników w trakcie procesów wytwarzania czujników, bądź na etapie aplikacji przez użytkownika. W pierwszym przypadku elementy kompensujące są wytwarzane bezpośrednio na strukturze czujnika ciśnienia, na ogół w postaci dodatkowych rezystorów kompensujących odpowiednio połączonych z piezorezystorami. Dobór rezystorów jest możliwy dzięki technologii wzajemnych proporcji między współczynnikiem piezorezystancji a współczynnikiem czułości. W praktyce zmniejszenie wpływu temperatury na parametry czujnika uzyskuje się przez zmniejszanie czułości czujnika poprzez zwiększanie poziomu domieszkowania piezorezystorów. Przy większej koncentracji domieszek, a tym samym większej degeneracji półprzewodnika obserwuje się zmniejszenie czułości na oddziaływania czynników środowiskowych takich jak: zakłócenia spowodowane przez jonizację, oświetlenie, promieniowanie, ładunki powierzchniowe.

Jak wspomniano, kompensację wpływu zmian temperatury można przeprowadzić również na poziomie użytkownika. Nieco szersze omówienie tego problemu jest zamieszczone w p. 5.2.1.

3.1.2. Technologia krzemowych czujników ciśnienia

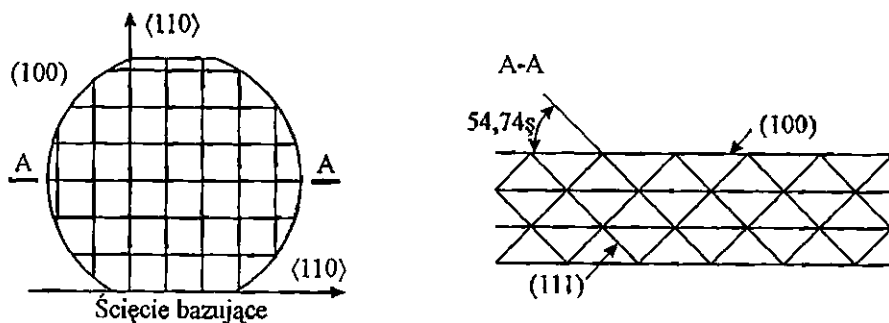
Prace nad czujnikami wielkości nieelektrycznych przeznaczonymi do współpracy z zaawansowanymi układami cyfrowymi doprowadziły do powstania nowej technologii nazwanej mikromechaniką krzemową. Najbardziej znanymi i obecnie produkowanymi, w wielomilionowych seriach, w technologii mikromechaniki krzemowej są czujniki ciśnienia.

Na rys. 3.3 przedstawiono główne fazy procesu technologicznego krzemowego piezorezystancyjnego czujnika ciśnienia [131].



Rys. 3.3. Główne fazy procesu technologicznego krzemowego piezorezystancyjnego czujnika ciśnienia

Materiałem wyjściowym jest podłoże krzemowe o orientacji krystalograficznej (100) typu n, domieszkowane fosforem o rezystywności kilku $\Omega \cdot \text{cm}$, obustronnie polerowane (rys. 3.4) [122].



Rys. 3.4. Schemat przykładowego podłoża krzemowego do wytwarzania czujników ciśnienia z zaznaczonymi płaszczyznami krystalograficznymi i ścięciem bazowym

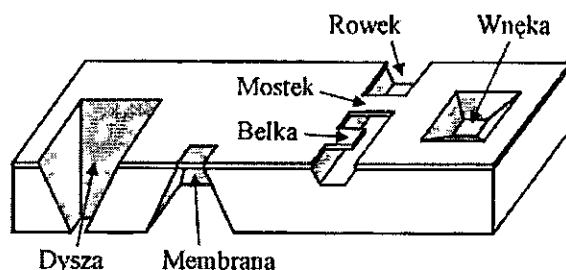
W pierwszych operacjach technologicznych na powierzchni podłoża wytwarza się piezorezystory. Najczęściej są one wykonywane metodą dyfuzji lub implantacji boru. Następnie, również metodą dyfuzji wykonuje się dyfuzyjne ścieżki łączące piezorezystory w mostek. Trójwymiarowy element konstrukcyjny czujnika – membranę wykonuje się metodą anizotropowego trawienia krzemu (*anisotroping etching*). Procesy wytwarzania aluminiowych ścieżek i kontaktów są realizowane metodą naparowania, w większości technologii – na końcu procesu technologicznego. Wyżej opisane procesy należą do tzw. procesów planarnych. Wytwarzanie membrany należy do procesów trójwymiarowych. W stosowanym do tego celu procesie anizotropowego trawienia wykorzystuje się kierunkową zależność trawienia. Szybkość trawienia zależy od rodzaju roztworu i np. dla klasycznego roztworu KOH szybkość trawienia w kierunku $\langle 100 \rangle$ jest 400 razy większa niż w kierunku $\langle 111 \rangle$. Geometria struktury krzemowej ściśle zależy od płaszczyzn kryystalograficznych trawionej płytki [49].

Metody anizotropowego trawienia krystalu krzemu można podzielić następująco [118, 122, 128]:

- „na czas” – wymaga praktycznej znajomości szybkości trawienia krzemu w określonym kierunku kryystalograficznym,
- z zatrzymaniem procesu trawienia po dojściu do odpowiednio domieszkowanych obszarów (*chemical etch stop*),
- z zatrzymaniem procesu trawienia na spolaryzowanym złączu p-n (*electro-chemical etch stop*),
- z zatrzymaniem trawienia przez oddziaływanie dodatkowych czynników takich jak oświetlenie, ciśnienie, mikrofała.

W celu wytworzenia membrany, podobnie jak w standardowej technice fotolitograficznej, na powierzchnię trawionej płytki nanosi się warstwę maskującą. W wyniku naświetlenia tej warstwy przez odpowiednią maskę, a następnie wytrawienie miejsc nieutwardzonych, na powierzchni uzyskuje się warstwę ochronną o odpowiednich kształtach. Nieosłonięte warstwy płytki krzemowej są następnie trawione odpowiednimi roztworami. Bardzo ważnym problemem jest właściwe „zgranie” położenia membrany od strony tylnej w stosunku do piezorezystorów wytworzonych po przeciwnej stronie płytki. Standardowym roztworem trawiącym jest wodno-alkoholowy roztwór wodorotlenku potasu KOH [62]. Krzem można również trawić w wodnym roztworze etylenodwuaminy (EDP) lub w roztworze czterometylowodorotlenku amonowego $(\text{CH}_3)_4\text{NOH}$ nazywanego TMAH [8]. Rodzaj warstwy maskującej zależy od rodzaju roztworu. Optymalnym materiałem maskującym do procesu trawienia w KOH jest azotek krzemu, który w roztworze KOH jest trawiony z szybkością ok. 1,4 nm/min. Do maskowania w roztworach typu TMAH jest używane aluminium. Warstwy maskujące mogą być również wykonane ze złota, chromu, srebra, miedzi [4, 12, 49, 59].

W procesie anizotropowego trawienia krzemu można otrzymywać elementy o różnych kształtach i geometrii. Na rys. 3.5 przedstawiono przykłady trójwymiarowych struktur, które można wytworzyć w krzemie (100) metodą anizotropowego trawienia.



Rys. 3.5. Typowe kształty trójwymiarowych struktur uzyskane w krzemie (100) metodą anizotropowego trawienia

W ostatnim okresie powstały nowe konstrukcje struktur mikromechanicznych, do których można zaliczyć:

- belki krzemowe stosowane w konstrukcjach czujników siły,
- membrany i belki obciążone dodatkowym balastem (o względnie dużej masie) stosowane w czujnikach przyspieszenia,
- wgłębienia w krzemie (*cavity*), stosowane w czujnikach ciśnienia, różnicy ciśnień i ciśnienia absolutnego, w których wykorzystuje się zmianę pojemności (czujniki pojemnościowe) [52, 54].

W czujnikach ciśnienia najczęściej wykorzystywane są membrany i głębokie otwory (w kontaktach BSC) [58, 68].

Proces anizotropowego trawienia krzemu jest również stosowany do tworzenia struktur wykonawczych, np. mikroświatowników (*actuators*). Przykładami takich struktur są mikromotory zbudowane z kół zębatach o średnicy 200 μm , krzemowe zawory, mikropompy, manipulatory, przełączniki. Obecnie najnowsze, najbardziej wyrafinowane struktury mikromechaniczne mogą się samodzielnie poruszać w polu elektrostatycznym [45, 54]. Zaletą opisywanej technologii jest możliwość integrowania w jednej strukturze układów czujników, elementów wykonawczych i układów przetwarzających sygnały. Dzięki tym osiągnięciom, najnowszy trend w mikromechanice krzemowej jest właśnie związany z mikromechanicznymi systemami (*microelectromechanical system* – MEMS), które są zintegrowanymi przyrządami zawierającymi mikroświatowniki, mikroczujniki oraz układy sterujące i przetwarzające sygnały [8]. Zagadnienia związane z trawieniem anizotropowym, jego zastosowaniami oraz bardzo liczne przykłady struktur MEMS wykonanych w krajowych ośrodkach badawczych przedstawiono w [122, 128].

Większość obecnie wytwarzanych czujników ciśnienia zawiera dodatkowe elementy konstrukcyjne, które mają na celu wzmocnienie mechaniczne delikatnej struktury krzemowej, a także odizolowanie jej od niepożądanych naprężeń, które może wnosić proces montażu czujnika. Dodatkowe elementy, zwane często wspornikami, mogą być wykonane z krzemu lub szkła. Na tym etapie wytwarzania czujników decyduje się, czy czujnik będzie używany do pomiaru ciśnienia lub różnicy ciśnień, czy do pomiaru ciśnienia absolutnego. W pierwszych dwóch przypadkach we wsporniku wykonuje się otwór, przez

który będzie możliwe doprowadzenie ciśnienia odniesienia. W czujnikach ciśnienia absolutnego takiego otworu nie ma, a proces łączenia płytki membranowej ze wspornikiem odbywa się w warunkach próżni.

Wsporniki krzemowe łączy się z płytką membranową najczęściej metodą spajania eutektycznego. Metoda ta polega na połączeniu dwóch elementów wykonanych z różnych materiałów, w temperaturze eutektyki [7, 42]. Materiałem najczęściej stosowanym do połączeń eutektycznych z krzemem jest złoto. Temperatura eutektyki stopu Si-Au wynosi 363 °C. W praktyce stosuje się nieco wyższą temperaturę (ok. 370 °C), aby skrócić czas procesu łączenia. Elementy montowane metodą eutektyki złoto-krzem mogą pracować w temperaturze do 200 °C. Technologia ta jest szczególnie odpowiednia do czujników medycznych stosowanych *in vivo*, w których ważna jest minimalizacja wymiarów i nieszkodliwość materiałów dla organizmu. Główną zaletą spajania eutektycznego jest doskonałe dopasowanie temperaturowe obu łączonych płytek (ten sam materiał), niska temperatura procesu łączenia, a także kompatybilność technologiczna z procesami planarnymi układów scalonych. Podstawową wadą jest niestabilność połączeń i możliwość rozhermetyzowania się czujnika z przypadku, gdy powierzchnie łączone nie będą dostatecznie oczyszczone z samoistnych tlenków tuż przed połączeniem.

W przypadku płytek szklanych, połączenie z płytką krzemową jest wykonywane metodą tzw. anodowego bondingu, w którym wykorzystuje się zjawisko dyfundowania dodatnich jonów szkła Na⁺ w kierunku ujemnie spolaryzowanego elementu wykonanego z krzemu lub metalu [5, 44]. W temperaturze ok. 400 °C, przy napięciu 1000 V dodatnie jony sodu dryfują w kierunku katody, gdzie są neutralizowane. Odpowiednio nieruchome jony tlenu w szkłe tworzą obszar naładowany ujemnie. W rezultacie dzięki powstającym siłom elektrostatycznym na styku szkła z krzemem tworzy się ciągle, bardzo silne połączenie (*bond*) istniejące również po ochłodzeniu i wyłączeniu napięcia. Montaż struktur na podłożach krzemowych i szklanych może odbywać się na całej płytce przed jej pocięciem.

Technologia mikromechaniki pozwala na wytwarzanie czujników ciśnienia o szerokim zakresie pomiarowym. Przyjmuje się, że wytworzone w tej technologii czujniki mogą efektywnie pracować w zakresie od 1 kPa do 40 MPa. Powyżej 40 MPa, ze względu na właściwości mechaniczne krzemu, polecane są inne technologie (np. cienkowarstwowe lub grubowarstwowe). Niewątpliwie, zakres ciśnień ma również wpływ na konstrukcję czujników, nie tylko na grubość membrany, ale również na konstrukcję innych elementów składowych czujnika [80]. Np. w czujnikach bardzo niskich ciśnień stosuje się taki układ piezorezystorów na membranie, aby zminimalizować tzw. efekt balonowy, który nie występuje przy wyższych zakresach ciśnień. Efekt ten polega na niekontrolowanym wygięciu cienkiej membrany na skutek termicznego niedopasowania warstw naniesionych na bardzo cienką membranę krzemową, co może być powodem znacznego wzrostu histerezy termicznej czujnika [17]. Natomiast w czujnikach wysokich ciśnień nie ma potrzeby wyprowadzania dodatkowego otworu ciśnieniowego we wsporniku, a pod membraną może być zamknięte powietrze, a nie próżnia, co znacznie ułatwia proces technologiczny. Wpływ rozszerzającego się pod wpływem temperatury powietrza pod grubą membranę czujnika, nie ma większego wpływu na parametry czujnika.

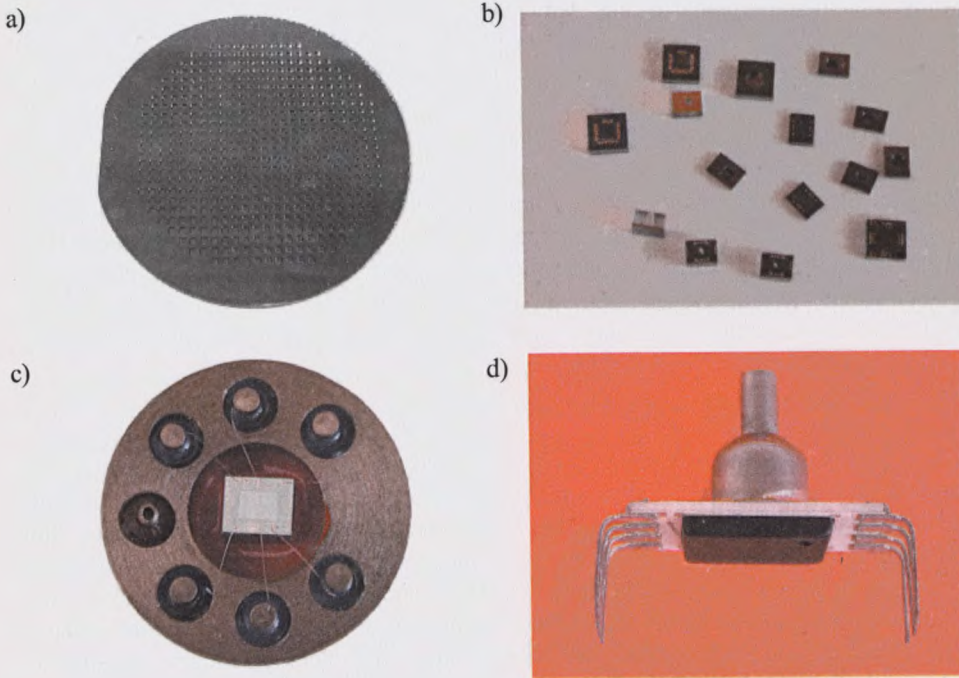
Czujniki krzemowe mają trzy podstawowe wady: ograniczone temperatury pracy (praktycznie do 100 °C), dużą wrażliwość parametrów czujników na zmiany temperatury oraz brak odporności na oddziaływanie środowiska pomiarowego. Czujnik ciśnienia może bezpośrednio stykać się jedynie z suchymi, nieagresywnymi gazami. W przypadku innych mediów struktury czujników muszą być chronione przez odpowiednie membrany separujące. Natomiast poszerzenie zakresu temperatury pracy można stosować poprzez zmianę podłoża czujnika, a także wprowadzenie nowych materiałów, z których są wykonywane piezorezystory.

W technologii mikromechaniki krzemowej można również wytwarzać czujniki pojemnościowe. W tym przypadku czujnik składa się z membrany wykonanej w krzemie i umieszczonej pomiędzy dwoma płytkami szklanymi. Na wewnętrznej powierzchni szkła naparowano cienkie warstwy aluminium. Taka struktura tworzy kondensator różnicowy [132]. Pod wpływem ciśnienia działającego na jedną stronę czujnika membrana ugina się, wskutek czego zmienia się odległość od jednej z płytek kondensatora, co powoduje zwiększanie się pojemności po jednej stronie czujnika i zmniejszanie po drugiej. Zmiana pojemności jest wykrywana przez odpowiedni układ elektroniczny. Zaletą takiej konstrukcji jest odporność na przeciążenia ciśnieniowe, gdyż w razie przekroczenia bezpiecznego ciśnienia delikatna krzemowa membrana może być podparta płytką szklaną. W porównaniu z czujnikami piezorezystancyjnymi, krzemowe czujniki pojemnościowe charakteryzują się niższymi szumami, większą rozdzielczością i mniejszym wpływem temperatury na ich parametry, jednakże wymagają one bardziej skomplikowanych układów pomiarowych.

Zaletą krzemowych czujników pojemnościowych jest możliwość ich integracji w wieloczujnikowe matryce, które stały się podstawowym elementem konstrukcyjnym zaawansowanych technologicznie czujników dotyku stosowanych w robotach. Mikromechanikę krzemową można również wykorzystać do wytwarzania krzemowych czujników ciśnienia dynamicznego. W tym przypadku wytwarza się cienki element krzemowy (np. belkę), który odpowiednio pobudzony stanowi drgający element pomiarowy [96]. Odmianą czujników krzemowych są czujniki, w których podłoże jest wykonane z izolatora (tzw. technologia SOI – *silicon on insulator*). Składają się one z układu piezorezystorów utworzonych z polikrystalicznego krzemu naniesionego na podłoże wykonane z szafiru, dzięki czemu czujnik może pracować w wyższej temperaturze (do 250 °C) niż czujnik wykonany z monolitycznego krzemu. W technologii SOI wykonano jeden z najmniejszych czujników ciśnienia do zastosowań w motoryzacji. Odkształcenie membrany powstające pod wpływem zmieniającego się ciśnienia powoduje zmianę pojemności pomiędzy membraną a metalizowaną elektrodą wykonaną na podłożu struktury. Dodatkowo, zintegrowana elektroda odniesienia koryguje błędy temperaturowe czujnika. Zaletą opisanego czujnika jest jego niewielka masa i bardzo małe wymiary (0,5 mm na 2 mm); zakres temperatury pracy od -40 °C do 125 °C oraz czułość 1 pF/100 kPa [57].

Czujniki krzemowe stanowią dzisiaj znakomitą większość wytwarzanych czujników, z uwagi na masowość produkcji, łatwość dostępu i niewysokie ceny. Są one oferowane na rynku nie tylko w postaci obudowanych struktur, ale także w postaci całych płytek zawierających dziesiątki lub setki czujników.

Na rys. 3.6 przedstawiono różne postacie czujników: od całych płytek (*wafel*), na których znajduje się kilkaset, a nawet kilka tysięcy struktur, poprzez pojedyncze struktury (*chip*), aż do struktur zmontowanych w typowych obudowach (*sensor*).



Rys. 3.6. Oferowane elementy czujników (w postaci płytek, struktur, czujników obudowanych)

3.1.3. Technologia czujników zintegrowanych

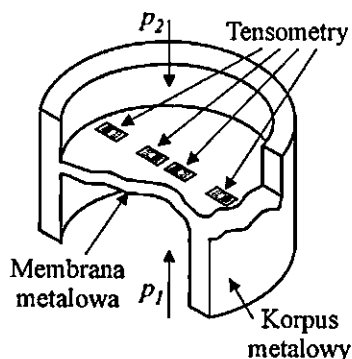
Nieocenioną zaletą technologii krzemowych jest możliwość wytwarzania w jednej strukturze kilku rodzajów czujników (ciśnienia, temperatury, wilgotności), a także integracja czujników z układami przetwarzającymi. Dzięki możliwości integracji czujników z innymi układami elektronicznymi (krzemowymi), można wprowadzać do struktury czujnika dodatkowe funkcje, dzięki czemu można otrzymać czujniki inteligentne (*smart*). Umożliwiają one bezpośrednią współpracę z komputerowymi systemami pomiarowymi i sterującymi. Czujnik inteligentny może zawierać w jednej strukturze krzemowej lokalną pamięć, układy wejścia/wyjścia, układy przetwarzające sygnał analogowy na sygnał cyfrowy itd. Pamięć lokalna czujnika może być wykorzystana do przechowywania informacji o samym czujniku (producent, numer seryjny, zakres pomiarowy, rodzaj zasilania,

rodzaj sygnału wyjściowego, parametry). Dzięki temu, włączony do pracy w instalacji przemysłowej może sam informować nadrzędny system o sobie bez udziału operatora.

Technologia czujników zintegrowanych polega na połączeniu zaawansowanych technologii układów scalonych, takich jak CMOS z mikromechaniką krzemową. Podstawowym problemem do pokonania jest wykonanie na jednej strukturze wysoce zintegrowanych elementów planarnych z elementami trójwymiarowymi. Jednym z pierwszych rozwiązań technicznych była matryca czujników ciśnienia złożona z 32x32 elementów, zintegrowana z układami pamięci i przetwarzania sygnału. Konstrukcję tę przedstawiła w 1986 roku firma Toyota [121.] Każda komórka matrycy składa się z pełnego mostka piezorezystancyjnego oraz układu pomiarowego. Matrycę czujników, przeznaczoną do używania jako detektora dotyku, wykonano w technologii bipolarnej i mikromechaniki krzemowej. W pełni zintegrowany czujnik ciśnienia z układami przetwarzania sygnału i kompensacji cyfrowej został przedstawiony przez firmę Silicon Microstructures Inc. [121]. Na jednej strukturze krzemowej zostały wykonane następujące elementy: czujnik ciśnienia z wytrawioną krzemową membraną, wzmacniacze operacyjne, pamięci EEPROM do przechowywania danych oraz mikroprocesorowy układ obróbki danych.

3.1.4. Technologia czujników cienkowarstwowych

Czujniki wykonywane w technologii cienkowarstwowej są częściowo pozbawione wad czujników krzemowych, zwłaszcza małej odporności na działanie agresywnych środowisk pomiarowych. Wynika to z faktu, że piezorezystory można nanosić bezpośrednio na membrany stalowe lub ceramiczne, które mogą współpracować z większością środowisk pomiarowych. Technologia cienkowarstwowa polega na nanoszeniu w próżni metali lub związków metali na nieprzewodzące (lub pokryte warstwą nieprzewodzącą) podłoże. Wyróżnia się dwie podstawowe metody nanoszenia cienkich warstw: naparowanie lub napylenie próżniowe [38]. Na rys. 3.7 przedstawiono strukturę cienkowarstwowego czujnika ciśnienia naniesionego na metalową membraną.

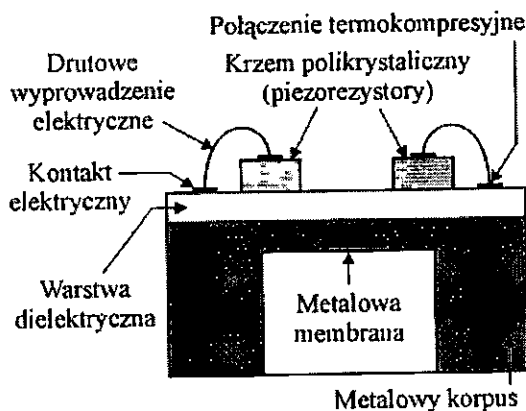


Rys. 3.7. Struktura cienkowarstwowego czujnika ciśnienia naniesionego na metalową membraną

Zastosowany proces technologiczny polega na naniesieniu warstwy izolującej SiO_2 na podłoże metalowe, a następnie napyleniu piezorezystorów przez odpowiednie maski. Materiałem na piezorezystory mogą być metale lub ich związki wykazujące właściwości piezorezystancyjne. Po wykonaniu piezorezystorów nanosi się warstwy kontaktowe (na ogół stopy niklu z chromem lub azotki tantalu), które w procesie montażowym są łączone drutem złotym lub aluminiowym z wyprowadzeniami obudowy [7].

Jak wspomniano wcześniej, zaletami czujników cienkowarstwowych jest mały wpływ temperatury na parametry czujników, dobre właściwości dynamiczne, doskonała stabilność oraz duża odporność na czynniki środowiskowe (agresywne media, udary, wibracje). Wadami są: stosunkowo mały sygnał wyjściowy, dość duże wymiary, a także znacznie wyższa cena niż czujników krzemowych. W technice cienkich warstw wykonuje się również pojedyncze tensometry foliowe, nanoszone najczęściej na elastyczne podłoża z tworzyw sztucznych. Tensometry foliowe są najczęściej wykorzystywane do pomiarów naprężeń, mogą być również wykorzystywane w czujnikach ciśnienia do nietypowych zastosowań, szczególnie przy pomiarach ciśnienia w bardzo nieprzyjaznych środowiskach pomiarowych np. zawierających cząstki ściernie.

Interesującym rozwiązaniem technologicznym jest połączenie możliwości techniki cienkich warstw z technologią krzemową. Na rys. 3.8 przedstawiono etapy procesu technologicznego pozwalającego na wytworzenie piezorezystorów krzemowych bezpośrednio na membranie stalowej. W opisanej konstrukcji środowisko pomiarowe oddziałuje od spodu struktury bezpośrednio na cienką stalową membranę [57].



Rys. 3.8. Struktura z piezorezystorami krzemowymi wytworzonymi bezpośrednio na membranie stalowej

3.1.5. Technologia czujników grubowarstwowych

Istotą technologii grubych warstw jest nanoszenie metodą sitodruku na podłoża ceramiczne warstw wykonanych z odpowiednich past (przewodzących, izolacyjnych). Producenci past do sitodruku oferują również pasty, które charakteryzują się właściwościami piezorezystancyjnymi [7, 61]. Naniesione warstwy są następnie wypalane w piecach tunelowych, w odpowiednich temperaturach. Zaletą technologii grubowarstwowej jest, podobnie jak w cienkowarstwowej, możliwość nanoszenia piezorezystorów bezpośrednio na membranę czujnika. Membrana ta najczęściej jest wykonana z ceramiki korundowej (Al_2O_3), na którą jest naniesiony mostek piezorezystancyjny wykonany z pasty o właściwościach piezorezystancyjnych. Połączenia elektryczne i kontakty są wykonywane z past palladowo-srebrnych (Pd/Ag), które są stabilne w temperaturze do 500 °C. Membrany ceramiczne charakteryzują się dużą odpornością chemiczną i korozyjną, dzięki czemu czujnik może pracować bez dodatkowych membran separujących w trudnych warunkach środowiskowych [57]. Dodatkowymi zaletami czujników grubowarstwowych jest stosunkowo prosta technologia i względnie niskie koszty wytwarzania. Czujniki grubowarstwowe można wytwarzać w małych seriach, a nakłady na urządzenia technologiczne są nieporównanie mniejsze niż do technologii krzemowych czy cienkowarstwowych. Czujniki grubowarstwowe mogą pracować nawet w temperaturze do 300 °C, jednak w wyższych temperaturach wykazują dość dużą niestabilność.

Czujniki cienko- i grubowarstwowe są produkowane i stosowane w znacznie mniejszym zakresie niż czujniki krzemowe. Szczegółowe omówienie ich konstrukcji i technologii wybiega poza ramy tej monografii.

3.2. Montaż czujników

Pod pojęciem montażu rozumie się umieszczanie w obudowie jednego lub wielu elementów i oferowanie ich jako funkcjonalną całość [22]. Podstawowe funkcje montażu w mikroelektronice są następujące:

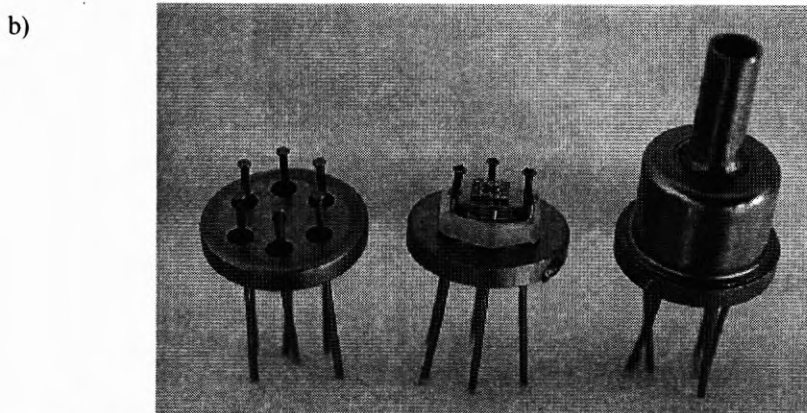
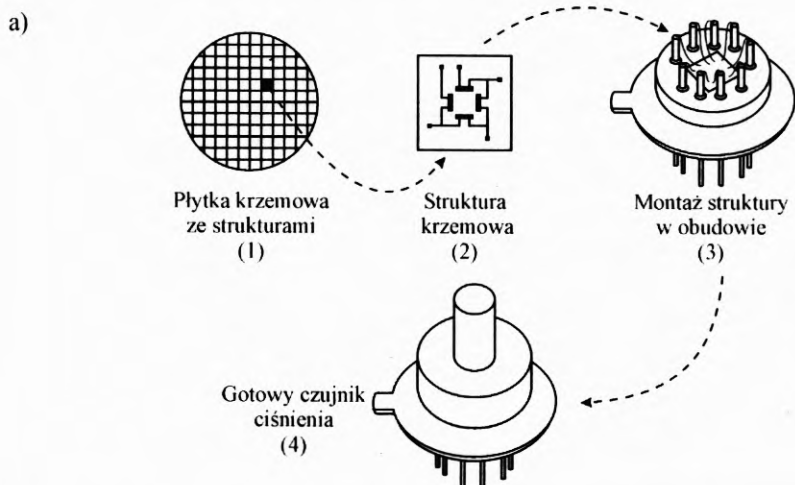
- zamocowanie struktury na stabilnym podłożu,
- wykonanie połączeń elektrycznych pomiędzy strukturą a obudową,
- zapewnienie dostatecznego odprowadzania ciepła,
- zapewnienie ochrony przed szkodliwymi wpływami otoczenia.

Naturalnie, przy montażu czujników należy zapewnić przeniesienie zmian wartości wielkości mierzonej do struktury czujnika z możliwie najmniejszymi zniekształceniami. Montaż czujników stanowi jedną z podstawowych operacji technologicznych w procesie ich wytwarzania, a właściwie opracowana technologia montażu i dobór materiałów montażowych decyduje o jakości i trwałości czujników. Np. dryfty czujników ciśnienia pojawiające się w trakcie ich eksploatacji, można znacząco zmniejszyć przez odpowiedni dobór materiałów montażowych i warunków procesów ich łączenia., które w znacznie mniejszym stopniu zależą od konstrukcji i procesu wytwarzania struktury czujnika niż od procesów montażowych [4].

Jak już wspomniano, koszt struktury czujnika wynosi ok. 10 % kosztów jego obudowanej wersji. Zatem ze względów ekonomicznych jest zasadny zakup samych struktur i ich montaż w specjalizowanych firmach [51, 78]. W celu poprawnego wyboru czujników dla

danej aplikacji należy nie tylko doskonale znać warunki ich pracy, ale również konstrukcję obudów, materiały stosowane do ich wytworzenia, wpływ czynników zewnętrznych na czujnik itp. Ma to szczególne znaczenie dla czujników pracujących w trudnych warunkach środowiskowych. W tym przypadku niezawodność, powtarzalność i trwałość czujników mikromechanicznych w bardzo dużym stopniu zależy od rodzaju obudowy i procesów montażu. Dlatego też w niniejszej monografii problem montażu czujników będzie omówiony nieco szerzej. Na rys. 3.9 przedstawiono trzy etapy procesu montażu struktury czujnika:

- wykonanie połączenia mechanicznego pomiędzy strukturą a obudową,
- wykonanie połączeń elektrycznych pomiędzy strukturą a obudową,
- dołączenie lub naniesienie elementów ochronnych.



Rys. 3.9. Podstawowe operacje montażowe: a) rysunek poglądowy, b) przykłady rzeczywistych rozwiązań (opublikowano za uprzejmą zgodą Instytutu Technologii Elektronowej w Warszawie)

3.2.1. Technologie łączenia struktur z obudową

Proces łączenia struktur z podłożem ma na celu:

- zapewnienie mechanicznego wzmocnienia struktury,
- odprowadzenie wydzielającego się ciepła,
- odizolowanie struktury od naprężeń powstających w obudowie,
- (w pewnych przypadkach) zapewnienie kontaktu elektrycznego struktura-obudowa.

Podstawową zasadą przy montażu struktur krzemowych jest to, aby właściwości termiczne materiałów użytych do montażu były takie same lub zbliżone do właściwości krzemu i warstw naniesionych na jego strukturze [22]. Powyższa uwaga odnosi się również do współczynników rozszerzalności liniowej łączonych materiałów [22, 39].

Stosowane w czujnikach podłoża powinny charakteryzować się dobrą przewodnością cieplną, która decyduje o możliwościach rozpraszania ciepła przez obudowę. Jest to szczególnie istotne w przypadku montażu gęsto upakowanych matryc czujnikowych. O właściwościach połączenia struktura-obudowa decyduje również materiał pośredni łączący obydwa elementy (o ile jest użyty). W tabelicy 3.1 podano podstawowe, ważne z punktu widzenia procesów montażowych, właściwości krzemu i warstw nanoszonych na struktury w procesach technologicznych.

Tablica 3.1. Podstawowe właściwości krzemu i niektórych innych materiałów [11, 22, 128]

Materiał	Modul Younga (GPa)	Gęstość (g/cm ³)	Przewodność cieplna (W/mK)	Temperaturowy współczynnik rozszerzalności (ppm/K)
Krzem Si	1,9	2,3	157	2,33
Azotek krzemu Si ₃ N ₄	3,85	3,1	190	0,8
Dwutlenek krzemu SiO ₂	0,73	2,5	140	0,55
Węglik krzemu SiC	7,0	3,2	350	3,3

3.2.1.1. Materiały na podłoża

Podłoża ceramiczne

W tabelicy 3.2 zestawiono podstawowe parametry kilku rodzajów ceramiki najczęściej stosowanych do wytwarzania podłoży w obudowach czujników.

Azotek glinu (AlN) jest materiałem o zbliżonym do krzemu współczynniku rozszerzalności liniowej. Charakteryzuje się on dobrą przewodnością cieplną, jednak z uwagi na wysokie koszty wytwarzania nie jest powszechnie stosowany [40]. Typowa ceramika alundowa (Al₂O₃) ma prawie dwukrotnie większy współczynnik rozszerzalności

Tablica 3.2. Dane porównawcze materiałów ceramicznych [41, 47, 50, 72]

Właściwość	Jednostka miary	AlN	Al ₂ O ₃	BeO	AlSiC
Gęstość	g/cm ³	3,28	3,8	2,9	3,0
Przewodność cieplna	W/mK	70-200	20	240	200
Współczynnik rozszerzalności liniowej	ppm/K	4,6	7,3	7,5	7,0
Stała dielektryczna	dla 1 MHz	8,8	8,5	6,5	
Rezystywność objętościowa	Ωcm	>1014	>1014	>1014	
Tangens strat	tgθ x 10 ⁻⁴ dla 1 MHz	5-10	3	5	
Wytrzymałość na zginanie	kg/mm ²	30	30	20	

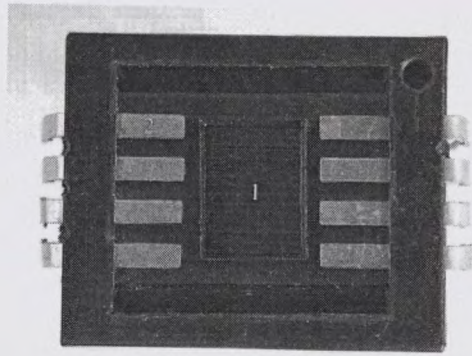
liniowej niż krzem, jednakże poprzez dobranie odpowiednich domieszek można uzyskać dość duże zbliżenie tych współczynników. Podłoża alundowe charakteryzują się małą przewodnością cieplną, pomimo to są chętnie stosowane z uwagi na niskie koszty wytwarzania i łatwość dostępu. Ceramika berylowa (BeO) charakteryzuje się doskonałymi parametrami, jednak z uwagi na cenę i właściwości trujące, rzadko stosuje się ją do wytwarzania podłoży. AlSiC jest materiałem o dobrej przewodności cieplnej, dlatego jest używany na podłoża do montażu elementów dużej mocy oraz do montażu mikrofalowych układów scalonych, wykonanych z arsenku galu.

Podłoża wykonywane z ceramiki mogą być jedno- lub wielowarstwowe. Podłoża wielowarstwowe stanowią obecnie najnowocześniejsze, użyteczne w praktyce, rozwiązania technologiczne, gdyż pozwalają na dużą gęstość upakowania połączeń elektrycznych występujących np. w matrycach czujników. Podstawowymi technikami wykonywania podłoży wielowarstwowych są:

- wypalanie w wysokiej temperaturze (ok. 1500 °C) w atmosferze wodoru (*high temperature cofire ceramic* – HTCC),
- wypalanie w niskiej temperaturze (ok. 800 °C) w atmosferze powietrza (*low temperature chip carrier* – LTCC) [135],
- nanoszenie struktur cienkowarstwowych metal-dielektryk.

Podłoża z tworzyw sztucznych

Podłoża z tworzyw sztucznych są wykonywane z takich materiałów jak: żywice epoksydowe i epoksydowo-szklane, poliimidy, teflon. Zależnie od grubości i składu tworzywa podłoża mogą być sztywne lub elastyczne (w temperaturze pokojowej). Na rys. 3.10 pokazano przykład podłoża z tworzywa sztucznego. Parametry wybranych podłoży z tworzyw sztucznych podano w tablicy 3.3.



Rys. 3.10. Podłoże z tworzywa sztucznego (wykonano w PIAP): 1 – miejsce montażu struktury czujnika ciśnienia absolutnego, 2 – wyprowadzenia elektryczne (ażur)

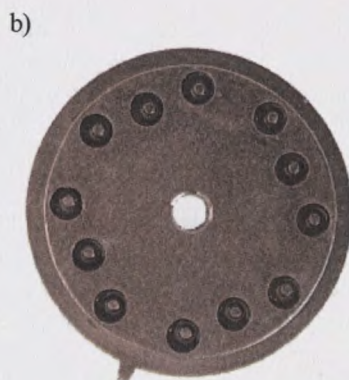
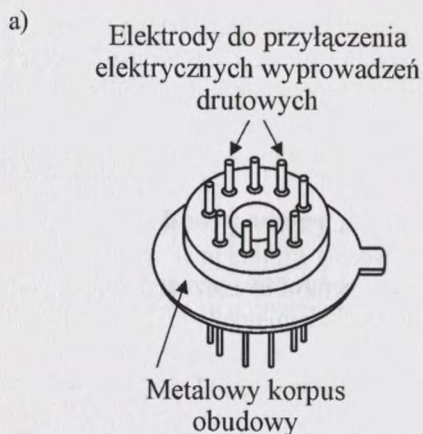
Tablica 3.3. Parametry wybranych podłoży z tworzyw sztucznych [15, 19, 22]

Rodzaj laminatu	Stała dielektryczna	Współczynnik rozszerzalności temperaturowej (ppm/K)	Przewodność cieplna (W/mK)	Temperatura procesu wytwarzania (°C)
Żywica epoksydowa	3,6	6	20	200
Żywica szklano-epoksydowa	4,7	158	20	175
Poliimid	3,5	500	20	350
Teflon	2,2	200	10	400

Podłoża metalowe

Podłoża metalowe są wykonywane ze stali lub kowaru; materiały te często pokrywa się dodatkowo miedzią lub złotem. Typowym przykładem podłoża metalowego jest tzw. przepust, w którym osadzono zatopione w szkle wyprowadzenia elektryczne (rys. 3.11).

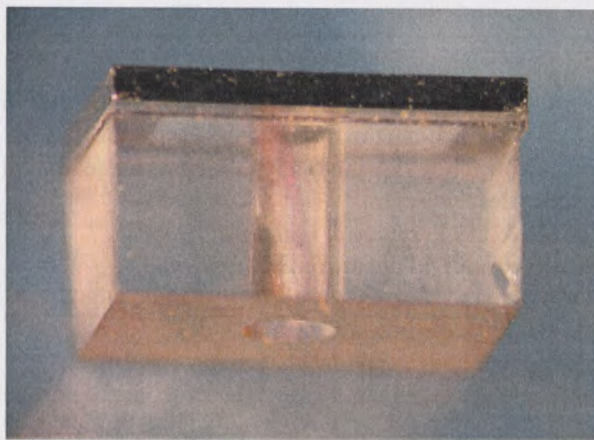
Jak wspomniano wyżej, w czujnikach z podłożami metalowymi wyprowadzenia elektryczne są wykonywane w szklanych tulejkach, dzięki czemu uzyskuje się dobrą izolację elektryczną, stabilność termiczną i dużą niezawodność.



Rys. 3.11. Podłoże metalowe do montażu czujnika ciśnienia:
a) rysunek poglądowy, b) przykład podłoża

Podłoża krzemowe i szklane

Jak wspomniano wcześniej, w celu odizolowania płytki czujnika z membraną i piezorezystorami od niepożądanych naprężeń, powstających przy montażu struktury w obudowie, stosuje się dodatkowe płytki, zwane wspornikami. Wsporniki są wykonywane najczęściej z krzemu lub szkła. Przykładem szkła, które może stanowić wspornik struktury krzemowej jest szkło borokrzemowe typu Pyrex 7052. Strukturę czujnika ciśnienia zamontowaną na podłożu szklanym przedstawiono na rys. 3.12.



Rys. 3.12. Struktura czujnika ciśnienia na podłożu szklanym

Montaż struktur czujników mikromechanicznych można wykonywać na wszystkich omówionych podłożach. Wybór materiału podłoża zależy przede wszystkim od przyszłego zastosowania czujnika. Poniżej scharakteryzowano główne przeznaczenia podłoży w zależności od materiału, z którego są wykonane:

- podłoża z tworzyw sztucznych – czujniki o bardzo niskiej cenie, przeznaczone do produkcji masowej,
- podłoża metalowe – czujniki o dobrych parametrach, przeznaczone do produkcji masowej,
- podłoża ceramiczne – czujniki kompensowane temperaturowo przeznaczone do produkcji średniej wielkości, czujniki zintegrowane z układami przetwarzającymi sygnały,
- podłoża ceramiczne, krzemowe, z tworzyw sztucznych – czujniki montowane w formie matryc (zależnie od wymagań).

3.2.1.2. Technologie mechanicznego łączenia struktur czujników z obudową

Struktura czujnika mikromechanicznego może być łączona z podłożem obudowy lub płytkami wspornikowymi następującymi metodami:

- spajanie eutektyczne (*eutectic bonding*),
- łączenie elektrostatyczne (*electrostatic anodic bonding*),
- klejenie (*adhesive bonding*),
- niskotemperaturowe łączenie szkła z krzemem (*low-temperature glass bonding*),
- wysokotemperaturowe łączenie bez warstw pośrednich (*high temperature fusion bonding, HTFP bonding*) [117, 135].

Metody spajania eutektycznego i anodowego *bondingu* zostały szerzej omówione w p.

3.1. Poniżej ograniczono się do opisanego procesów klejenia struktur do podłoża, które są najczęściej stosowanymi metodami łączenia struktur czujników z podłożami, i które można wykonywać na typowej, niezbyt rozbudowanej linii montażowej.

Klejenie struktur

Techniki klejenia struktur okazały się najbardziej odpowiednie do montażu struktur czujników o dużych wymiarach oraz matryc czujników [18, 50], zatem nieodzowne jest sformułowanie podstawowych wymagań dla tych klejów. Kleje powinny charakteryzować się następującymi właściwościami:

- dobrą adhezją do struktury krzemowej i podłoża,
- minimalnymi naprężeniami po utwardzeniu warstwy,
- brakiem odgazowywanych zanieczyszczeń,
- małą rezystancją złącza (kleje przewodzące),
- dobrymi właściwościami izolacyjnymi (kleje nieprzewodzące).

Kleje można podzielić na: organiczne i nieorganiczne, przewodzące i nieprzewodzące. Kleje przewodzące są używane do wytwarzania kontaktu elektrycznego pomiędzy strukturą a obudową. Kleje nieprzewodzące stanowią głównie połączenie mechaniczne.

Zaletami klejów organicznych są:

- małe naprężenia wnoszone przez złącze,
- niska temperatura procesu,
- duża liczba producentów i rodzajów klejów,
- niskie koszty montażu.

Wadami klejów organicznych są:

- ograniczona temperatura stosowania (najbardziej stabilna żywica ulega degradacji w temperaturze ok. 400 °C),
- trudności z wytworzeniem złącza klejonego wolnego od porów, co w przypadku żywic przewodzących może prowadzić do zwiększania rezystancji klejonego złącza lub jego płynięcia w podwyższonych temperaturach. Materiały srebrowo-szkliwowe są tak skomponowane, aby po wysuszeniu lub wypaleniu, stały się całkowicie nieorganiczne.

W tabelicy 3.4 przedstawiono wyniki porównań niektórych właściwości połączeń klejonych z połączeniami eutektycznymi.

Tablica 3.4. Porównanie właściwości połączeń klejonych z połączeniami eutektycznymi [27, 50]

Właściwość	Klej organiczny epoksydowy	Klej nieorganiczny na bazie srebra	Połączenia eutektyczne
Gazowanie	tak	nie	nie
Naprężenia termiczne	średnie	średnioniskie	wysokie
Pory w złączu	tak	żadnych	czasami
Stabilność termiczna złącza	niska	wysoka	wysoka
Rozpraszanie ciepła	słabe	wysokie	wysokie
Potrzeba specjalizowanych powierzchni struktury	nie	nie	tak
Koszt	niski	średni	wysoki
Zastosowania	obudowy z tworzywa, układy hybrydowe	obudowy ceramiczne, obudowy metalowe, układy hybrydowe	zastosowania militarne, elementy o bardzo wysokiej niezawodności, elementy biomedyczne

W przypadku montażu czujników ciśnienia w postaci trójwymiarowych struktur mikromechanicznych należy stosować kleje utwardzane w stosunkowo niskich temperaturach, dzięki czemu minimalizuje się powstawanie niepożądanych naprężeń, które mogą przenosić się na membranę pomiarową czujnika, degradując jego parametry. Wadą połączeń klejonych, (szczególnie w przypadku trójwymiarowych wnęk) jest brak powtarzalności grubości nanoszonej warstwy kleju. Częściowe usunięcie tej wady można osiągnąć dzięki stosowaniu klejów w postaci suchych warstw fotoczułych lub klejów utwardzanych promieniami ultrafioletowymi. Kleje nieorganiczne są wykonywane najczęściej na bazie srebra.

Wszystkie opisane wyżej metody łączenia struktur czujników z obudowami mają jedną wadę: są to połączenia konstrukcyjne trwałe. W razie konieczności wymiany uszkodzonej lub zużytej struktury powstaje trudny do rozwiązania problem – trzeba wymienić cały czujnik łącznie z obudową. Jak już wcześniej wspomniano, koszt wytworzenia struktury większości czujników jest kilkakrotnie niższy niż koszt obudowy i montażu, zatem łatwy sposób wymiany uszkodzonej struktury czujnika jest bardzo korzystny z punktu widzenia przyszłej eksploatacji. Problem wymiany struktur jest również kluczowym w przypadku struktur, które z zasady działania są przeznaczone do jednorazowego użycia (np. niektóre czujniki chemiczne). Problem ten można rozwiązać poprzez zastosowanie metody wielokrotnego montażu, jednak w tym przypadku kontakty struktur czujników muszą być wykonane nie od górnej (czynnej) strony czujnika, ale od spodu.

3.2.2. Technologie wykonywania połączeń elektrycznych pomiędzy strukturą a obudową

Metoda wykonania połączeń elektrycznych pomiędzy strukturą czujnika a obudową zależy od kontaktów elektrycznych wykonanych w strukturze. Najważniejszy problem do rozwiązania w wyprowadzeniach elektrycznych to zapewnienie:

- stabilności elektrycznej w środowisku korozyjnym,
- minimalnych prądów upływu pomiędzy elementami czujnika lub mikrosystemu.

3.2.2.1. Wykonywanie kontaktów elektrycznych na strukturach i w obudowach

Kontakty elektryczne łączące poszczególne elementy czujnika powinny się charakteryzować:

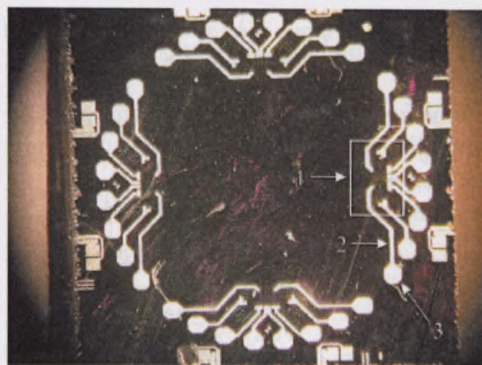
- małą rezystancją,
- liniowością charakterystyki prądowo-napięciowej,
- dobrą adhezją do podłoża,
- dużą niezawodnością w warunkach eksploatacji,
- możliwie małą rezystywnością cieplną.

Kontakty elektryczne wykonywane w technologiach półprzewodnikowych można podzielić na następujące [20, 22, 76, 123]:

- cienkowarstwowe,
- belkowe (*beam lead*),

- podwyższone do montażu automatycznego (TAB – *tape automated bonding*),
- *flip chip*,
- od spodu (BSC).

Kontakty cienkowarstwowe są wykorzystywane zarówno w elementach pojedynczych, jak i w strukturach o dużej skali integracji. W strukturach mikromechanicznych, szczególnie w strukturach czujnikowych, są to najczęściej stosowane rodzaje kontaktów (rys. 3.13).



Rys. 3.13. Przykład kontaktów cienkowarstwowych aluminiowych na strukturze czujnika ciśnienia (wykonano w OBREUS Toruń wg licencji Honeywell):

- 1 – obszar mostka piezorezystancyjnego, 2 – aluminiowe ścieżki,
- 3 – aluminiowe kontakty do montażu ultrakompresyjnego

Kontakty cienkowarstwowe są wykonywane głównie z aluminium. Są one nanoszone próżniowo, a następnie wygrzewane (wtapiane) w temperaturze poniżej punktu eutektycznego ($T_e = 577\text{ °C}$), tworząc z krzemem liniowy kontakt o małej rezystywności. Niekorzystne cechy tego typu kontaktów są następujące:

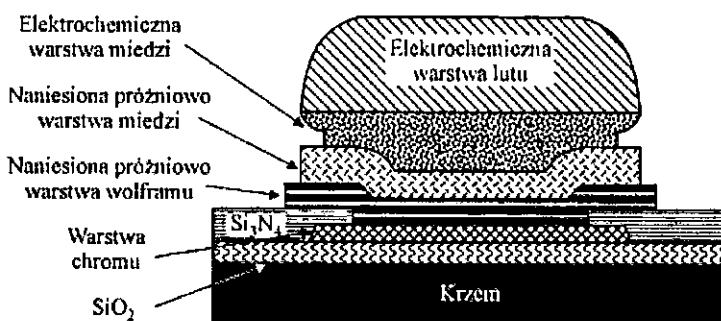
- elektromigracja jonów przy dużych gęstościach prądu przepływającego przez połączenia, co powoduje niestabilność kontaktu,
- wchodzenie aluminium w reakcję z warstwą SiO_2 w podwyższonych temperaturach, co może powodować powstawanie upływności kontaktu.

Wymienione wady kontaktów wykonanych z aluminium można częściowo wyeliminować, stosując kontakty wielowarstwowe, które najczęściej są wykonywane z takich metali jak: wolfram, tantal, chrom i tytan. Materiały te mają dwie zasadnicze wady: dużą rezystywność i małą plastyczność. W celu eliminacji wad, na warstwy tych metali nanosi się jeszcze jedną warstwę, najczęściej złotą. Złoto charakteryzuje się małą rezystywnością, doskonałą odpornością chemiczną i dobrą plastycznością, co jest istotne w procesie montażu czujników. Ponadto może być obciążane dużymi gęstościami prądu, gdyż wykazuje znacznie mniejszą elektromigrację jonów niż aluminium. Wadami złota są słaba adhezja do krzemu i tworzenie związków z krzemem w niskich temperaturach, co znacznie pogarsza rezystancję kontaktu [22, 127].

Kontakty typu *flip chip* zostały opracowane w latach 60. XX wieku przez firmę IBM. Miały one zastąpić drogi i zawodny montaż drutowy, który był wykonywany ręcznie

[22]. Wraz ze wzrostem stopnia integracji układów półprzewodnikowych okazało się, że kontakty *flip chip* mają ogromną zaletę: można je umieszczać w dowolnym miejscu struktury, a nie tylko na brzegach. Dzięki temu wzrosła znacznie liczba wyprowadzeń, które można umieścić na strukturze. Kontakty *flip chip* można wykonywać zarówno na strukturach, jak i na podłożach obudów. Kontakt *flip chip* należy do kontaktów wielowarstwowych, zwanych kontaktami podwyższonymi [56]. Na rys. 3.14 przedstawiono typową konstrukcję kontaktu *flip chip* w wersji do lutowania. Przedstawiony kontakt składa się z:

- warstwy kontaktowej do krzemu lub materiału obudowy, wykonanej ze złota lub aluminium,
- wielowarstwowego kontaktu złożonego z naporowanych kolejno warstw: chromu, który zapewnia dobrą adhezję do krzemu; miedzi, która zapewnia małą rezystancję kontaktu; złota, które stanowi warstwę ochronną,
- warstwy lub kulki wykonanej z materiału lutowniczego.



Rys. 3.14. Przekrój kontaktu *flip chip* w wersji do lutowania [33]

Kontakty typu *flip chip* są wykonywane na strukturach czujników ciśnienia stosowanych w komputerach pokładowych samochodów. W tabeli 3.5 przedstawiono wady i zalety niektórych typów kontaktów elektrycznych.

Tabela 3.5. Wady i zalety niektórych typów kontaktów elektrycznych [70]

Właściwość	Kontakty cienko-warstwowe	Kontakty typu TAB	Wyprowadzenia belkowe	Kontakty <i>flip chip</i> (klejone, lutowane)
Dostępność technologii	bardzo dobra	dobra	dobra	dobra
Naprawialność	brak	brak	brak	średnia
Możliwość testowania	trudna	średnia	średnia	dobra
Odporność na media pomiarowe	zła	zła	zła	mała

3.2.2.2. Wykonanie połączeń elektrycznych pomiędzy strukturą a obudową

Połączenia elektryczne pomiędzy kontaktami wytworzonymi na strukturze i w obudowie można wykonać następującymi metodami:

- montaż drutowy (połączenie drutowe) – metoda stosowana głównie dla kontaktów wykonanych techniką cienkowarstwową,
- w technologii C4 (*controlled collapse chip connection*) – metoda stosowana głównie dla kontaktów typu *flip chip*,
- montażu automatyczny (*tape automated bonding*), głównie dla wyprowadzeń typu TAB na odpowiednio przygotowanej polimerowej taśmie montażowej.

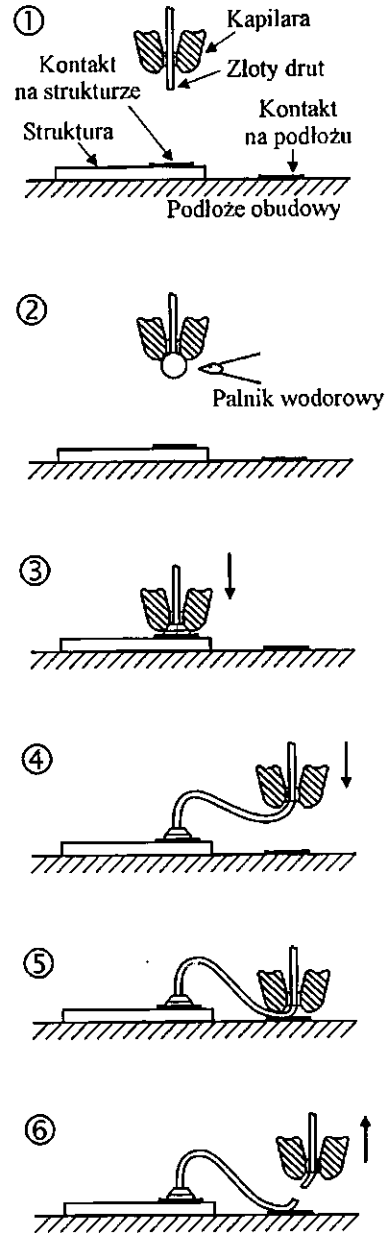
Połączenia elektryczne pomiędzy kontaktami powinny mieć następujące właściwości:

- mała rezystancja,
- duża wytrzymałość i trwałość połączenia,
- odporność na przeciążenia mechaniczne (wstrząsy, wibracje),
- stabilność termiczna,
- odporność na korodujące właściwości otoczenia i agresywne środowiska pomiarowe [77].

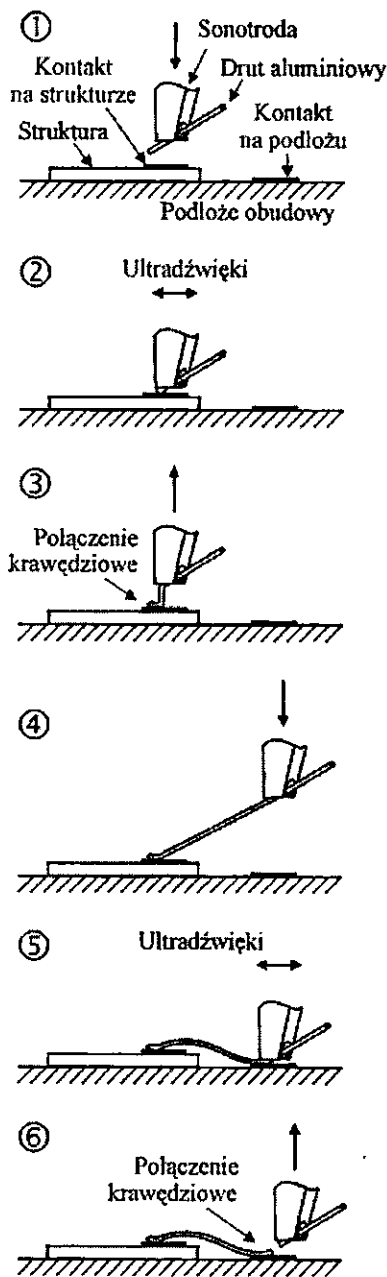
Montaż drutowy można wykonywać technikami:

- termokompresji – T/C (*thermocompression bonding*),
- ultrakompresji – U/S (*ultrasonic bonding, welding*),
- ultratermokompresji – T/S (*thermosonic bonding*).

Ultrakompresja polega na wykonywaniu połączenia pomiędzy kontaktami drutem w temperaturze zbliżonej do temperatury eutektycznej. Drut jest prowadzony w odpowiednim narzędziu (kapilara wykonana z węgla wolframu), które wytwarza siłę ściskającą w obszarze styku. Bezpośrednio w tym obszarze następuje plastyczne płynięcie metali i plastyczne zgniecenie ich. Jednocześnie w wyniku podwyższenia temperatury następuje dyfuzyjne wnikanie atomów łączonych metali. Powyższe czynniki powodują powstawanie mechanicznie wytrzymałego połączenia, najczęściej w kształcie kulki (*ball bond*). Złącze realizowane od strony obudowy przyjmuje kształt krawędziowy. Na rys. 3.15 przedstawiono schematycznie wyżej opisany proces.



Rys. 3.15. Sekwencja czynności procesu termokompresji [22]



Rys. 3.16. Sekwencja czynności procesu ultrakompresji

Podstawowym materiałem, z którego wykonuje się druty do termokompresji jest czyste złoto (99,99 %). Dla zwiększenia twardości niektórzy producenci dodają niewielkie domieszki miedzi lub berylu. Ze złota powinny być wykonane kontakty na strukturze i obudowie. W obszarze łączenia drutu złotego z kontaktami aluminiowymi (lub odwrotnie) mogą powstać związki między-metaliczne, niszczące kontakty (tzw. zaraza purpurowa – *purple plague*).

Istotą techniki ultrakompresji jest wykorzystanie drgań mechanicznych (ultradźwięków) do łączenia wyprowadzenia drutowego z odpowiednimi kontaktami. Drut jest prowadzony w odpowiedniej głowicy, która zapewnia docisk i przenosi falę ultradźwiękową. Głowica, zwana sonotrodą, powinna być tak skonstruowana, aby w obszarze wykonywanego połączenia moc fali ultradźwiękowej osiągnęła wartość maksymalną. Z powodu tarcia między łączonymi powierzchniami, energia doprowadzonych drgań ultradźwiękowych jest zamieniana na ciepło. Jednocześnie energia drgań ultradźwiękowych niszczy utleniające się warstwy poprzez ich kruszenie. Wskutek podwyższenia temperatury, połączenia pomiędzy cząsteczkami łączonych metali rozluźniają się, a tym samym zwiększa się ich migracja w obszarze złącza. Podwyższenie temperatury i nacisk sonotrody są przyczyną powstania odkształceń plastycznych łączonych metali, powodując powstanie trwałej zgrzeiny w kształcie spłaszczonej krawędzi (*wedge bond*). Na rys. 3.16 przedstawiono schematycznie proces ultrakompresji [22].

Podstawowym materiałem, z którego wykonuje się druty do połączeń techniką ultrakompresji jest aluminium, które może być łączone z kontaktami aluminiowymi lub złotymi wykonanymi na strukturze. W strukturach mikromechanicznych ultrakompresja jest podstawową metodą wykonywania połączeń. Należy jednak pamiętać, że struktury z kontaktami i połączeniami aluminiowymi muszą być izolowane od bezpośredniego oddziaływania środowiska pomiarowego, z wyjątkiem suchych, nieagresywnych gazów.

W tabelicy 3.6 przedstawiono podstawowe cechy wybranych metod wykonywania połączeń elektrycznych pomiędzy strukturami a obudową.

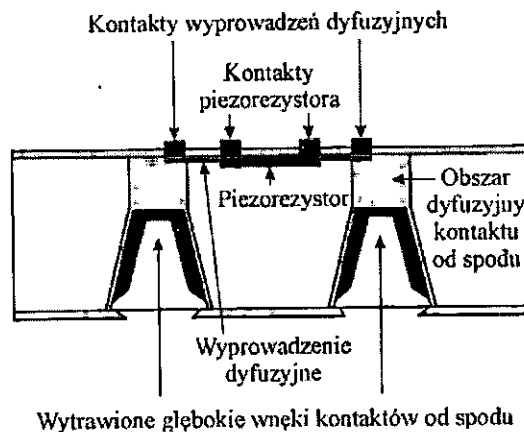
Tablica 3.6. Podstawowe cechy wybranych metod łączenia kontaktów elektrycznych wykonanych na strukturze z kontaktami w obudowie [12, 22]

Parametr	Montaż drutowy	Technologia C4 (wersja do lutowania)	Technologia C4 (wersja do klejenia)
Materiał złącza	drut Au, Al	lut PbSn, Au	żywice epoksydowe
Raster (mm)	170	250	100
Wytrzymałość złącza (cN)	10	30	50
Rozmieszczenie kontaktów	tylko na krawędziach struktury	dowolne	dowolne
Gęstość połączeń	średnia	wysoka	wysoka
Właściwości termiczne	dobrze	słabe	dostateczne
Odporność na media pomiarowe	brak	słaba	słaba

Opisane wyżej metody montażu dają w efekcie tzw. połączenia trwałe, tzn. że struktura czujnika praktycznie nie może być usunięta z obudowy i zastąpiona inną [25].

Kontakty od spodu (BSC)

Interesującym rozwiązaniem, pozwalającym na wprowadzenie technologii wielokrotnego montażu, dzięki czemu istnieje możliwość usunięcia zamontowanej już struktury bez niszczenia obudowy jest wprowadzenie do technologii struktur czujników tzw. kontaktów od spodu (BSC – *backside contact*) [65, 66, 67, 70]. Na rys. 3.17 przedstawiono schematycznie strukturę czujnika krzemowego z kontaktami umieszczonymi od spodu struktury, a na rys. 3.18 przekrój przez wnękę kontaktu BSC.



Rys. 3.17. Struktura czujnika krzemowego z kontaktami umieszczonymi od spodu struktury

Kontakt BSC składa się z następujących elementów konstrukcyjnych:

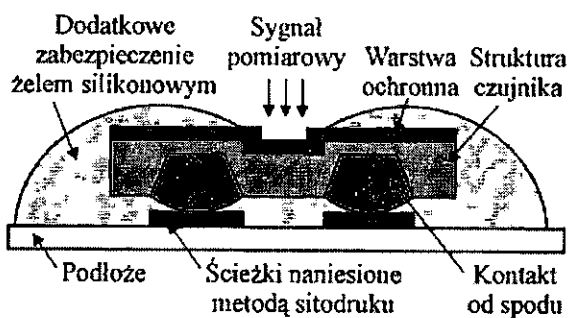
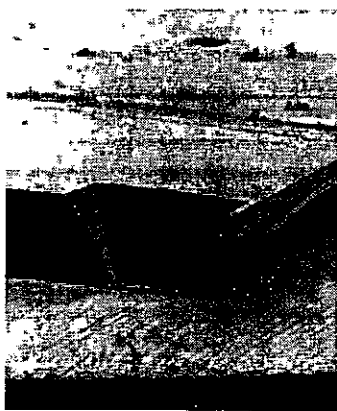
- silnie domieszkowanego półprzewodnika łączącego stronę górną płytki ze stroną dolną, stanowiącego obszar przewodzący kontaktu BSC,
- przestrzennej wnęki kontaktowej wytrawionej w krzemie, która tworzy od góry membranę kontaktową,
- obszaru dyfuzyjnego wykonanego w bocznej ścianie wnęki,
- metalizacji.

Struktura jest pokryta od góry i od dołu warstwami azotku krzemu. Azotek krzemu naniesiony na górną stronę płytki spełnia rolę ochrony przed środowiskiem pomiarowym, natomiast warstwa Si_3N_4 naniesiona na dolną stronę izoluje elektrycznie otwory kontaktowe. Zwory dyfuzyjne przenoszą sygnał elektryczny z układu rezystorów wykonanych od przedniej strony płytki do kontaktów BSC.

Metody montażu struktury z kontaktami od spodu można podzielić na dwa zasadnicze rodzaje:

- montaż stały, polegający na trwałym połączeniu mechanicznym i elektrycznym struktury z podłożem,
- montaż wielokrotny.

Na rys. 3.19 pokazano zasadę montażu stałego.



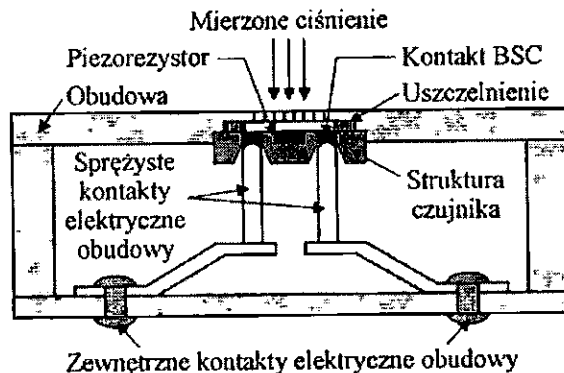
Rys. 3.19. Zasada montażu stałego struktur krzemowych z kontaktami BSC

Rys. 3.18. Przekrój przez jedną wnękę kontaktu BSC (zdjęcie wykonane przy użyciu mikroskopu elektronowego – wykonanie ITE)

Struktura czujnika jest zamontowana na podłożu ceramicznym, na które metodą sitodruku naniesiono kontakty i ścieżki przewodzące. Miejsce połączenia stanowi zarówno połączenie mechaniczne, jak i elektryczne. Kontakty wytworzone od spodu struktury czujnika zostały połączone z podłożem ceramicznym klejem przewodzącym. Od strony aktywnej fragment struktury jest odsłonięty, dzięki czemu medium pomiarowe może

bezpośrednio stykać się ze strukturą czujnika, nie degradując kontaktów elektrycznych. Pozostała powierzchnia struktury może być zasłonięta warstwą ochronną np. Si_3N_4 , odporną na oddziaływanie większości środowisk pomiarowych. Strukturę czujnika można dodatkowo zabezpieczyć np. żelazem silikonowym.

Technologia montażu wielokrotnego polega na połączeniu struktury czujnika z obudową jedynie poprzez docisk. Miejsce docisku stanowi jednocześnie połączenie mechaniczne i elektryczne pomiędzy kontaktami w obudowie i kontaktami BSC. Ideę tego montażu ilustruje rys. 3.20.



Rys. 3.20. Zasada montażu wielokrotnego

Pokazana obudowa do wielokrotnego montażu składa się z następujących części [70]:

- podstawy, w której znajdują się wyprowadzenia elektryczne obudowy;
- pokrywy górnej, w której jest wykonany otwór, przez który doprowadza się medium pomiarowe w postaci gazu lub cieczy,
- ścianek bocznych,
- elementów łączących obie części obudowy.

Obudowa do wielokrotnego montażu powinna umożliwiać co najmniej 100-krotny poprawny montaż i demontaż struktury czujnika przy użyciu nieskomplikowanych narzędzi. Ważnym elementem obudowy są wyprowadzenia elektryczne wykonywane z materiału sprężystego. Siła docisku wyprowadzeń powinna zapewnić niezawodność kontaktu elektrycznego i nie powodować uszkodzeń cienkiej membrany kontaktu BSC. Przyjmuje się, że rezystancja kontaktów i wyprowadzeń nie powinna być większa od $5 \text{ m}\Omega$. Rezystancja ta, w procesie montażu i demontażu powtórzonych minimum 100 razy, nie powinna zmieniać się więcej niż o 0,2 %. Pokazane na rys. 3.20 rozwiązanie konstrukcyjne charakteryzuje się następującymi zaletami:

- łatwością demontowania i ponownego montowania struktur,
- odpornością na oddziaływanie ciekłych i gazowych środowisk pomiarowych,
- kompatybilnością procesu technologicznego wykonywania kontaktów BSC z technologiami czujników mikromechanicznych i chemicznych.

3.2.3. Metody ochrony krzemowych struktur czujników przed wpływami otoczenia

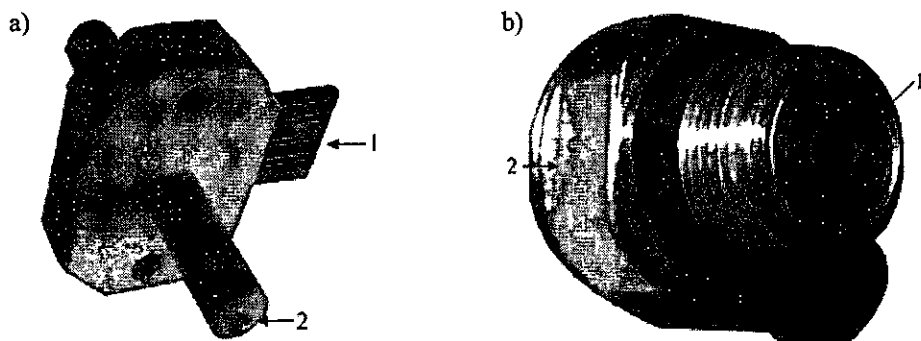
Krzemowe struktury czujników zwykle nie mogą stykać się z mediami pomiarowymi (z wyjątkiem suchych, nieagresywnych gazów). Dlatego, w celu ich ochrony, zachodzi konieczność stosowania odpowiednich warstw lub elementów mechanicznych. Metody ochrony struktur krzemowych przed wpływami otoczeniem można podzielić na [23, 24, 37, 67]:

- hermetyczne, zapewniające całkowite odizolowanie czujnika od szkodliwych wpływów zewnętrznych;
- półhermetyczne, przy których struktura czujnika jest częściowo odizolowana od środowiska, eliminując oddziaływanie części szkodliwych wpływów;
- częściowe, przy których część struktury jest chroniona, a część ma bezpośredni kontakt ze środowiskiem zewnętrznym.

Ochronę hermetyczną stosuje się dla czujników przeznaczonych do pracy w trudnych warunkach środowiskowych. Hermetyzację obudowy realizuje się poprzez:

- spawanie,
- zgrzewanie metal-metal lub szkło-metal,
- lutowanie (lutami twardymi, eutektyczne).

Przykładem obudowy hermetycznej stosowanej do montażu mikromechanicznych czujników ciśnienia jest obudowa z membraną separującą. Konstrukcja i grubość membrany separującej ma decydujący wpływ na poprawne przekazanie sygnału pomiarowego do struktury czujnika. Widok zewnętrzny głowicy czujnika ciśnienia z membraną separującą wykonaną ze stali nierdzewnej i przyspawaną metodą TIG do korpusu głowicy pokazano na rys. 3.21b. Struktura krzemowa jest zamontowana wewnątrz głowicy. Mierzone ciśnienie jest przekazywane przez olej silikonowy wypełniający przestrzeń pomiędzy strukturą a membraną [78].



Rys. 3.21. Przykłady obudów czujników ciśnienia: a) obudowa plastikowa (wykonano w ITE): 1 – wyprowadzenia elektryczne, 2 – doprowadzenie ciśnieniowe; b) obudowa z membraną separującą (wykonano w PIAP): 1 – stalowy korpus czujnika, 2 – stalowa membrana separująca

Wadą przedstawionych obudów jest ich wysoka cena, np. koszt obudowy z membraną separującą jest dziesięciokrotnie wyższy od ceny krzemowej struktury [32].

Ochronę półhermetyczną stosuje się w przypadkach, w których krytycznym parametrem jest cena czujnika. Przykładem obudowy półhermetycznej jest obudowa, w której podłoże jest wykonane z metalowego azuru zalanego sztucznym tworzywem. W obudowach z tworzywa sztucznego są montowane tanie czujniki używane np. jako wskaźniki ciśnienia w sprzęcie powszechnego użytku.

Problem ochrony krzemowych struktur czujników komplikuje się, gdy struktura musi mieć zapewniony bezpośredni kontakt ze środowiskiem pomiarowym. Taka sytuacja ma miejsce w przypadku czujników chemicznych i biomedycznych. Struktury tych czujników zabezpiecza się, pokrywając je częściowo warstwami lub substancjami ochronnymi. Wykorzystywane w tym celu substancje powinny się charakteryzować:

- małym wpływem temperatury utwardzania na współczynnik rozszerzalności temperaturowej,
- dopasowaniem współczynnika rozszerzalności temperaturowej do podłoża obudowy,
- dużą odpornością na działanie agresywnego środowiska,
- dobrymi właściwościami hydrofobowymi,
- dobrymi właściwościami plastycznymi.

Powyższe wymagania dobrze spełniają żywice epoksydowe, żele silikonowe i poliuretany [37, 50]. Żywice epoksydowe charakteryzują się małą kurczliwością po utwardzeniu, dobrą adhezją do większości materiałów, w tym do krzemu i ceramiki, dobrą stabilnością i odpornością na działanie wilgoci. Dodanie do żywicy cząstek krzemu lub ceramiki zwiększa jej stabilność temperaturową. Temperatura utwardzania żywic epoksydowych zawiera się w granicach 100...150 °C. Poliimidy wykazują dobrą stabilność chemiczną w podwyższonych temperaturach. Eksperymentalnie stwierdzono, że typowy element elektroniczny pokryty warstwą poliimidową po sześciu tygodniach starzenia w temperaturze 85 °C i wilgotności względnej 85 % nie wykazuje histerezy temperaturowej [84]. Materiały silikonowe charakteryzują się dobrą stabilnością temperaturową, dobrymi parametrami izolacyjnymi i niską temperaturą utwardzania. Bardzo atrakcyjnymi materiałami ochronnymi są silikonowe warstwy ochronne promieniami ultrafioletowymi: w temperaturze pokojowej, pozwalające na wykonywanie metodą fotolitografii dowolnego kształtu powłoki ochronnej. Silikonowe warstwy ochronne mogą pracować w sposób skuteczny, zabezpieczając strukturę czujnika do temperatury 250 °C i wytrzymywać krótkotrwałe narażenia temperaturowe nawet do 375 °C. Niestety, obszar ich zastosowań jest ograniczony przez niedostateczną adhezję do materiałów podłożowych i krzemu. Przeciwnie, materiały poliuretanowe wykazują dobrą adhezję do większości podłoży. W tablicy 3.7 podano najczęściej stosowane metody ochrony struktur oraz ich wady i zalety, a w tablicy 3.8 – podstawowe właściwości stosowanych w praktyce materiałów ochronnych.

Tablica 3.7. Metody ochrony struktur czujników przed działaniem mediów pomiarowych

Lp.	Metoda zabezpieczenia	Zalety
1.	Membrany separujące	<ul style="list-style-type: none"> • trwałe, • gwarancja kilkuletniego zabezpieczenia, • odporne na większość mediów (z wyjątkiem gorących kwasów)
2.	Membrany separujące o zwiększonej żywotności	<ul style="list-style-type: none"> • odporne na gorąco, • 10-letnia gwarancja wytrzymałości
3.	Pokrycia ochronne typu polimerowego	<ul style="list-style-type: none"> • tania technologia, • łatwo dostępne materiały technologiczne, • możliwość automatyzacji montażu
4.	Materiały ochronne utwardzane światłem	<ul style="list-style-type: none"> • możliwość precyzyjnego definiowania otwartego obszaru czujnika (fotolitografia), • możliwość automatyzacji montażu, • tania i precyzyjna technologia
5.	Pokrycie warstwą szkła	<ul style="list-style-type: none"> • odporne na działanie większości mediów, • wymagające technologii anodowego spajania, • możliwość automatyzacji procesu
6.	Kontakty od spodu BSC (<i>back-side-contact</i>)	<ul style="list-style-type: none"> • odporne na większość mediów, • odporne na narażenia mechaniczne i termiczne, • nie zanieczyszczają środowiska pomiarowego, • nie ulegają zanieczyszczeniu

Tablica 3.8. Właściwości materiałów ochronnych [50, 56]

Właściwość	Żywica epoksydowa	Żel silikonowy	Żywice uretanowe
Napężenia rozciągające (MPa)	142	7	7
Wydłużenie (%)	2	175	300
Skurcz podczas utwardzania (%)	0,3	0,4	2
Absorbacja wody (% na jedn. masy)	0,07	0,12	0,65
Przewodność cieplna ($\times 10^{-4}$ W/mK)	1,5	0,5	0,5
Stała dielektryczna	4,7	4,0	5,2
Rezystywność (Ω -cm)	10^{-15}	2×10^{-15}	2×10^{-12}

Wady	Drogi
<ul style="list-style-type: none"> ● brak odporności na narażenia mechaniczne, ● duże gabaryty obudów, ● droga technologia 	dla czujników niewymagających bezpośredniego kontaktu z medium (ciśnienie, różnica ciśnień, przyspieszenie)
<ul style="list-style-type: none"> ● bardzo droga technologia, ● mała powtarzalność procesów nanoszenia warstw ochronnych 	dla czujników pracujących w bardzo agresywnych środowiskach (chemia) lub w przemyśle spożywczym
<ul style="list-style-type: none"> ● pokrycia nietrwałe, ● możliwość zanieczyszczenia pokrycia lub środowiska pomiarowego 	dla czujników wymagających bezpośredniego kontaktu z medium
<ul style="list-style-type: none"> ● możliwość zanieczyszczenia środowiska pomiarowego przez pokrycie, ● brak odporności na zanieczyszczenia mechaniczne 	dla czujników chemicznych
<ul style="list-style-type: none"> ● brak odporności na narażenia mechaniczne, ● konieczność ingerencji w strukturę czujnika 	
<ul style="list-style-type: none"> ● konieczność ingerencji w strukturę czujnika, ● konieczność zwiększenia gabarytów struktury czujnika, ● ograniczenie liczby wyprowadzeń elektrycznych 	

3.2.4. Problemy niezawodności montażu struktur czujnikowych

Problemy niezawodności montażu struktur mikromechanicznych muszą być wzięte pod uwagę już na etapie projektowania obudowy i ustalania procesów technologicznych. Niezawodność jest definiowana jako prawdopodobieństwo poprawnego działania przyrządu w zadanym czasie t [38]. Funkcja niezawodności $R(t)$ określa prawdopodobieństwo, że po czasie t element będzie nadal poprawnie funkcjonował. Funkcją komplementarną względem $R(t)$ jest funkcja $F(t)$ określająca prawdopodobieństwo uszkodzenia elementu półprzewodnikowego po czasie t .

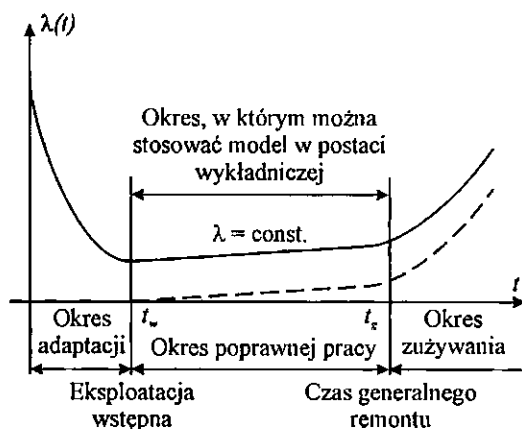
$$R(t) = e^{-\lambda t} \quad (3.9)$$

gdzie: λ jest parametrem intensywności uszkodzeń, podawanym zazwyczaj przez producentów wyrobów elektronicznych.

Uszkodzenia, którym mogą ulec elementy półprzewodnikowe można podzielić na:

- wczesne,
- powstające w trakcie eksploatacji,
- na skutek zużycia elementu spowodowanego starzeniem.

Oszacowanie funkcji niezawodności eksperymentalnie odbywa się na podstawie obserwacji odpowiednio licznej próbki badanego elementu w czasie t [22]. Uszkodzenia wczesne pojawiają się w pierwszym okresie eksploatacji i są najczęściej spowodowane błędami konstrukcyjnymi lub niewłaściwie przeprowadzonym procesem technologicznym. Typowym przykładem jest zły kontakt powstający w procesie montażu drutowego na skutek wykonania połączenia do niewłaściwie przygotowanej powierzchni kontaktu (zabrudzonej lub utlenionej). Może to spowodować uszkodzenie elementu po zaledwie kilku cyklach pracy. Po usunięciu elementów uszkodzonych na etapie produkcji, procent uszkodzeń znacznie maleje i utrzymuje się przez określony czas na stałym poziomie, aby następnie, po przekroczeniu przewidywanego dla danego elementu czasu życia, znów wzrosnąć, co tym razem jest spowodowane zużyciem materiałowym. Trzy okresy są najczęściej wyrażane tzw. krzywą wannową, a prawdopodobieństwo uszkodzenia elementu w czasie jest obrazowane rozkładem Weibulla [22].



Rys. 3.22. Krzywa szybkości uszkodzenia elementu w funkcji czasu [22]

Rozkłady prawdopodobieństwa wykorzystywane przy rozważaniach niezawodności montażu są szczegółowo omówione w [22, 36, 86]. W tabelicy 3.9 podano typowe uszkodzenia elektryczne pojawiające się w czujnikach i najczęściej występujące przyczyny uszkodzeń.

Niezawodność montażu połączeń elektrycznych wykonywanych metodami drutowymi mogą pogorszyć:

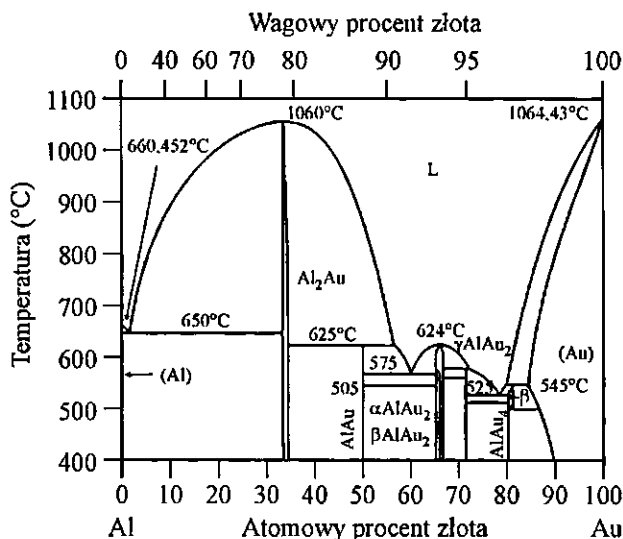
- niedopasowanie współczynnika rozszerzalności temperaturowej podłoża obudowy i krzemu, co może prowadzić do pęknięcia struktury czujnika,
- niewłaściwe przygotowanie powierzchni kontaktów przed operacją ultrakompresji lub termokompresji, co osłabia połączenie drutu z kontaktem na strukturze,
- powstawanie związków międzymetalicznych typu złoto-aluminium, powodujących całkowitą degradację kontaktu (tworzenie się związków międzymetalicznych Al-Au

Tablica 3.9

Mechanizm uszkodzenia	Rodzaj uszkodzenia elektrycznego	Przykład uszkodzenia
zerwanie połączenia drutowego	rozwarcie obwodu elektrycznego	zerwanie drutu na skutek złego przygotowania powierzchni kontaktu
degradacja kontaktów bezdrutowych	rozwarcie obwodu elektrycznego	w połączeniach <i>flip chip</i> zmiany właściwości kleju lub lutu (starzenie materiału)
korozja	rozwarcie obwodu elektrycznego	korodowanie ścieżek przewodzących w wielowarstwowych podłożach
pęknięcia spowodowane zmęczeniem materiałów	rozwarcie obwodu elektrycznego	pękanie obudów do powierzchniowego montażu na styku wyprowadzenie-tworzywo sztuczne obudowy
mechaniczne uszkodzenie elementu obudowy		uszkodzenie cienkiej membrany separującej
powstawanie przewodzących warstw po wpływie korozji	zwarcie układu elektrycznego	
powstawanie przewodzących dendrytów pod wpływem elektrolizy	zwarcie układu elektrycznego	
dyslokacja wyprowadzenia drutowego	zwarcie układu elektrycznego	zetknięcie się dwóch wyprowadzeń drutowych
przebicie warstwy dielektrycznej	zwarcie układu elektrycznego	przebicie warstw dielektrycznych w obudowach z wielowarstwowymi podłożami
zmiana właściwości izolacyjnych materiału ochronnego	zwarcie układu elektrycznego	wzrost przewodności warstwy ochronnej struktury pod wpływem warunków otoczenia
przegrzanie elementu	zwarcie układu elektrycznego	rozplątanie się lutu
migotanie kontaktu	wzrost szumów	zmniejszenie siły docisku
nierównomierny rozkład temperatury w obudowie	wzrost szumów	

w zależności od temperatury i udziału procentowego pierwiastków przedstawiono na rys. 3.23),

- obecność zanieczyszczeń, np. talu, które osłabiają połączenia drutowe [42].



Rys. 3.23. Układ równowagi Al-Au [50]

Niezawodność montażu połączeń elektrycznych wykonywanych w technologii *flip chip* mogą pogorszyć:

- niedopasowanie współczynników rozszerzalności temperaturowej krzemu oraz materiałów kontaktów kulkowych,
- słabe zwilżanie materiału podłoża przez lut znajdujący się na kontakcie,
- możliwość zbyt szerokiego „rozplięnięcia się” lutu, co może powodować zwarcia pomiędzy kontaktami,
- odporność lutu na korozję w przypadku pracy elementu przy podwyższonej wilgotności,
- degradujące działanie promieniowania radiacyjnego (cząstki α) [20, 39].

Zadowalającą odporność kontaktów na korozję osiąga się poprzez „zalanie” kontaktu na strukturze odporną chemicznie warstwą np. krzemu platyny.

Obudowy hermetyczne, metalowe i ceramiczne pozwalają na wieloletnią poprawną pracę zamontowanych w nich elementów. Np. dla czujników ciśnienia zamontowanych w hermetycznej głowicy z membraną separującą pokrytą teflonem, deklaruje się dziesięcioletnią gwarancję niezawodnej pracy w dowolnym środowisku. Nieliczne uszkodzenia, którym mogą ulec tego typu obudowy to przede wszystkim mechaniczne pęknięcia ich membran.

Struktury mikromechaniczne zamontowane w obudowach z tworzyw sztucznych najczęściej ulegają następującym uszkodzeniom [43]:

- pęknięcia wyprowadzeń elektrycznych,
- pęknięcia obudowy,
- pęknięcia struktury czujnika,
- zmiany właściwości elektrycznych spowodowane penetracją wody,
- degradacja struktury spowodowana penetracją chloru.

3.3. Przykłady zastosowań czujników ciśnienia

Motoryzacja

W samochodach czujniki są stosowane zarówno w silnikach (czujniki ciśnienia oleju, czujniki do pomiaru ciśnienia wtrysku paliwa itp.), jak i w systemach zapewniających bezpieczeństwo (czujniki montowane przy poduszkach powietrznych). Innym przykładem są czujniki montowane w systemach klimatyzacyjnych poprawiających komfort jazdy. Dla każdego z wymienionych wyżej czujników definiuje się ściśle zarówno parametry, jak i wymagania odporności na wpływy otoczenia czy kosztami wytwarzania.

Jednym z najwcześniejszych zastosowań było umieszczenie czujnika ciśnienia w systemie wtrysku paliwa i wykorzystanie jego sygnału do optymalizacji ilości wtryskiwanego paliwa zależnie od szybkości dopływu powietrza. Czujnik ciśnienia, wraz z czujnikiem temperatury, służy do obliczania gęstości powietrza. W tej aplikacji jest używany czujnik ciśnienia absolutnego (MAP – *Manifold Absolut Pressure*). Ponadto w bardziej zaawansowanych systemach uwzględnia się również wysokość nad poziomem morza, do czego wykorzystuje się dodatkowy czujnik – barometr (BAP) [34]. Pomiar ciśnienia jest również wykorzystywany do optymalizacji parametrów smarowania silnika olejem; w tym przypadku czujnik ciśnienia jest wykorzystywany do optymalizacji warunków pracy pompy olejowej.

W zastosowaniach motoryzacyjnych, w których czujniki są montowane poza kabiną kierowcy, ważna jest przede wszystkim ich niezawodna praca w bardzo trudnych warunkach środowiskowych. W związku z tym obudowa czujnika i technologia montażu muszą być tak dobrane, aby, nie zwiększając znacznie kosztów ich wytwarzania, ochroniły strukturę przed takimi czynnikami, jak: zmiany temperatury pracy w szerokim zakresie, zasolenie środowiska, z którym styka się czujnik, wstrząsy, wibracje, zmiany przyspieszenia. W tych zastosowaniach czujniki są montowane w pyło- i bryzgoszczelnych obudowach [34].

W systemach motoryzacyjnych bardzo atrakcyjna stała się bezprzewodowa technologia przesyłania sygnałów. Szczególnie interesujące jest opracowanie systemu bezprzewodowego przesłania sygnałów, który będzie stanowił integralną część czujnika pomiarowego. Szacuje się, że po opracowaniu technologii tanich czujników ciśnienia z bezprzewodowym przesyłaniem sygnału będą one produkowane w wielomilionowych seriach i wykorzystywane w systemach monitorowania ciśnienia i temperatury w opo-nach samochodów osobowych i ciężarowych [69, 97].

Medycyna

Jednym z trendów rozwojowych nowoczesnej aparatury medycznej jest jej coraz większa miniaturyzacja i uniwersalność zastosowań. Stało się to możliwe dzięki wprowadzeniu szeregu nowoczesnych, wysokiej jakości czujników [31, 81]. Wielkoseryjna produkcja takich czujników pozwoliła również na produkcję indywidualnych aparatów pomiarowych w warunkach domowych np. do pomiaru ciśnienia krwi lub poziomu glukozy.

W aparaturze medycznej stosowane czujniki ciśnienia powinny charakteryzować się [30, 31, 69, 99]:

- dużą czułością przy małych zakresach pomiarowych (± 1 kPa),
- doskonałą stabilnością długoterminową,
- małym wpływem środowiska pomiarowego na pracę czujnika (zmiany temperatury, wilgotność), ale również minimalnym zanieczyszczaniem środowiska (np. organizmu żywego) przez obudowę czujnika,
- powtarzalnością pomiarów,
- niewrażliwością na pozycję pracy,
- małymi wymiarami,
- niskim kosztem wytwarzania.

W zastosowaniach medycznych należy się liczyć również z nietypowymi wymaganiami takimi jak konieczność mycia czujników w odkażających substancjach lub odkażanie w autoklawach. Większość wymienionych wymagań doskonale spełniają czujniki krzemowe, pod warunkiem, że są zamontowane w odpowiednich obudowach i odpowiednio skompensowane [31]. Interesującą propozycję kompensacji parametrów czujników ciśnienia do zastosowań medycznych przedstawiono w [69]. W proponowanym rozwiązaniu wykorzystuje się dwie struktury czujników, wytworzone w jednym procesie technologicznym, zamontowane w jednej obudowie. Poprzez odpowiednie połączenie tych struktur uzyskuje się pojedynczy sygnał różnicowy, który dalej może być przetwarzany w typowy sposób, co pozwala na dalszą, typową obróbkę tego sygnału. Montaż kilku czujników krzemowych jest zasadny ekonomicznie z uwagi na niewielki koszt wytwarzania takich struktur.

Przykładami stosowania czujników ciśnienia w aparaturze medycznej są:

- domowe mierniki ciśnienia krwi (pomiar bezinwazyjny), wykorzystujące czujniki zamontowane w tanich plastikowych obudowach, bez warstw ochronnych,
- katetery do pomiarów ciśnienia krwi w trakcie zabiegów chirurgicznych (pomiaru inwazyjne), w których jednorazowe czujniki są montowane na plastikowych lub ceramicznych podłożach, a ochronę przed solą fizjologiczną stanowi warstwa elastycznego żelu (na ogół silikonu),
- aparatura do monitorowania stanu pacjenta używana w szpitalach i karetkach pogotowia, w której czujniki ciśnienia są stosowane do pomiaru ciśnienia krwi i monitorowania oddechu,
- systemy pomiarowe do pomiaru i regulacji przepływu powietrza przy łóżkach osób z ciężkimi poparzeniami; w tym wypadku stosuje się czujniki o bardzo niskich za-

- kresach pomiarowych ciśnienia (poniżej 1 kPa), o dużej czułości i niezawodności; zadaniem systemu jest włączenie alarmu w przypadku wykrycia braku ruchu powietrza przez określony czas,
- inteligentne inhalatory i respiratory wykrywające i informujące o poziomie tzw. krótkiego oddechu, optymalizujące dawkę leku i uwalniające lek we właściwym czasie,
 - stacje dializ (do tej aplikacji czujniki muszą być montowane w obudowach z membranami separującymi),
 - pompy infuzyjne i systemy dozujące leki.

Systemy pomiarowe typu HVAC

Skrót HVAC (*heating, ventilation, air condition*) oznacza systemy pomiarowe stosowane w urządzeniach grzewczych, wentylacyjnych i w klimatyzacji. Spotyka się również skrót HVARC/R, w którym dodano zastosowania chłodnicze (*refrigeration*). Nowoczesne systemy sterowania wymienionymi urządzeniami stosowanymi w budynkach mieszkalnych lub biurowych, transporcie i przechowalnictwie wymagają stosowania nowych, wielofunkcyjnych przyrządów pomiarowych wyposażonych w czujniki wykonane w najnowszych technologiach. Do niedawna wykorzystywano głównie czujniki temperatury i wilgotności do monitorowania stanu temperatury w pomieszczeniach klimatyzowanych lub stopnia przegrzania w trakcie transportu produktów łatwo się psujących. Wprowadzane w wielu krajach normy i wymagania, wymuszają stosowanie bardziej zaawansowanych systemów, których funkcje są rozszerzone nie tylko na monitorowanie, ale również na sterowanie pracą urządzeń grzewczych i chłodniczych. Ponadto zwraca się uwagę na minimalizację poboru energii, a także przewidywania i wykrywania awarii systemów energetycznych oraz możliwości ich zdalnych napraw.

Typowe przykłady zastosowań czujników ciśnienia w omawianych systemach:

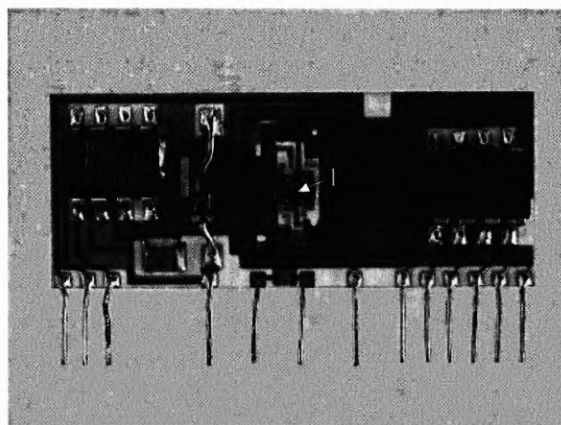
- w systemach transportu żywności i leków, którym obecne normy narzuciły bieżące monitorowanie i rejestrację stanu klimatyzacji; inteligentne - w tym zastosowaniu zintegrowane czujniki ciśnienia i temperatury wyposażone w lokalną pamięć, mogą zapamiętywać dostateczną liczbę danych niezbędnych do rejestracji nawet przy długotrwałym transporcie i umożliwiają w każdym momencie odczyt stanu klimatu i zdalnego wpływanie na warunki transportowe,
- w sterowaniu i monitorowaniu stanu pracy sprężarek, w systemach klimatyzacyjnych - dzięki zastosowaniu czujników ciśnienia w inteligentnych zaworach można zaoszczędzić do 20 % mocy zużywanej przez urządzenia klimatyzacyjne,
- w budynkach mieszkalnych lub biurowych, do wczesnego wykrywania lub przewidywania uszkodzeń w systemach klimatyzacyjnych.

Ponadto czujniki ciśnienia są wykorzystywane do pomiaru przepływu powietrza w kominach, w sterowaniu pracą dmuchaw, monitorowaniu stanu przewietrzania, określaniu stanu (czystości) filtrów.

Sprzęt gospodarstwa domowego

Czujniki ciśnienia są stosowane w różnorodnych urządzeniach powszechnego użytku, m.in. w pralkach, zmywarkach, nawilżaczach, odkurzacach. Głównym zadaniem czujników jest poprawa funkcjonalności, zwiększenie bezpieczeństwa użytkowania sprzętu, minimalizacja poboru energii oraz podwyższanie tzw. przyjaznego użytkownika.

W odkurzacach czujniki ciśnienia służą do regulacji obrotów silnika zależnie od charakteru odkurzonej powierzchni, do monitorowania zanieczyszczenia filtrów oraz wypełnienia worka. Równie istotnym jest pomiar przepływu powietrza i sygnalizacja w przypadku znacznego jego zmniejszenia. Powodem zwiększenia oporu dla przepływu w rurze odkurzacza może być zassanie zbyt dużego elementu, co może doprowadzić nawet do uszkodzenia silnika. Na rys. 3.24 przedstawiono hybrydowy układ do sterowania silnikiem odkurzacza wykorzystujący krzemowy czujnik podciśnienia.



Rys. 3.24. Przykład układu hybrydowego do regulacji siły ciągu odkurzacza (opracowano i produkowano w firmie Micronix do odkurzaczy firmy Zelmer)

Czujniki ciśnienia stosowane w pralkach są umieszczone zwykle w obwodach monitorowania i regulacji poziomu napełnienia bębna wodą, dzięki czemu można minimalizować zużycie wody zależnie od rodzaju pranych tkanin i wypełnienia bębna. Podobnie w lodówkach, czujniki ciśnienia są stosowane do sygnalizacji niedomknięcia drzwi lub kontroli pracy sprężarek, w których zbyt niskie ciśnienie może świadczyć o niewłaściwej pracy sprężarki. Dzięki temu można przewidzieć możliwość wystąpienia awarii i reagować przed całkowitym zepsuciem się sprzętu. Jest to szczególnie istotne dla urządzeń służących do przechowywania dużych ilości żywności [69].

Stosunkowo nowym obszarem zastosowań czujników ciśnienia jest sprzęt sportowy. Czujniki są wykorzystywane w zegarkach dla nurków, w których pokazują głębokość zanurzenia, w zegarkach dla wspinaczy górskich – do pomiaru wysokości, a także w pro-

dukcji nowoczesnego obuwia do sportów wyczynowych (np. do uprawiania narciarstwa) oraz do monitorowania stopnia nacisku na podeszwę [137].

Czujniki ciśnienia znalazły również zastosowanie w bardzo nietypowych dziedzinach, do których należą m.in. instrumenty muzyczne, a w szczególności instrumenty dęte, w których mierzą i optymalizują ciśnienie wydechu.

3.4. Podstawowe kryteria wyboru czujników do różnych zastosowań

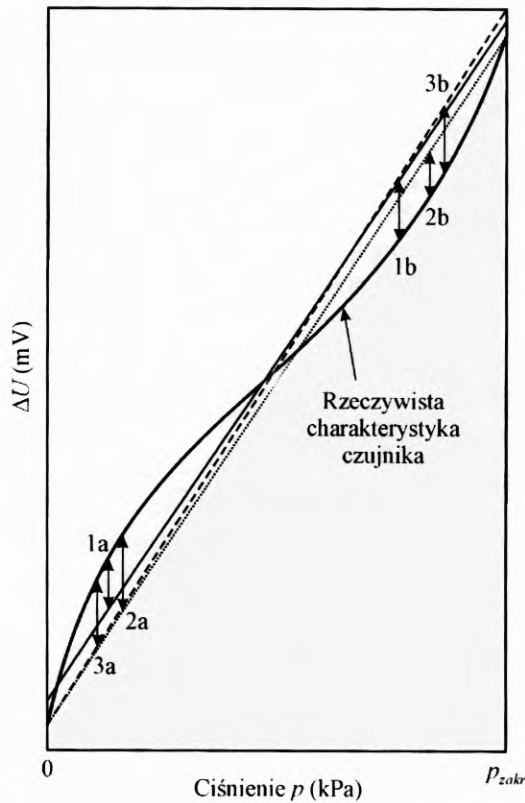
Nie ulega wątpliwości, że poprawny wybór typu czujnika ma istotny wpływ na jakość pracy i koszty wytwarzania całego urządzenia, w którym ma być zastosowany. Jest to szczególnie ważne dla producentów sprzętu pomiarowego wytwarzanego w małych i średnich seriach. Producenci wytwarzający nietypowe urządzenia w małych lub średnich seriach, zostali wyróżnieni w literaturze osobnym terminem OEM (*original equipment manufactures*). Na ich potrzeby są produkowane wersje wykonania czujników m.in. ciśnienia, według podanych przez nich wymagań.

Do podstawowych kryteriów, które należy brać pod uwagę przy wyborze czujników należą:

- parametry metrologiczne: zakres pomiarowy, dokładność pomiaru, czułość, błędy temperaturowe, nieliniowość, stabilność,
- wymiary czujnika,
- właściwości środowiska, w którym czujnik jest stosowany (suchy gaz, ciecze, media agresywne, media zanieczyszczone cząstkami stałymi itp.),
- wymagania związane z montażem czujników,
- cena czujnika,
- konieczność posiadania odpowiednich certyfikatów przez wyrób (dopuszczenie do pracy w atmosferze wybuchowej, pod wodą itp.),
- akceptowana wielkość serii do jednorazowego zakupu.

Wielu producentów czujników i przetworników ciśnienia nie podaje pełnej oferty, dlatego trzeba bardzo starannie wybrać firmy i sprawdzić ich wiarygodność, ponadto należy dokładnie przeanalizować podane w ofertach parametry czujników i ich definicje stosowane przez różnych producentów. Pomimo to, że obowiązuje w Europie jeden słownik terminów związanych z metrologią i parametrami czujników [46, 48], często w prospektach można spotkać inne znaczenie lub zdefiniowanie tych samych terminów. Dla przykładu można podać dane związane z nieliniowością czujników. Na rys. 3.25 przedstawiono trzy rodzaje określania nieliniowości: nieliniowość odniesioną do krańców charakterystyki, nieliniowość odniesioną do początku charakterystyki i nieliniowość niezależną.

Innym przykładem jest wartość, do której są odnoszone błędy czujnika czy przetwornika (np. górna granica zakresu pomiarowego czy wartość odczytu) lub zakres temperatur kompensacji błędów temperaturowych (np. błąd na 10 °C czy na 1 °C). Zdarza się, że w kartach katalogowych parametry te nie są podane jednoznacznie.



Rys. 3.25. Trzy sposoby obliczania nieliniowości: 1 – nieliniowość niezależna, przy której odchylenia charakterystyki od wybranej prostej są zminimalizowane (dodatnie lub ujemne); 2 – nieliniowość odniesiona do krańców charakterystyki, przy której wybrana prosta pokrywa się z charakterystyką rzeczywistą w dolnej i górnej granicy zakresu pomiarowego (2a – maksymalne odchylenie dodatnie; 2b – maksymalne odchylenie ujemne); 3 – nieliniowość odniesiona do początku charakterystyki, przy której wybrana prosta pokrywa się z najniższą wartością zakresu charakterystyki rzeczywistej i jest tak usytuowana, aby minimalizowała odchylenie maksymalne (3a – maksymalne odchylenie dodatnie; 3b – maksymalne odchylenie ujemne).

Podsumowując, można stwierdzić, że problem wyboru odpowiednich czujników dla danej aplikacji, szczególnie w przypadku zakupu większych serii, wymaga rozważenia szeregu problemów, nie tylko technicznych jak rodzaj czujnika, pomiaru dokładności, odporności na środowisko pomiarowe, ale również właściwego uszeregowania kryteriów wyboru, a także oszacowanie realnie poniesionych kosztów do ceny oferowanej przez producentów czujników.

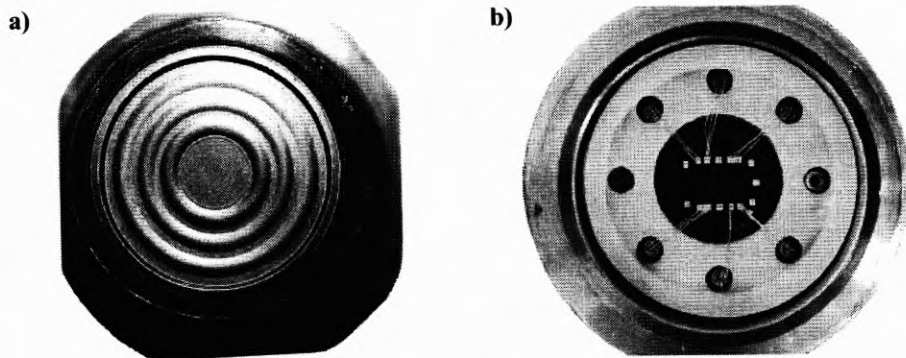
4. PRZETWORNIKI CIŚNIENIA, RÓŻNICY CIŚNIEŃ I POZIOMU DO ZASTOSOWAŃ PRZEMYSŁOWYCH

Zgodnie z konwencją przyjętą na rys. 2.3, przetwornik jest blokiem funkcjonalnym złożonym z czujnika pomiarowego i układów przetwarzania informacji. Przetworniki cyfrowe mogą być dodatkowo wyposażone w układy przesyłania i wizualizacji (interfejsy, wskaźniki).

4.1. Konstrukcje głowic przetworników

4.1.1. Głowice przetworników ciśnienia

Pod pojęciem głowicy przetwornika rozumie się czujnik zamontowany w odpowiedniej obudowie. Przykład takiej głowicy zawierającej krzemowy czujnik ciśnienia przedstawiono na rys. 4.1. Oryginalnym elementem tej głowicy jest membrana separująca, mająca za cel ochronę czujnika przed szkodliwym działaniem środowiska pomiarowego. W omawianej głowicy membrana ta jest wykonana ze stali kwasoodpornej, która, niestety, nie jest odporna na oddziaływanie substancji zawierających chlor lub jego związki (salmiak, sól kuchenna, woda morska). Ponadto niszczący wpływ na membrany wykonane ze stali kwasoodpornej mają fluor, ropa naftowa, a także niektóre związki wodorowe (np. nadtlenek wodoru). Stal kwasoodporna należy do najczęściej stosowanych materiałów, z których wykonuje się membrany, jednak z uwagi na brak odporności na oddziaływanie wielu substancji, w praktyce stosuje się również inne materiały. Wybrane z nich przedstawiono w tabeli 4.1 wraz z podaniem substancji, na które są one odporne.



Rys. 4.1. Głowica przetwornika ciśnienia: a) głowica po przyspawaniu membrany separującej, b) wnętrze głowicy z krzemowym czujnikiem piezorezystancyjnym

Innym problemem jest zapewnienie odporności membran na działanie środowiska pomiarowego (substancji) zawierającego cząstki stałe wykazujące właściwości ściernicze. Większość membran jest wykonana z folii metalowych o grubości rzędu kilkudziesięciu mikrometrów, co jest powodem krótkiego czasu ich pracy w środowiskach zawierających

Tablica 4.1. Odporność wybranych materiałów membrany na niektóre środowiska korozyjne (+ oznacza, że materiał jest odporny na działanie danego medium)

Lp.	Nazwa medium /Wzór	Stal nierdzewna 316 SS	Hasteloy C276	Monel	Tantal	Tytan
1	Amoniak bezwodny	+	-	-	-	-
2	Azotan amonowy (saletra amonowa)	+	-	-	+	+
3	Azotan potasowy (saletra potasowa)	-	-	-	+	+
4	Azotan potasowy	-	-	-	+	+
	Azotan srebrowy	-	-	-	+	-
5	Bezwodnik kwasu octowego	-	-	-	+	+
6	Chlor	-	-	-	+	-
7	Chlorek amonowy (salmiak) NH_4Cl	-	-	+	+	+
8	Chlorek sodowy NaCl	-	-	+	+	+
9	Chlorek wapniowy $CaCl_2$	-	-	+	+	+
10	Chlorek żelazowy $FeCl_2$	-	-	-	+	+
11	Trójtlenek siarki	-	+	-	-	-
12	Fluor	-	-	+	-	-
13	Hydrazyna	-	-	-	-	-
14	Kwas borowodorowy	-	-	-	+	-
15	Kwas fluorokrzemowy H_2SiF_6	-	-	-	-	-
16	Kwas mrówkowy	-	-	-	+	-
17	Kwas siarkowy <60 % H_2SO_4	-	-	-	+	-
18	Kwas solny	-	-	-	+	-
19	Kwas trójchlorooctowy	-	+	-	-	-
20	Mocznik	+	-	-	-	-
21	Octan etylu	+	-	-	-	-
22	Piwo	+	-	-	-	-
23	Ropa naftowa	-	+	-	+	-
24	Podtlenek azotu N_2O (gaz rozweselający)	-	-	-	+	-
25	Siarkowodór H_2S	-	-	-	+	+
26	Woda chlorowana	-	-	-	+	+
27	Woda morską	-	-	-	+	+

cząstki ściernie. Dla tych zastosowań należy stosować membrany z innych materiałów, np. z ceramiki, co jednak wiąże się z komplikacjami konstrukcyjnymi i technologicznymi, które mają istotny wpływ na koszty wytwarzania przetworników.

W celu zapewnienia poprawnej pracy głowicy, jej wnętrze wypełnia się odpowiednią, małościśliwą cieczą, która przekazuje ciśnienie z zewnętrznej membrany na krzemową membranę czujnika ciśnienia umieszczaną wewnątrz głowicy. Do wypełniania głowic najczęściej używa się oleju silikonowego, jednak w niektórych zastosowaniach zamiast oleju stosuje się inne płyny, np. ciecze chemicznie bierno o nazwie inert (dawniej fluorolube) dla wykonań przeznaczonych do pracy z tlenem.

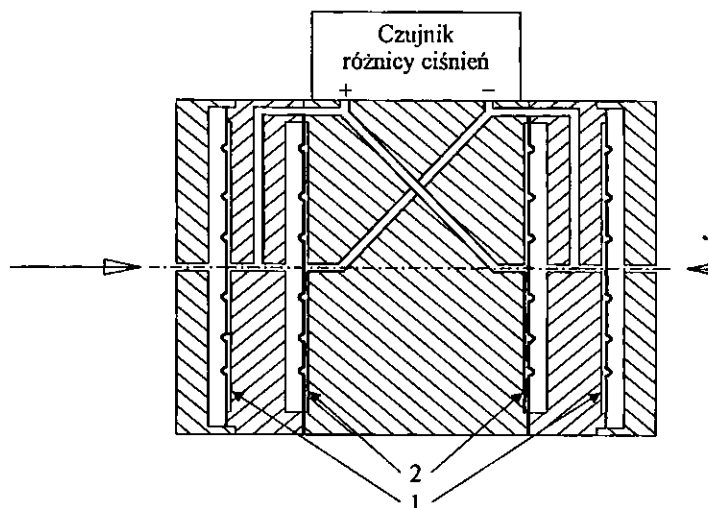
4.1.2. Głowice przetworników różnicy ciśnień

Jednym z typowych zastosowań krzemowych czujników ciśnienia są przetworniki różnicy ciśnień przeznaczone do pomiarów różnicy ciśnień, poziomu cieczy w zbiornikach otwartych lub zamkniętych oraz pomiaru przepływu cieczy. Gdy pomiar przepływu, szczególnie w rurociągach, jest wykonywany przy użyciu kryzy pomiarowej, występuje problem ochrony przetwornika przed uszkodzeniem na skutek działania ciśnienia statycznego powstałego w obszarze pomiaru. Ciśnienie to jest m.in. zależne od parametrów układu zasilającego i konfiguracji instalacji oraz właściwości fizycznych płynu przepływającego przez rurociąg. Niszczące działanie ciśnienia statycznego może pojawić się w wypadku uszkodzenia rurociągu lub niewłaściwego procesu montażu przetwornika na obiekcie. Zazwyczaj wartość ciśnienia statycznego, które może oddziaływać na jedną stronę przetwornika, wielokrotnie przekracza wartości dopuszczalnych ciśnień różnicowych, które nie są niszczące dla przetwornika. Dlatego też przetworniki różnicy ciśnień do zastosowań przemysłowych muszą być wyposażone w mechanizmy zabezpieczające. Mechanizm zabezpieczający, zwany również mechanizmem przeciążeniowym, umieszcza się zazwyczaj wewnątrz głowicy przetwornika różnicy ciśnień. Naturalnie, mechanizm ten nie powinien w żaden sposób zaburzać pomiarów w zdeterminowanym zakresie pomiarowym przetwornika. Mechanizm zabezpieczający czujnik przed jednostronnym przeciążeniem musi zapewnić:

- bezawaryjne zadziałanie w obszarze przewidzianego przeciążenia, przy czym jego górna wartość nie może być przekroczona,
- samoczynne włączenie przyrządu do pracy po zaniku przeciążenia statycznego i kontynuację jego działania w pełnym zakresie roboczym,
- powtarzalność zadziałania i trwałość,
- małą pojemność roboczą w układzie transmisyjnym sygnału ciśnieniowego.

Jak wspomniano wcześniej, podstawową cechą mechanizmu przeciążeniowego jest to, że jego charakterystyka nie wpływa na działanie czujnika w zakresie pomiarowym. Po przekroczeniu górnej granicy zakresu pomiarowego mechanizm powinien zadziałać, najlepiej w sposób skokowy. Następnie, po ustąpieniu przeciążenia mechanizm powinien powrócić do stanu początkowego bez wykazywania histerezy.

Unikalne rozwiązanie głowicy przetwornika różnicy ciśnień z mechanizmem przeciążeniowym, opracowane w Przemysłowym Instytucie Automatyki i Pomiarów PIAP,

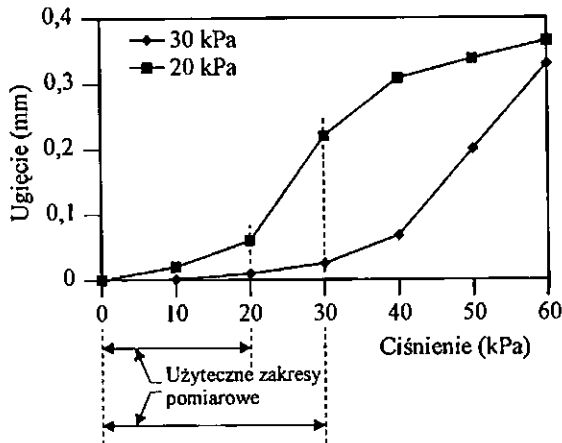


Rys. 4.2. Głowica przetwornika różnicy ciśnień z mechanizmem przeciążeniowym (opracowano w PIAP)

przedstawiono na rys. 4.2. W przedstawionym rozwiązaniu zastosowano dwa rodzaje membran: membrany separujące (1) oraz membrany (2) stanowiące element mechanizmu przeciążeniowego. Membrany separujące oddzielają środowisko pomiarowe od wewnętrznej przestrzeni głowicy. Przestrzeń wewnętrzną tworzą dwie oddzielne komory wypełnione całkowicie olejem silikonowym. Sztywność membran mechanizmu przeciążeniowego jest tak dobrana, aby nie odkształcały się one pod działaniem ciśnienia w zakresie pomiarowym. W przypadku pojawienia się ciśnienia przekraczającego bezpieczną wartość, membrany te powinny zacząć się ugiąć, odcinając wpływ ciśnienia zewnętrznego na czujnik. Pojemność komór przeciążeniowych jest większa od komór membran separujących, co pozwala na przemieszczenie się oleju do większej przestrzeni i oparcie membrany separującej na dnie komory. W tym przypadku zostaje zamknięty wlot do dodatniej przestrzeni wewnętrznej i zanika hydrostatyczny przekaz ciśnienia. Dalszy wzrost ciśnienia po stronie dodatniej nie powoduje przyrostu ciśnienia oddziałującego na czujnik. Po spadku ciśnienia zewnętrznego do wartości bezpiecznej dla przetwornika, następuje powrót elementów wewnętrznych do położenia roboczego. Układ jest symetryczny i działa identycznie od strony ujemnego (niższego) ciśnienia. Wzorcową charakterystykę omawianego mechanizmu przedstawia rys. 4.3.

Przy konstruowaniu przetworników różnicy ciśnień – szczególnie z krzemowymi czujnikami, w których membrany są wykonane w technologii mikromechaniki krzemowej – należy pamiętać o wpływie ciśnienia statycznego na sygnał wyjściowy z czujnika. Wpływ ten można skompensować poprzez dodanie do głowicy przetwornika czujnika ciśnienia absolutnego. Sygnał pomiarowy z tego czujnika jest następnie wykorzystywany jako sygnał odniesienia w obwodzie kompensującym wpływ ciśnienia statycznego.

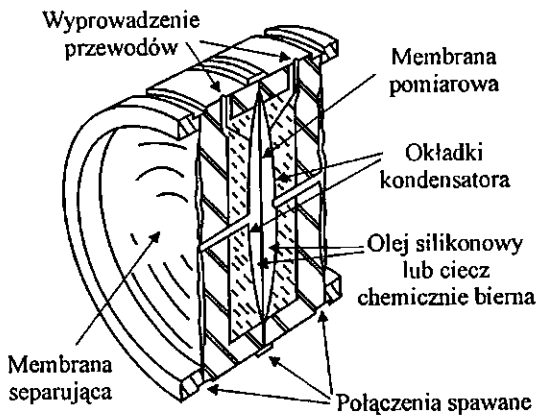
Alternatywnym rozwiązaniem dla omawianej konstrukcji są czujniki, w których mechanizm przeciążeniowy jest zintegrowany z krzemową membraną czujnika (*bossed*)



Rys. 4.3. Charakterystyka mechanizmu przeciążeniowego

[30]. Opis tego rozwiązania technologicznego jest jednym z niewielu, jakie można znaleźć w ogólnie dostępnej literaturze. Na ogół, ze względów komercyjnych informacje na temat metod zabezpieczenia czujników przed przeciążeniami są rzadko publikowane i często stanowią pilnie strzeżone tajemnice firm wytwarzających tego typu przetworniki [78].

Innym rozwiązaniem konstrukcyjnym głowic przetworników różnicy ciśnień są głowice przetworników pojemnościowych. W tym wypadku czujnik i głowica stanowią zintegrowaną całość (rys. 4.4) [121].



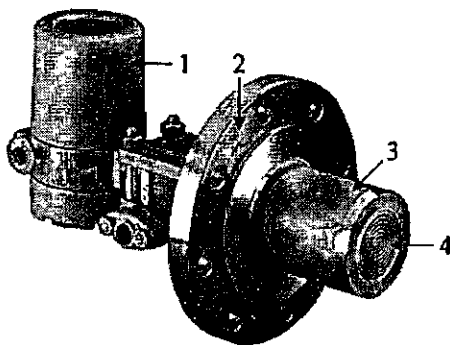
Rys. 4.4. Typowa konstrukcja głowicy przetwornika pojemnościowego

W rozwiązaniu przedstawionym na rys. 4.4 funkcję czujnika ciśnienia spełnia różnicowy kondensator pomiarowy, którego elektrodę pomiarową stanowi sprężysta membrana. Mierzone ciśnienia są przenoszone z membran separujących na membranę pomiarową za pomocą cieczy wypełniającej komory kondensatora pomiarowego. Przesunięcie

sprężystej membrany pomiarowej jest proporcjonalne do podanej na nią różnicy ciśnień. Powstała w wyniku przemieszczenia membrany pomiarowej różnica pojemności między obu częściami kondensatora jest przetwarzana w układzie elektronicznym na użyteczny sygnał wyjściowy (4...20 mA lub cyfrowy, zależnie od układu). W przetworniku pojemnościowym mechanizm przeciążeniowy nie występuje jako oddzielny element konstrukcyjny. Funkcję zabezpieczającą pełni membrana pomiarowa, która po przekroczeniu ciśnienia o ok. 50 % górnej granicy zakresu pomiarowego ciśnienia przylega całą powierzchnią do wyprofilowanego łoża głowicy znajdującego się pod membraną. W ten sposób maksymalne, możliwe przemieszczenie membrany pomiarowej pozostaje zawsze w granicy jej odkształceń sprężystych.

4.1.3. Głowice przetworników poziomu

Przetworniki poziomu lub różnicy ciśnień stosowane do pomiaru poziomu cieczy mierzą ciśnienie hydrostatyczne słupa cieczy. Ciśnienie to jest równe wysokości słupa cieczy nad punktami pomiarowymi pomnożonej przez gęstość tej cieczy. Przetwornik różnicy ciśnień do pomiaru poziomu cieczy w zbiornikach zamkniętych lub otwartych musi być wyposażony od strony komory wyższego ciśnienia (+) w odpowiednie przyłącze ciśnieniowe. Przykład takiego rozwiązania przedstawia rys. 4.5.

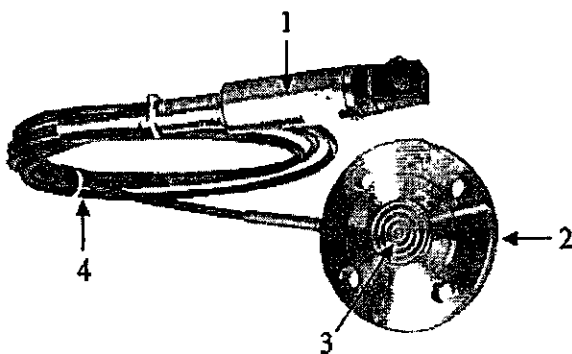
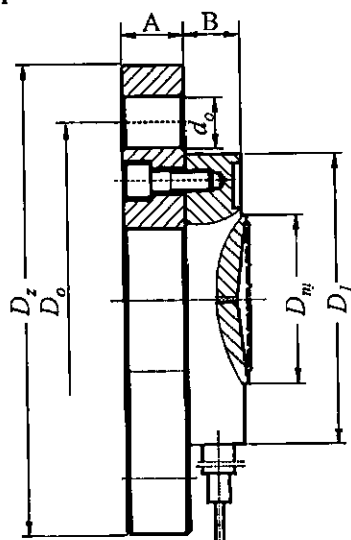


Rys. 4.5. Głowica przetwornika poziomu: 1 – obudowa układu elektronicznego, 2 – kołnierz głowicy przetwornika, 3 – tubus, 4 – membrana separująca

W przypadku pomiaru poziomu cieczy w zbiornikach otwartych, strona niższego ciśnienia (-) głowicy przetwornika jest połączona z atmosferą. Do pomiaru poziomu w zbiornikach zamkniętych od strony niższego ciśnienia głowicy pomiarowej przyłączona jest kolumna odniesienia z gazem (suchym) lub cieczą. Hydrostatyczne przetworniki poziomu wymagają lokalizacji od spodu lub w dolnej części zbiornika. Do pomiaru poziomu cieczy w zbiornikach są również stosowane czujniki ultradźwiękowe, przymocowane od strony górnej zbiornika. Czujniki ultradźwiękowe są coraz chętniej używane w tego typu pomiarach, z uwagi na łatwość montażu i obsługi w trakcie eksploatacji.

4.1.4. Układy pośredniczące pomiędzy przetwornikami a środowiskiem pomiarowym

Gdy właściwości środowiska pomiarowego mogą wpływać niszcząco na przetwornik, celowe jest użycie układu pośredniczącego pomiędzy przetwornikiem a środowiskiem pomiarowym. Układ ten jest zwany oddzielaczem (separator). W literaturze można znaleźć wiele przykładów różnorodnych konstrukcji oddzielaczy, szczególnie uwzględniających różne rodzaje przyłączy do instalacji przemysłowych. Zarys przykładowej konstrukcji oddzielacza pokazano na rys. 4.6. Oddzielacz składa się z korpusu, do którego jest przyspawana membrana separująca. Kryteria wyboru materiału, z którego wykonuje się membrany oddzielaczy zależą od rodzaju środowiska pomiarowego i są podobne, jak przy wyborze membran przetworników. Należy również pamiętać, że pozostałe elementy oddzielacza, m.in. przyłgi (część kołnierzowa) powinny być wykonane z materiałów o wysokiej odporności korozyjnej. Dzięki temu będą one mogły stykać się z agresywnymi środowiskami pomiarowymi, powodującymi korozję, a także z substancjami o dużej lepkości, niejednorodnymi, sypkimi lub toksycznymi. Oddzielacz jest połączony z przetwornikiem cienką kapilarą, której długość na ogół nie przekracza 15 metrów. Pojemność pomiędzy przetwornikiem a oddzielaczem jest wypełniona cieczą, której rodzaj zależy najczęściej od rodzaju środowiska pomiarowego i jego temperatury. Przykład oddzielacza połączony z przetwornikiem cienką kapilarą jest przedstawiony na rys. 4.7. Rozszerzenie możliwości stosowania przetwornika z oddzielaczami jest dość duże. Na przykład, przetwornik przystosowany do pracy w temperaturze nieprzekraczającej 100 °C, po wyposażeniu w odpowiedni oddzielacz, może być wykorzystywany do pomiaru ciśnienia w środowiskach pomiarowych o temperaturze do 400 °C.



Rys. 4.7. Miniaturowy przetwornik ciśnienia z oddzielaczem (opracowany w PIAP): 1 - miniaturowy przetwornik ciśnienia, 2 - kołnierz oddzielacza, 3 - membrana separująca, 4 - kapilara

Rys. 4.6. Schemat typowego oddzielacza: D_z - średnica zewnętrzna kołnierza przyłączeniowego, D_o - średnica otworów mocujących, D_m - średnica membrany separującej, D_1 - średnica przyłgi, d_o - średnica otworu pod śrubę mocującą

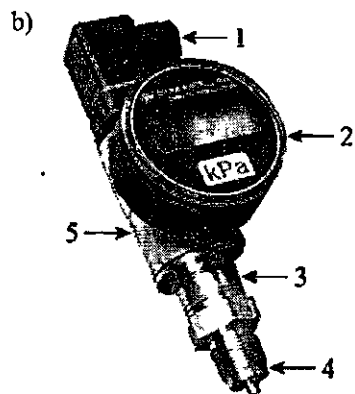
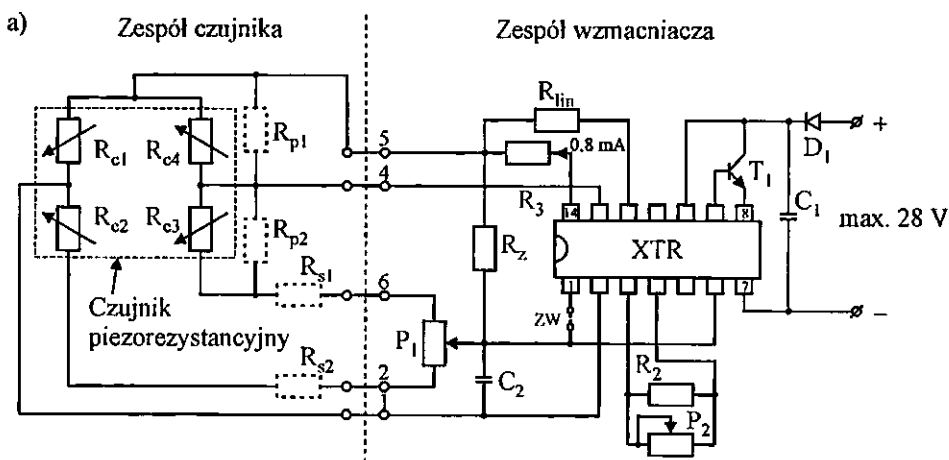
4.2. Elektroniczne układy przetwarzania informacji

4.2.1. Układy analogowe

Na rys. 4.8a przedstawiono schemat elektryczny analogowego przetwornika ciśnienia opartego na specjalizowanym układzie Burr Brown typ XTR 105.

Piezorezystancyjny, zintegrowany czujnik ciśnienia złożony z piezorezystorów RC_1 , RC_2 przetwarza ciśnienie mierzone na sygnał elektryczny. W wyniku oddziaływania ciśnienia na krzemową membranę czujnika zmieniają się wartości rezystancji znajdujących się na membranie piezorezystorów połączonych w układ mostka pomiarowego.

Mostek czujnikowy jest zasilany prądem stałym 0,8 mA stabilizowanym przez specjalizowany układ scalony XTR105. Napięciowy sygnał wyjściowy mostka czujnikowego, proporcjonalny do ciśnienia pomiarowego, jest wzmacniony i przetworzony w tym układzie na sygnał prądowy w zakresie 4...20 mA. Jest to sygnał wyjściowy przetwornika. Stopień wyjściowy wzmacniacza układu XTR105 może być zrównoleglony przez dodatkowy tranzystor T1, który przejmuje znaczną część mocy rozpraszanej przez ten stopień.



Rys. 4.8. Analogowy przetwornik ciśnienia:
a) schemat elektryczny, b) przykład wykonania (przetwornik A 177 produkcji Mera Pnefal):
1 – przyłącze elektryczne, 2 – elektroniczny wskaźnik ciśnienia, 3 – korpus przetwornika z czujnikiem ciśnienia, 4 – doprowadzenie ciśnienia, 5 – obudowa układu elektronicznego przetwornika

Zgrubną nastawę rozstępu (szerokości) zakresu pomiarowego (*range*) (wzmocnienie układu XTR105) uzyskuje się za pomocą rezystora R1, natomiast do dokładnych nastaw służy potencjometr P2. Ustawianie poziomu sygnału 4 mA (co oznacza zerowanie sygnału wyjściowego) przeprowadza się za pomocą potencjometru P1. Dioda D1 służy do zabezpieczenia układu przed wpływem odwrotnego przyłączenia biegunów zasilania. Zasilanie układu elektrycznego przetwornika, jak i odbiór sygnału wyjściowego odbywa się tą samą parą przewodów przyłączeniowych (układ dwuprzewodowy). W automatyce przemysłowej najczęściej są stosowane przetworniki z sygnałem wyjściowym 4...20 mA prądu stałego, w tzw. systemie dwuprzewodowym. Dwuprzewodowy układ połączeń zewnętrznych przetwornika pomiarowego charakteryzuje się tym, że jego sygnał wyjściowy 4...20 mA reprezentujący wartość wielkości mierzonej stanowi jednocześnie wartość obciążenia źródła napięcia zasilania układu przetwornika dołączonego do tych przewodów. W tym przypadku sygnał wyjściowy nie może zaczynać się od zera, gdyż prąd zasilania (ok. 3,5 mA) jest konieczny do uaktywnienia układu przetwarzającego w przetworniku.

Niewątpliwą zaletą przetworników analogowych z dwuprzewodowym układem połączeń jest minimalizacja ilości przewodów, co znacznie obniża koszt instalacji. Ponadto, wykrywanie uszkodzeń układu lub połączeń w układach dwuprzewodowych jest stosunkowo łatwe, gdyż powodują one spadek prądu poniżej 3,5 mA.

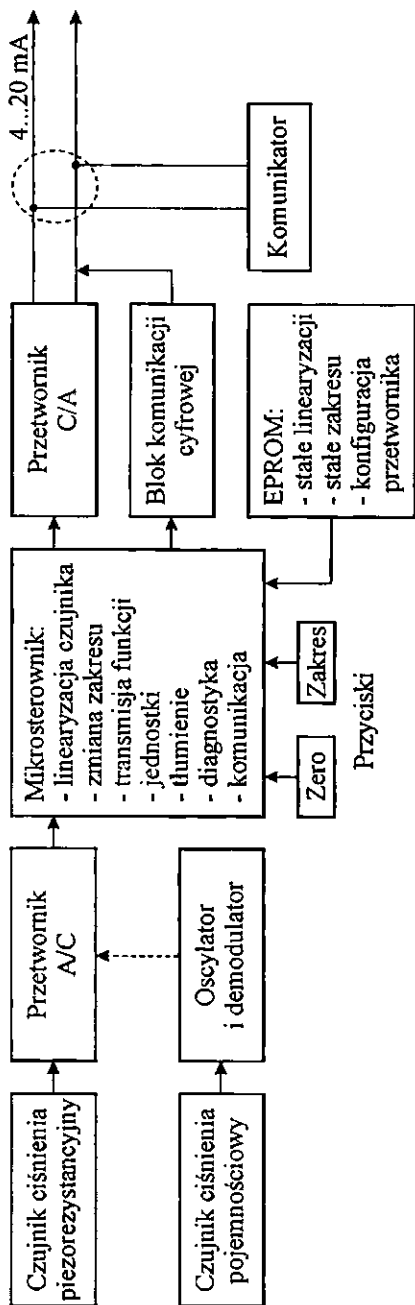
W odróżnieniu od omówionego układu prądowego, w niektórych zastosowaniach korzystniejsze jest stosowanie układów z wyjściem napięciowym. Zwykle układy takie zapewniają zmianę napięcia 0...5 V lub 0...10 V DC w zakresie pomiarowym przetwornika. Układy z wyjściem napięciowym są stosowane w układach laboratoryjnych w zastosowaniach innych niż automatyka przemysłowa (np. w motoryzacji) [85].

4.2.2. Układy cyfrowe

Samoregulujące się przetworniki pomiarowe, zwane inteligentnymi (*smart*) stanowią obecnie podstawową bazę elementową dla rozwiniętych systemów automatyki. Przetworniki ciśnienia z cyfrowymi układami przekazywania informacji mogą być wyposażone w różnorakie funkcje, do których należą m.in.: autodiagnostyka, autokorekcja błędów, możliwość zdalnej zmiany właściwości metrologicznych. W bardziej rozwiniętych wersjach wprowadzono możliwość oszacowania czasu, po którym należy wykonać ponowną kalibrację przyrządu, a także prawdopodobieństwo wystąpienia awarii przetwornika, co pozwala na czas wyłączyć go z pętli pomiarowej i zastąpić naprawionym lub nowym przyrządem [101, 102].

Typowy układ elektroniczny cyfrowych przetworników ciśnienia składa się z następujących bloków: układu analogowego-cyfrowego przetwarzającego sygnał z czujnika na sygnał cyfrowy, układu mikroprocesorowego realizującego funkcje przetwornika takie jak: przeliczanie poprawek do korekcji błędów, sterowanie sygnałami wejściowymi i wyjściowymi, nastawianie dolnej i górnej granicy zakresu pomiarowego.

Na rys. 4.9 przedstawiono schemat ideowy przykładowego cyfrowego układu przetwornika ciśnienia.

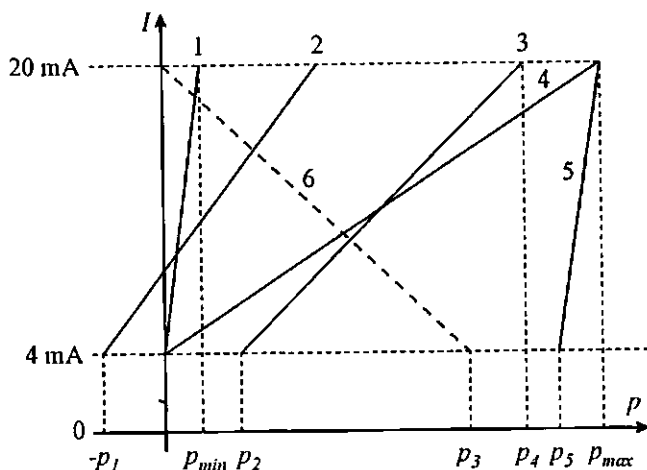


Rys. 4.9. Schemat ideowy układu elektronicznego inteligentnego przetwornika

Ważną cechą przetworników cyfrowych jest możliwość zmian charakterystyki przetwornika, zależnie od wymagań aplikacyjnych. Na rys. 4.10 przedstawiono możliwości zmian charakterystyk.

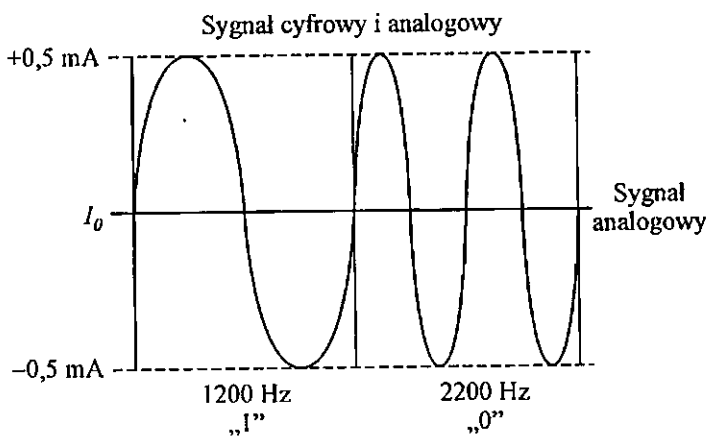
Kolejną zaletą przetworników cyfrowych jest możliwość wprowadzenia, oprócz kompensacji analogowej, dodatkowo cyfrowej kompensacji wpływu wielkości zakłócających, dzięki czemu przetworniki cyfrowe są znacznie dokładniejsze niż przetworniki analogowe [94].

Transmisja danych i rozkazów pomiędzy przetwornikiem typu *smart* a komputerem nadrzędnym jest realizowana za pomocą odpowiednich interfejsów, zgodnie ze standardowymi protokołami. Najstarszym protokołem używanym do komunikowania się przetworników z systemem nadrzędnym jest HART (*Highway Addressable Remote Transducer*). Jest to protokół opracowany w firmie Rosemount; w protokół ten były wyposażane przetworniki przemysłowe tej firmy (1151, 3051). Pomimo, że jest to protokół opracowany wiele lat temu i stosunkowo wolny, nadal jest jednym z najczęściej stosowanych protokołów w przetwornikach ciśnienia. Standard HART określa, że przetwornik pomiarowy jest źródłem sygnału prądowego w zakresie 4...20 mA. Nośnikiem informacji cyfrowej jest zmodulowany częstotliwościowo sygnał prądowy o amplitudzie $\pm 0,5$ mA nałożony na analogowy sygnał prądowy 4...20 mA. Stan logiczny „0” jest reprezentowany przez sygnał o częstotliwości 2200 Hz, a stan logiczny „1” przez sygnał o częstotliwości 1200 Hz. Szybkość transmisji jest stała i wynosi 1200 bit/s.



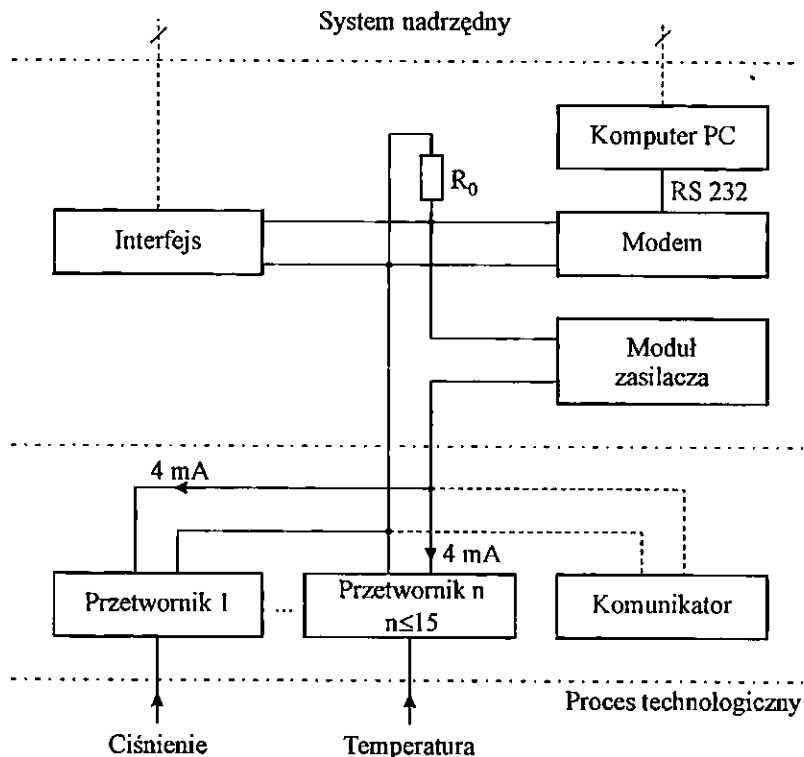
Rys. 4.10. Przykładowe charakterystyki przetwornika ciśnienia: 1 – charakterystyka dla minimalnego zakresu pomiarowego, 2 – charakterystyka z obniżonym zerem do wartości p_2 , 3 – charakterystyka z podniesionym zerem do wartości p_1 oraz o rozstępie (szerokości) zakresu równej $p_4 - p_2$, 4 – charakterystyka nastawiona na maksymalny zakres pomiarowy, 5 – charakterystyka dla minimalnego zakresu pomiarowego z podniesionym zerem do wartości p_3 , 6 – charakterystyka przetwornika nastawionego na odwrotne działanie (rewersyjne), dla której wzrostowi ciśnienia od zera do p_3 towarzyszy spadek prądu od 20 mA do 4 mA

Cechą szczególną tego rodzaju modulacji jest to, że wartość średnia sygnału zmodulowanego jest taka sama, jak wartość pierwotna sygnału nośnego. Na rys. 4.11 przedstawiono zasadę tej transmisji [121].



Rys. 4.11. Zasada transmisji wykorzystującej protokół HART

Przetworniki cyfrowe wyposażone w odpowiednie interfejsy mogą pracować w lokalnych sieciach pomiarowych. Schemat przykładowej sieci lokalnej złożonej z przetworników: ciśnienia i temperatury, zasilacza, przemysłowego modemu Bell 202 oraz interfejsu RS-232 przedstawiono na rys. 4.12.



Rys. 4.12. Schemat przykładowej sieci lokalnej przetworników pomiarowych

Praca w sieci lokalnej (komunikacja MULTIDROP) polega na podłączeniu kilku przetworników typu *smart* do pojedynczej linii dwuprzewodowej. Komunikacja w tym systemie pomiędzy jednostką nadrzędną (komputer PC) a przetwornikiem odbywa się przy wykorzystaniu sygnałów cyfrowych. Analogowe sygnały wyjściowe poszczególnych przetworników są wyłączone. Protokół HART umożliwia pracę w sieci lokalnej maksymalnie 15 przetwornikom połączonym równolegle do linii sygnałowej (skręcona para przewodów).

W przetwornikach cyfrowych są stosowane zarówno interfejsy szeregowe, jak i równoległe. Do najczęściej stosowanych należy interfejs szeregowy RS-232 oraz jego modyfikacje (RS-232C). Ważną zaletą tego interfejsu jest to, że obecnie prawie każdy komputer PC jest w niego wyposażony. Pozwala on na przesyłanie danych na odległość nie

większą niż 15 m. Wydłużenie przewodu przesyłowego może zwiększyć wrażliwość na zakłócenia i prawdopodobieństwo wystąpienia błędów transmisji. Zwiększenie zasięgu transmisji jest możliwe przy zastosowaniu innych interfejsów szeregowych (RS-422A, RS-423A i RS-485), w których organizacja logiczna przesyłania znaków jest taka sama jak w RS-232, ale inna jest realizacja obwodów interfejsu i inne parametry elektryczne. Przy wykorzystaniu interfejsu RS-423A odległość przesyłania sygnałów można zwiększyć do 30 m, natomiast przy stosowaniu interfejsów RS-422A i RS-485 można uzyskać odległość do 1200 m [55, 121]. W przyrządach pomiarowych, głównie laboratoryjnych, jest stosowany interfejs równoległy zgodny ze standardem IEEE 488, występujący również pod nazwą GPIB (*General Purpose Interface Bus*). W Europie i w Polsce przyjęto go pod nazwą IEC-625 (*International Electrotechnical Commission*). Do magistrali cyfrowej IEC-625 można dołączyć jednocześnie 15 urządzeń. Długość kabli pomiędzy dwoma urządzeniami nie powinna przekraczać 2 m. Ograniczona jest również całkowita długość wszystkich kabli do 20 m [94, 104].

Przykładem układów przetwarzania informacji z możliwością programowania bezpośrednio przez użytkownika przetworników jest seria układów MAX. Układy te są przystosowane do laserowego kalibrowania rezystorów i umożliwiają programową regulację wzmocnienia przez wewnętrznie ustaloną wartość napięcia. W nowszych wersjach, w strukturę krzemową wbudowano czujnik temperatury oraz zastosowano technikę kompensacji opartą na tablicach danych temperaturowych (*look-up table*). Dla przykładu, układ MAX 1452 współpracując z czujnikiem piezorezystancyjnym, pozwala na pomiary z błędem całkowitym mniejszym niż 0,25 % w zakresie zmian temperatury od -40 °C do +125 °C [55].

Inną klasą układów programalnych, które można wykorzystać w profesjonalnym sprzęcie pomiarowym, są układy typu ASIC oraz PLD (*Programmable Logic Device*). Układy typu ASIC są to programowalne układy wykonane w firmie półprzewodnikowej według projektu zamawiającego. Proces programowania odbywa się najczęściej u producenta układów. Konfiguracja zaprogramowanego układu nie może być zmieniona dla danej serii, co uniemożliwia wprowadzenie w niej poprawek. Jest to niekorzystna cecha, zwłaszcza na etapie projektowania i wytwarzania prototypów przyrządów bądź urządzeń.

Innym rozwiązaniem, które umożliwia wprowadzanie poprawek na każdym etapie projektowania lub wytwarzania, są układy typu PLD. Jest to obecnie najbardziej efektywne narzędzie do projektowania i budowania przyrządów elektronicznych. Układy PLD są wykonywane w technologii CMOS, dzięki czemu charakteryzują się dużą gęstością upakowania bramek, dużą szybkością i małą konsumpcją mocy. Układy PLD są niezwykle efektywne, jeśli chodzi o koszty i elastyczność w wielu zastosowaniach. W przeciwieństwie do układów ASIC, dla których dopiero wytworzenie serii kilku tysięcy jest uzasadnione ekonomicznie, układy PLD można wykorzystywać już przy niewielkich seriach kilkudziesięciu sztuk. Stosując układy PLD, można w relatywnie krótkim czasie projektować i wytwarzać prototypy najbardziej skomplikowanych i wyrafinowanych przyrządów elektronicznych, trzeba jednak zakupić odpowiednie narzędzia techniczne i opanować technikę programowania [101].

Podsumowując niniejszy rozdział, można zauważyć, że w najnowszych rozwiązaniach przetworników ciśnienia obserwuje się następujące trendy:

- osiągnięcie dokładności pomiaru z błędem poniżej 0,1 % górnej granicy zakresu pomiarowego,
- wprowadzanie funkcji samodiagnostycznych zarówno dla czujników, jak i dla układów przetwarzających,
- wprowadzanie rozwiązań redundancyjnych zarówno na poziomie sprzętowym, jak i w oprogramowaniu,
- integrowanie w jednym przetworniku wielu rodzajów czujników np. ciśnienia i temperatury, ciśnienia absolutnego i temperatury,
- poszukiwanie i wykorzystywanie nowych materiałów zwiększających odporność przetworników na działanie środowiska pomiarowego,
- wprowadzanie możliwości zdalnej kalibracji oraz wydłużanie czasu pomiędzy kalibracjami,
- minimalizacja kosztów wytwarzania przy optymalnym poziomie wartości parametrów i funkcji.

4.2.3. Konstrukcje przetworników przeznaczonych do pracy w obszarach zagrożonych wybuchem

W wielu monitorowanych procesach fizykochemicznych występują substancje w postaci gazów, par, mgieł, cieczy lub pyłów, które mogą tworzyć mieszaniny wybuchowe z powietrzem. W tabelicy 4.2 podano klasyfikację stref zagrożenia wybuchem [110, 111, 112, 113].

Tablica 4.2. Klasyfikacja stref zagrożenia wybuchem

Klasyfikacja obszarów niebezpiecznych		Kryteria definiowania stref zagrożenia wybuchem
Gazy	Pyły	
Strefa 0	Strefa 20	zagrożenie obecne nieprzerwanie lub przez dłuższy czas (>1000 h/rok)
Strefa 1	Strefa 21	zagrożenie może wystąpić w normalnych warunkach pracy (>10 h/rok)
Strefa 2	Strefa 22	zagrożenie mało prawdopodobne w warunkach pracy lub wystąpienie na krótko (10 h/rok)

Stosowana w wyżej wymienionych strefach aparatura pomiarowa powinna być tak skonstruowana, aby jej działanie nie spowodowało wybuchu i to zarówno podczas normalnej pracy, jak i we wszystkich możliwych stanach awaryjnych. Źródłami zapłonu, a w konsekwencji wybuchu, mogą być elementy o podwyższonej temperaturze, a także iskrzenie pochodzenia elektrycznego lub mechanicznego.

Rodzaje budowy przeciwybuchowej

W celu wyeliminowania źródeł zapłonu przyrządy pomiarowe powinny być skonstruowane według następujących zasad [60]:

- elementy i obwody elektrycznego przyrządu powinny być zamknięte w obudowie uniemożliwiającej „przeniesienie” wybuchu z wnętrza obudowy do otoczenia,
- do budowy przyrządu należy zastosować elementy o odpowiednio podwyższonej niezawodności w odniesieniu do stosowanych w wykonaniu zwykłym,
- obwody zewnętrzne i wewnętrzne przyrządu należy wykonać tak, aby w tych obwodach iskrzenie lub nagrzewanie nie mogło spowodować zapalenia mieszaniny wybuchowej zarówno w stanie normalnej pracy, jak i we wszystkich możliwych stanach awaryjnych.

W zależności od zastosowanego sposobu osiągnięcia zabezpieczenia, rozróżnia się osiem rodzajów budowy przeciwybuchowej. Do najbardziej znanych i najczęściej stosowanych należą przyrządy iskrobezpieczne, ognioszczelne i budowy wzmocnionej [104, 113].

Zasady konstruowania przyrządów iskrobezpiecznych

Szczególną grupą przyrządów dopuszczonych do pracy w strefach zagrożonych wybuchem są przyrządy iskrobezpieczne. W przypadku elektronicznych przetworników ciśnienia stosowanych w układach automatyki przemysłowej z reguły wykorzystuje się sygnał prądowy 4...20 mA w dwuprzewodowym układzie połączeń zewnętrznych. Ten rodzaj sygnału jest szczególnie korzystny przy konstruowaniu układów iskrobezpiecznych ze względu na niski poziom energii sygnału [112]. Dołączony do tak skonstruowanego przetwornika zewnętrzny obwód, stanowiący jego tor pomiarowo-zasilający, musi być także obwodem iskrobezpiecznym.

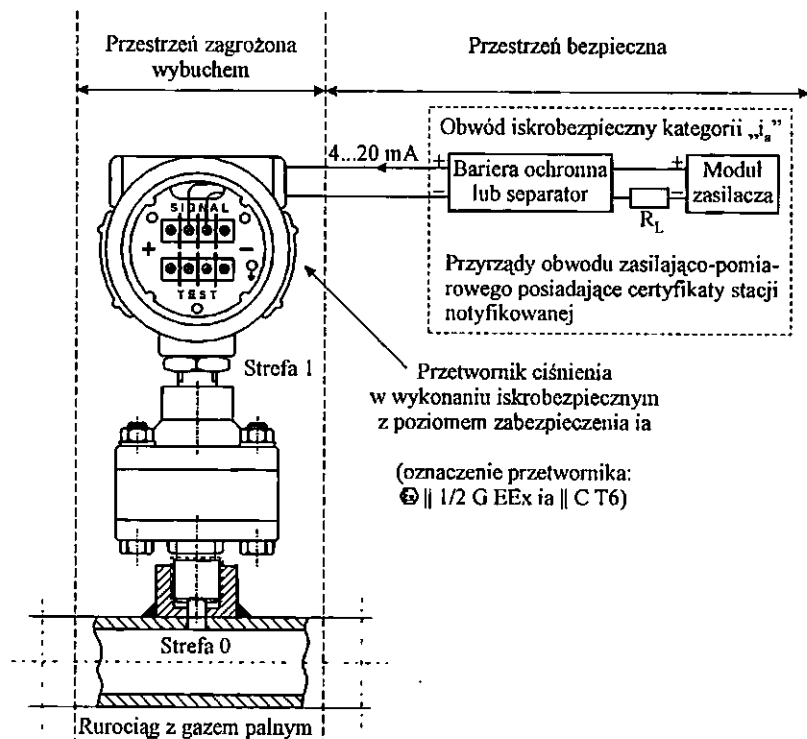
Przyrządy wykonane w wersjach iskrobezpiecznych są oznaczane literą „i”, przy czym wyróżnia się dwie kategorie urządzeń iskrobezpiecznych „ia” oraz „ib”. Urządzenia elektryczne dopuszczone do pracy w kopalniach metanowych mają oznaczenie grupy I, a dla pozostałych przemysłów – grupy II. Dodatkowo, urządzenia grupy II są podzielone na podgrupy IIA, IIB i IIC [110, 112, 113]. Podział ten jest przeprowadzany na podstawie minimalnych prądów zapalających odpowiednie gazy i pary.

Zasady integralnego bezpieczeństwa przeciwybuchowego są sformułowane w Dyrektywie UE ATEX 100 A (Directive 94/9/EC) [113, 114]. Dyrektywa ta stanowi podstawę dla norm zharmonizowanych, których wymagania techniczne zapewniają zgodność z zasadniczymi wymaganiami dyrektywy. Dyrektywa wprowadza m.in. zmienioną kategoryzację urządzeń oraz zawiera zasady badań i certyfikacji tych urządzeń. Dla górnictwa urządzenia przeciwybuchowe są klasyfikowane w dwóch kategoriach [109]: M 1 – dla bardzo wysokiego poziomu ochrony i M 2 – dla wysokiego poziomu ochrony. Dla przemysłów poza górnictwem urządzenia przeciwybuchowe są klasyfikowane w trzech kategoriach:

- kategoria 1 dla bardzo wysokiego stopnia ochrony,
- kategoria 2 dla wysokiego stopnia ochrony,
- kategoria 3 dla normalnego stopnia ochrony.

Spełnianie wymagań dla danej grupy zależy od przeznaczenia urządzenia i strefy, w której ma ono pracować. Przestrzenie zagrożone wybuchem są sklasyfikowane jako odpowiednie strefy, a ich poziom zależy od występowania lub prawdopodobieństwa wystąpienia niebezpiecznych substancji lub ich par. Klasyfikacja tych stref jest podana w PN-EN 60079-10:2003 (U).

Na rys. 4.13 przedstawiono przykład dołączania iskrobezpiecznego przetwornika ciśnienia w rurociągu z gazem palnym. W tym przypadku wewnątrz rurociągu występuje strefa zagrożenia 0, natomiast na zewnątrz (otoczenie rurociągu przy króćcach przyłączeniowych i zaworach) występuje strefa zagrożenia 1.



Rys. 4.13. Układ połączeń zewnętrznych przetwornika ciśnienia w obwodzie iskrobezpiecznym

W krajach Unii Europejskiej obowiązuje globalne podejście do spraw bezpieczeństwa wyrobów wprowadzanych do obrotu. Produkt musi spełniać wymagania dyrektyw „nowego podejścia”, którym podlega i wtedy może być oznaczony znakiem CE. Fakt ten jest potwierdzany deklaracją zgodności [105, 106, 107].

Elektryczne urządzenia budowy przeciwwybuchowej podlegają dyrektywom, które określają ogólne wymagania odnośnie do wyrobu, obejmując m.in. Dyrektywę dotyczącą kompatybilności elektromagnetycznej (EMC 89/336/EEC [109]).

5. KALIBRATORY CIŚNIENIA

Pomiary, szczególnie wykonywane przy użyciu przyrządów będących elementami kontrolnymi linii technologicznych, muszą być dostatecznie dokładne i niezawodne. Jest to tym bardziej istotne, gdy wielkości mierzone, np. wilgotność, temperatura, ciśnienie, stanowią punkty krytyczne procesu technologicznego. Zapewnienie wymaganej dokładności i niezawodności pomiarów powinno być osiągnięte przez okresowe wzorcowanie stosowanych przyrządów pomiarowych, na ogół zgodnie z obowiązującym u użytkownika systemem zarządzania jakością takim jak: ISO, HACCP (*Hazardous Analysis Critical Control Point*), GMP (*Good Manufacture Practice*) itp. [91]. Zgodnie z definicją podaną w [8], wzorcowanie (*calibration*) jest rozumiane jako zbiór operacji ustalających, w określonych warunkach, relację pomiędzy wartościami wielkości mierzonej wskazanymi przez przyrząd pomiarowy lub układ a odpowiednimi wartościami realizowanymi przez wzorce jednostki miary. Jednak, jak podano w [120], termin wzorcowanie jest niejednokrotnie używany wymiennie z terminem kalibracja i w zasadzie nie ma jednoznacznego rozróżnienia pomiędzy tymi dwoma terminami.

Przystępując do procesu kalibracji przyrządu pomiarowego, należy zwrócić uwagę na następujące, bardziej szczegółowe problemy:

- poprawny wybór metody kalibracji zależnie od typu przyrządów, które mają być kalibrowane i od obowiązujących procedur,
- wybór przyrządów, za pomocą których zostanie przeprowadzona kalibracja,
- opracowanie procedury kalibracji konkretnego przyrządu,
- spełnienie wymogów określonych przez krajowe i międzynarodowe normy,
- zapewnienie poprawnej obsługi i konserwacji stanowisk do kalibracji,
- opracowanie i wdrożenie narzędzi programowych do poprawnej analizy danych uzyskanych w trakcie kalibracji lub okresowych sprawdzeń przyrządów.

W celu przeprowadzenia poprawnego wzorcowania przyrządu pomiarowego, użytkownik musi dysponować odpowiednią aparaturą kontrolno-pomiarową. Na ogół przyjmuje się, że przyrząd wzorcowy powinien charakteryzować się dopuszczalnym błędem pomiaru 3 do 5 razy mniejszym niż dopuszczalny błąd przyrządu sprawdzanego [21].

Przyrządy do bardzo dokładnych pomiarów ciśnienia można podzielić na dwie podstawowe grupy:

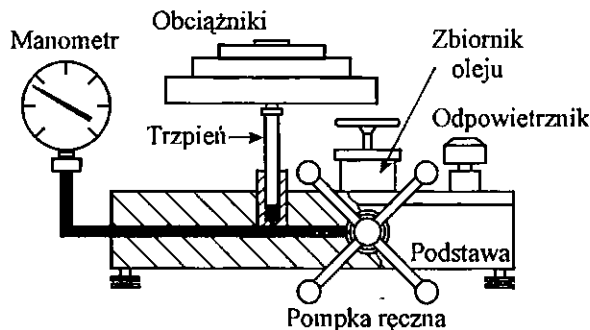
- wzorce pierwszego rzędu – pierwotne;
- wzorce drugiego rzędu – wtórne.

Wzorce pierwotne stanowią najdokładniejsze przyrządy do pomiaru ciśnienia. Ich zasada działania jest oparta na pomiarze pierwotnych wielkości, do których należą m.in. masa, długość, temperatura. Wzorcami wtórnymi na ogół są przyrządy z czujnikami ciśnienia piezorezystancyjnymi, pojemnościowymi, rezonatorowymi.

5.1. Pierwotne wzorce ciśnienia

W laboratoriach wzorcowych (akredytowanych) używa się przede wszystkim wzorców pierwszego rzędu. Na przykładzie techniki wykonania wzorców pierwotnych można prześledzić jak ogromny postęp techniczny i technologiczny został osiągnięty w ostatnich kilkudziesięciu latach w tej dziedzinie. Przykładem najprostszego wzorca pierwotnego jest ciśnieniomierz hydrostatyczny typu u-rurkowego. Ciśnieniomierze takie, wykorzystywane od setek lat do dokładnych pomiarów ciśnienia, są używane do pomiaru bardzo niskich ciśnień [121, 129]. Ich niezwykła prostota konstrukcji, a jednocześnie dokładność pomiaru spowodowały, że są one stosowane również współcześnie, nawet w renomowanych laboratoriach. Naturalnie, najnowsze przyrządy są wyposażone w szereg nowych udogodnień technicznych, np. w mikroskopy oraz wzorcowe skale zmniejszające przypadkowość wizualnego odczytu [121].

Innym przykładem wzorca ciśnienia pierwszego rzędu są manometry obciążnikowo-tłokowe (praski). Praski obciążnikowo-tłokowe są używane do pomiaru ciśnień średnich (w wersji pneumatycznej) i wysokich (w wersji hydraulicznej). Przyrządy te umożliwiają pomiary z dokładnością 0,025 % do 0,005 % wartości odczytanej. Przykład takiej praski przedstawiono na rys. 5.1 [120, 121].



Rys. 5.1. Schemat praski obciążnikowo-tłokowej (wersja hydrauliczna)

Zasada działania praski polega na obciążaniu obciążnikami tłoka praski, który jest omywany strumieniem powietrza lub oleju. Wadą pras obciążnikowo-tłokowych jest duże uzależnienie dokładności pomiaru od stabilności warunków pomiarowych, szczególnie przy bardzo dokładnych pomiarach. Na przykład w celu uzyskania dokładności pomiaru poniżej 0,05 % wartości odczytu, za każdym razem trzeba uwzględniać bardzo precyzyjne poprawki związane z położeniem geograficznym laboratorium, ciśnieniem atmosferycznym, temperaturą, wilgotnością i przyspieszeniem ziemskim. Użytkowanie pras obciążnikowo-tłokowych jest proste, jednak wymaga szeregu powtarzających się manualnych czynności, polegających na nakładaniu i zdejmowaniu obciążników. Proces ten jest trudny do zautomatyzowania. Problem komplikuje się przy pomiarach wyższych ciśnień, gdyż do zadawania ciśnienia trzeba używać medium ciekłego. Praski obciążnikowo-tłokowych są przeznaczone do użytkowania głównie w laboratoriach, wyposażo-

nych w klimatyzowane pomieszczenie i wysoko kwalifikowany personel. Istotną wadą prasek jest to, że nie można zadawać dowolnej wartości ciśnienia, a jedynie wartości obciążników (lub ich kombinacje), w które praska jest wyposażona. O możliwościach pomiarowych decyduje więc liczba odważników, skutkiem tego są wysokie ceny prasek (kilkadziesiąt, a nawet kilkaset tysięcy złotych), gdyż koszty wytwarzania odważników zwykle są bardzo wysokie, z uwagi na konieczność niezwykle precyzyjnej ich obróbki (dokładność masy, gładkość).

5.2. Wtórne wzorce ciśnienia

Dzięki osiągnięciom współczesnej technologii i techniki mikroprocesorowej, opracowano nowe rozwiązania wtórnych wzorców ciśnienia, zwanych kalibratorami ciśnienia. Charakteryzują się one znacznie mniejszymi wymiarami geometrycznymi w porównaniu z ich klasycznymi odpowiednikami, przy zachowaniu wysokiej dokładności. Osiągnięta miniaturyzacja stwarza możliwość ich stosowania zarówno w warunkach laboratoryjnych, jak i na obiektach przemysłowych, tj. bezpośrednio w miejscach użytkowania przetworników ciśnienia.

Podstawową funkcją kalibratorów jest weryfikacja z odpowiednią dokładnością charakterystyk przetwarzania użytkowanego przetwornika. W przypadku kalibratorów ciśnienia jest to współbieżny pomiar ciśnienia (sygnał wejściowy przetwornika) i pomiar sygnału elektrycznego (sygnał wyjściowy przetwornika). Na ogół wymaga się, aby współczesne kalibratory umożliwiały pomiary, których błędy nie przekraczają 0,05 % górnej granicy zakresu pomiarowego.

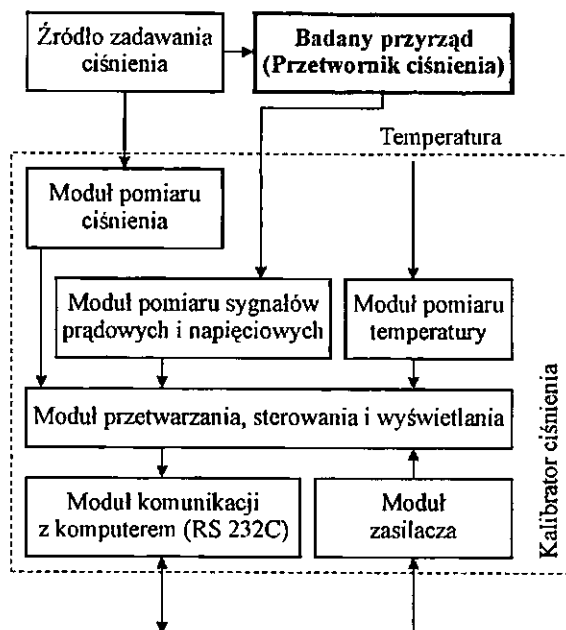
Czynnikami stanowiącymi o jakości i atrakcyjności kalibratorów ciśnienia są [102]:

- możliwość pomiaru z odpowiednio wysoką dokładnością,
- możliwość użytkowania kalibratora w dowolnym miejscu obiektu przemysłowego przy zachowaniu pełnych walorów metrologicznych,
- zintegrowanie wielu funkcji pomiarowych i obliczeniowych w jednym przyrządzie,
- łatwość obsługi przyrządu,
- przystępna cena.

Na rys. 5.2 przedstawiono schemat struktury typowego mikroprocesorowego kalibratora ciśnienia. Zawiera ona następujące moduły funkcjonalne:

- moduł czujników składający się z dwóch czujników ciśnienia o różnych zakresach pomiarowych, które stanowią wzorce przy pomiarze zadanego z zewnątrz ciśnienia,
- czujnik temperatury służący do pomiaru temperatury odniesienia wykorzystywanej w procedurze kompensacji temperaturowej parametrów czujników ciśnienia,
- mikroprocesorowy moduł przetwarzania i wyświetlania, który przetwarza sygnały z czujników na sygnał cyfrowy oraz realizuje funkcje sterowania, kompensacji błędów czujników ciśnienia, funkcje we/wy (wyświetlacz, pamięć wewnętrzna do zapamiętywania danych pomiarowych, interfejs RS-232).
- moduł pomiaru sygnałów elektrycznych.

Ważnym blokiem kalibratora jest moduł czujników ciśnienia, który w połączeniu z procedurami kompensacji parametrów tych czujników decyduje o dokładności przyrządu.



Rys. 5.2. Schemat struktury mikroprocesorowego kalibratora ciśnienia

Czujniki ciśnienia do zastosowań w kalibratorach powinny charakteryzować się [88, 89, 90]:

- względnie szerokim zakresem pomiarowym,
- dużą stabilnością parametrów,
- stosunkowo dużą dokładnością przetwarzania,
- małymi wymiarami geometrycznymi,
- możliwie małym poborem energii.

Zapewnienie możliwości użytkowania kalibratora w dowolnym miejscu instalacji przemysłowych i niezależnie się od występującego w tym miejscu medium pomiarowego, wymaga zastosowania odpowiedniej dla tego medium ochrony czujnika.

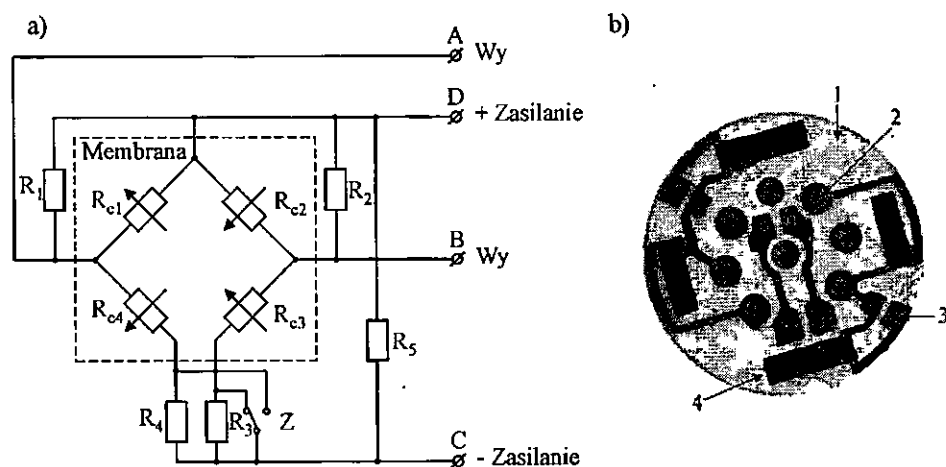
5.2.1. Kompensacja błędów czujników ciśnienia przeznaczonych do zastosowań w precyzyjnych kalibratorach

Większość czujników ciśnienia oraz zbudowanych na ich bazie przyrządów pomiarowych wymaga kompensacji błędów dodatkowych wynikających ze zmian parametrów środowiska pomiarowego, takich jak: temperatura, wilgotność, ciśnienie atmosferyczne, wibracje itp. W wielu przypadkach błędy pomiarowe spowodowane tymi zmianami są na tyle duże, że mogą dyskwalifikować przyrząd jako wzorzec pomiarowy. W tej sytuacji zachodzi konieczność minimalizacji błędów przez zastosowanie odpowiednich procedur kompensacyjnych.

Metody kompensacji można generalnie podzielić na dwie grupy: analogowe i numeryczne. Jest oczywiste, że metody analogowe odgrywały dominującą rolę przed szerokim wprowadzeniem technik mikroprocesorowych. Wraz z rozwojem szybkich mikroprocesorów i odpowiednich algorytmów kompensacji znaczenie metod analogowych powoli się zmniejsza. Niezależnie od stosowanych technik, zasadnicze zadania procesu kompensacji to:

- minimalizacja nieliniowości charakterystyki przetwarzania czujnika,
- eliminacja (minimalizacja) wpływu zmian środowiska pomiarowego, przede wszystkim zmian temperatury, na parametry ciśnieniomierza.

Przykład realizacji kompensacji analogowej w krzemowych czujnikach ciśnienia przedstawiono na rys. 5.3.



Rys. 5.3. Płytkę z rezystorami kompensującymi wpływ temperatury na parametry czujnika: a) schemat elektryczny [11], b) przykład rzeczywistej realizacji w technologii grubowarstwowej: 1 – podłoże ceramiczne, 2 – kontakty do lutowania zewnętrznych wyprowadzeń, 3 – ścieżki przewodzące, 4 – rezystor grubowarstwowy

Rezystory R_{c1} do R_{c4} są wytworzone na membranie krzemowej będącej integralną częścią krzemowego czujnika ciśnienia. Rezystory R_1 i R_2 są wykorzystywane do kompensacji temperaturowej napięcia niezrównoważenia mostka czujnika przy braku oddziaływania ciśnienia na czujnik. Rezystory R_3 i R_4 służą do zrównoważenia mostka w temperaturze odniesienia, natomiast rezystor R_5 jest przeznaczony do temperaturowej kompensacji czułości czujnika ciśnienia (przy zasilaniu stałoprądowym mostka). Piezorezystory $R_1 \dots R_4$ są dobierane w trakcie badań temperaturowych czujników (indywidualnie dla każdego czujnika), a wyznaczone ich wartości są dopasowywane np. metodą trymowania laserowego [17]. Szerokie omówienie metod kompensacji przy wykorzystaniu mostków pomiarowych można znaleźć w [139].

Wprowadzenie metod kompensacji numerycznej pozwoliło na wykorzystanie innych algorytmów i metod matematycznych do kompensacji błędów przyrządów pomiarowych.

W ogólności, kompensacja numeryczna polega na wprowadzeniu do pamięci przyrządu danych uzyskanych w trakcie badań temperaturowych i wzorcowania czujników. Dane te, podlegając odpowiedniej obróbce matematycznej, pozwalają na minimalizację błędów pomiarowych przyrządu. W przypadku kalibratorów wykorzystanie narzędzi programowych do minimalizacji błędów jest szczególnie przydatne, gdyż pozwala na uzyskiwanie przyrządów pomiarowych wysokiej klasy przy stosowaniu do ich budowy względnie tanich, łatwo dostępnych czujników. Proces wzorcowania jest przeprowadzany oddzielnie dla każdego kalibratora i jest jednym z podstawowych faz w procesie jego wytwarzania. O jakości procesu wzorcowania, a tym samym wytworzonego kalibratora, decyduje jakość stanowiska do wzorcowania, a w szczególności używanych wzorców ciśnienia, których dopuszczalne błędy powinny być co najmniej 3 razy mniejsze niż dopuszczalne błędy wzorowanych kalibratorów [93]. W przypadku wzorcowania wtórnych wzorców ciśnienia wymagane wzorce są przyrządami wytwarzanymi na granicy dostępnych obecnie możliwości technicznych i technologicznych [100].

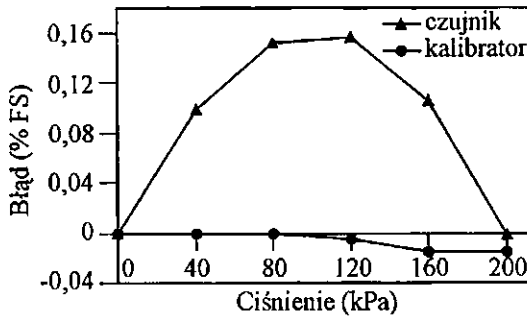
Układy i sposoby kompensacji parametrów przyrządów wykonanych w technice mikroprocesorowej można podzielić na dwie podstawowe grupy:

- grupa I – elementy, układy i procedury kompensacyjne są wbudowane przez producenta czujników,
- grupa II – dodatkowe procedury kompensacyjne, np. kalibratorów, opracowuje producent kalibratorów [102].

Poniżej przedstawiono przykład wykorzystania wyżej przedstawionego podejścia w zaprojektowanych i produkowanych w PIAP mikroprocesorowych kalibratorach ciśnienia serii PC-01 [95, 102]. Minimalizację błędów nieliniowości kalibratora uzyskuje się przez wprowadzenie odpowiednich danych (w postaci macierzowej) do pamięci kalibratora. Dane te są wykorzystywane do aproksymacji charakterystyki metodą linearyzacji odcinkowej [93]. Precyzja algorytmu kompensacji zależy od liczby punktów wzorcowania. Naturalnie, zwiększenie liczby węzłów aproksymacji zwiększa jej precyzję. Jednakże, przy wyborze liczby węzłów należy uwzględnić następujące czynniki:

- zwiększanie liczby węzłów pomiarowych wydłuża czas wykonywania niezbędnych testów w procesie produkcyjnym kalibratora, co bardzo silnie wpływa na jego koszty wytwarzania,
- zwiększanie dokładności kalibracji powoduje konieczność zwiększania czasu obróbki sygnałów w kalibratorze w trakcie jego użytkowania (czas wprowadzania poprawek); czas ten nie może spowodować widocznego opóźnienia wyświetlania wskazań.

Na rys. 5.4 przedstawiono charakterystykę statyczną typowego, piezorezystancyjnego czujnika ciśnienia w porównaniu z błędami charakterystyki kalibratora, po wykonaniu procedury linearyzacji. W przedstawionym przykładzie wykonanie procedur kompensacji numerycznej pozwoliło na 8-krotne zmniejszenie błędów wprowadzanych przez czujnik ciśnienia, dzięki czemu w kalibratorach serii PC-01 osiągnięto niedokładności pomiaru mniejsze niż 0,05 % górnej granicy zakresu pomiarowego.



Rys. 5.4. Charakterystyka statyczna czujnika ciśnienia zastosowanego w kalibratorze w porównaniu z charakterystyką kalibratora po wykonaniu procedury linearyzacji

Tablica 5.1. Porównanie właściwości technologii kompensacji czujników ciśnienia

Technologia					
Cecha	analogowa			korekcja	
	rezystory grubowarstwowe trymowane laserowo	rezystory cienkowarstwowe trymowane laserowo	rezystory cienkowarstwowe trymowane laserowo zintegrowane ze strukturą czujnika	analogowa z wykorzystaniem pamięci EEPROM	cyfrowa z wykorzystaniem pamięci EEPROM
Poziom oceny					
Poziom integracji	mała	mała	średnia	duża	bardzo duża
Koszt elementów	bardzo wysoki	wysoki	niski	niski	niski
Koszt testów	bardzo wysoki	wysokie	wysoki	średni	średni
Wymiary obudowy	duże	średnie	małe	małe	małe
Koszt obudowy	bardzo wysoki	wysoki	niski	niski	niski
Możliwość zmiany zakresów pomiarowych	dobra	dobra	średnia	mała	średnia
Możliwość ponownej kompensacji po zmontowaniu innego czujnika	brak	brak	brak	brak	jest
Dokładność kompensacji	mała	duża	średnia	średnia	bardzo duża

Stosując krzemowe czujniki ciśnienia do budowy precyzyjnych przyrządów ciśnienia, należy wziąć pod uwagę stosunkowo duży wpływ temperatury na parametry czujnika. W omawianych kalibratorach serii PC-01 do kompensacji błędów spowodowanych zmianami temperatury wprowadza się węzły interpolacji charakterystyk korekcyjnych dla 4 różnych wartości temperatury (5, 30, 40 i 50 °C), do których zastosowano dwuodcinkową aproksymację liniową. Pomiar temperatury w procesie kompensacji jest realizowany przez czujnik temperatury umieszczony we wnętrzu kalibratora. Dodatkowo, odczyt z czujnika temperatury może być wyświetlony jako niezależny pomiar temperatury otoczenia. Badania i kalibracja kalibratora są wykonywane na zautomatyzowanym stanowisku do wzorcowania [100]. Wybór metody i technologii kompensacji zależy przede wszystkim od rodzaju czujników i wielkości serii produkcyjnej przyrządów. W tablicy 5.1 podano porównanie właściwości różnych technologii wykorzystywanych do kompensacji błędów nieliniowości czujników ciśnienia i wpływu temperatury na nie [100, 121].

5.2.2. Wybrane problemy techniczne związane z projektowaniem i wytwarzaniem przenośnych kalibratorów ciśnienia

Z analiz ekonomicznych funkcjonowania typowych instalacji przemysłowych wynika, że zasadnym jest stosowanie kalibratorów przenośnych, gdyż pozwala to na weryfikację lub wzorcowanie przetworników bezpośrednio w miejscu ich użytkowania [102]. Należy jednak pamiętać, że w większości zastosowań przemysłowych układ kalibratora musi być chroniony przed rozproszonym polem elektromagnetycznym, które jest jednym z istotnych czynników zewnętrznych wpływających na zmniejszenie dokładności przyrządu. Sam przyrząd nie może zakłócać pracy innych przyrządów na obiekcie przemysłowym.

O jakości użytkowania kalibratora będą decydowały następujące jego cechy i funkcje:

- wyświetlacz z czytelnymi znakami alfanumerycznymi,
- łatwość odczytu w słabo oświetlonych pomieszczeniach,
- czytelna klawiatura,
- funkcje ułatwiające wykonywanie określonych procedur, np. procedury kalibrowania przetwornika na obiekcie,
- możliwość pomiaru w szerokim zakresie ciśnienia (wielozakresowość przyrządu),
- wskaźnik (najlepiej dźwiękowy) ostrzegający przed przeciążeniem czujnika ciśnienia,
- wskaźnik rozładowania akumulatora,
- ergonomiczna obudowa spełniająca jednocześnie wymagania dużej odporności na udary mechaniczne przy niewielkich wymiarach i masie oraz (co jest niebagatelne) niskiej cenie.

Ponadto przenośny kalibrator powinien być wyposażony w interfejs umożliwiający współpracę z komputerem PC.

Jednym z trudniejszych problemów przy konstruowaniu przenośnych przyrządów jest dobór odpowiedniej obudowy. Jest to zadanie trudne, z uwagi na fakt, że trzeba pogodzić sprzeczne ze sobą wymagania, do których przede wszystkim należą [89]:

- ekranowanie układu przed zaburzeniami elektromagnetycznymi,
- zmniejszenie poziomu zaburzeń emitowanych przez układ do otoczenia,
- zapewnienie szczelności i wytrzymałości mechanicznej,
- ergonomiczność,
- zapewnienie możliwie niskiej ceny,
- zapewnienie łatwego i szybkiego montażu zespołów w obudowie.

Na rys. 5.5 przedstawiono widok kalibratora zamontowanego w typowej, komercyjnej obudowie typu ALU-BOS, co pozwoliło na znaczne obniżenie kosztów wytwarzania tych kalibratorów.



Rys. 5.5. Widok płyty czołowej kalibratora ciśnienia PC-02

5.2.3. Podstawowe zasady poprawnego użytkowania przenośnych kalibratorów

W trakcie prac realizowanych w Przemysłowym Instytucie Automatyki i Pomiarów PIAP nad przenośnymi kalibratorami ciśnienia serii PC-01, nacisk położono na opracowanie przyjaznych użytkownikowi procedur obsługi. Najważniejsze operacje wchodzące w skład tych procedur zestawiono w tablicy 5.2 [95].

Tablica 5.2. Struktura funkcjonalna kalibratora

Lp.	Nazwa funkcji kalibratora	Wybór opcji	Wskazania kalibratora
1.	Autotest	Włączenie kalibratora	Kolejne wyświetlanie danych kalibratora (po pozytywnym autoteście)
2.	Kalibracja lub sprawdzanie przetwornika	Jednostka ciśnienia Zakres pomiarowy Liczba punktów i cykli pomiarowych Rodzaj sygnału elektrycznego Zakres pomiarowy sygnału elektrycznego Rodzaj charakterystyki przetwornika (liniowa, pierwiastkowa)	Procedura kalibratora i wartości: • ciśnienia, • sygnału prądowego lub napięciowego, • błędu przetwarzania
3.	Kalibracja lub sprawdzanie manometru	Jednostka ciśnienia Zakres pomiarowy Liczba punktów pomiarowych	Wartości: • ciśnienia, • błędu wskazania manometru
4.	Przegląd pamięci zawierającej wyniki pomiarów	Wskazanie wprowadzonych danych dotyczących badanego przyrządu (typ, numer seryjny)	Tablice z wynikami pomiarów
5	Przepisywanie wyników pomiarów z pamięci kalibratora do komputera (typu PC)	Wybór bloku danych do transmisji do PC	Procedura obsługi transmisji
6.	Pomiar temperatury	°C	Temperatura otoczenia
7.	Pomiar ciśnienia i sygnału elektrycznego	Jednostka ciśnienia Zakres pomiarowy Sygnał prądowy lub napięciowy	Wartości: • ciśnienia, • prądu lub napięcia

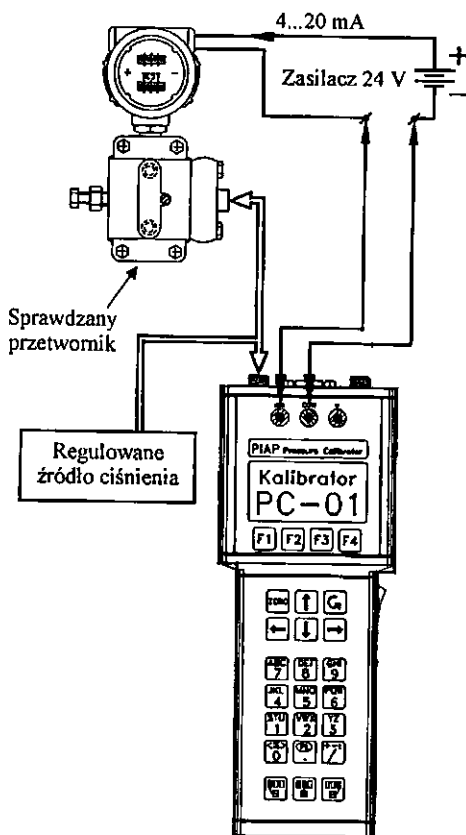
Jak wspomniano, podstawową funkcją kalibratorów jest realizacja procedury kalibracji przetworników ciśnienia, różnicy ciśnień itp. Algorytmy wraz z przykładami praktycznych zastosowań pomiarowymi omówiono wyczerpująco w [95].

Jak wspomniano, przenośne kalibratory ciśnienia mogą być używane zarówno w stacjonarnych laboratoriach, jak i na obiektach przemysłowych. Na rys. 5.6 i 5.7 przedstawiono przykłady takich zastosowań.

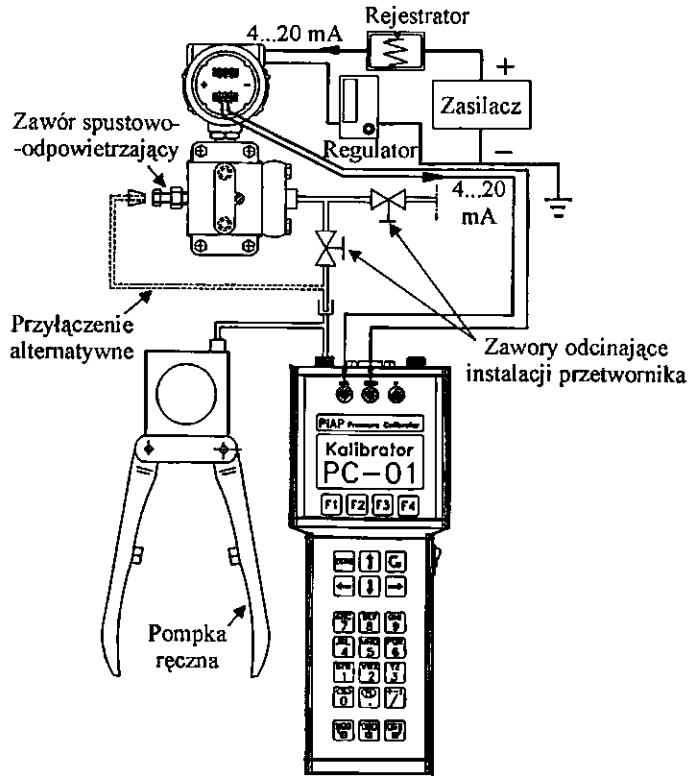
Laboratoryjny układ do kalibracji i sprawdzania elektronicznych przetworników ciśnienia, różnicy ciśnień i poziomu za pomocą kalibratora ciśnienia PC-01 obejmuje następujące przyrządy:

- sprawdzany przetwornik z odpowiednim przyłączem ciśnieniowym (w przypadku przetwornika poziomu wymagane jest przyłącze kołnierzowe),
- kalibrator ciśnienia PC-01, którego programowo wybierany zakres pomiarowy musi pokrywać się z zakresem pomiarowym sprawdzanego przetwornika,
- regulowane źródło ciśnienia (ręczna pompka np. ZC-1, ZC-2 lub ZC-3 produkcji PIAP lub instalacja sprężonego powietrza z nastawnikiem ciśnienia),
- zasilacz 24 V DC do zasilania układu pomiarowego.

Po połączeniu układu pomiarowego, zgodnie z rys. 5.6 i deklaracji parametrów sprawdzanego przetwornika dla wybranej opcji z menu kalibratora, należy postępować zgodnie z procedurami wyświetlanymi na ekranie kalibratora, które prowadzą użytkownika krok po kroku przez proces kalibracji i sprawdzania przetwornika. W przypadku, gdy nie ma możliwości demontażu przetwornika lub gdy jest to nieopłacalne, kalibrację można wykonać bezpośrednio na linii obiektowej. Układ pomiarowy do obiektowej kalibracji i sprawdzania jest przedstawiony na rys. 5.7. Wybór przyłącza do podłączenia zadanego ciśnienia na obiekcie zależy od konkretnej instalacji; może to być przyłącze w pokrywie przetwornika w miejscu zaworu spustowo-odpowietrzającego (dotyczy przetworników różnicy ciśnień) lub od strony spustowej. Sprawdzanie na obiekcie jest niewykonalne jedynie dla przetworników poziomu. Włączenie wejścia prądowego kalibratora w obwód sygnału pomiarowego przetwornika zwykle dokonuje się na listwie zaciskowej przetwornika. Procedury kalibracji i sprawdzania przetwornika realizuje się analogicznie jak w przypadku układu laboratoryjnego.



Rys. 5.6. Przykład zastosowania kalibratora ciśnienia w układzie kalibracji w stacjonarnym laboratorium pomiarowym



Rys. 5.7. Przykład zastosowania kalibratora ciśnienia w układzie kalibracji bezpośredniej na obiekcie przemysłowym

Pomiary, szczególnie związane z kalibracją, powinny uwzględniać poziom niepewności pomiaru. W laboratoriach pomiarowych, w których pomiary są wykonywane w warunkach ustalonych, w pomieszczeniach klimatyzowanych lub w komorach klimatycznych, niepewność pomiarów można wyznaczać według standardowych procedur, które są szeroko omówione w [92, 115]. Natomiast przy pomiarach wykonywanych przyrządami przenośnymi bezpośrednio na obiekcie przemysłowym (na instalacji), należy brać pod uwagę, że warunki środowiska pomiarowego mogą ulegać zmianom w trakcie wykonywania badań [115]. Szczególną uwagę należy zwrócić na dodatkowe błędy powodowane zmianami temperatury, napięcia zasilania, a także wibracjami, udarami, zaburzeniami elektromagnetycznymi. Ponadto należy pamiętać o specyficznych błędach, np. przy używaniu przetworników różnicy ciśnień – o wpływie ciśnienia statycznego.

6. PODSUMOWANIE

W pracy przedstawiono wybrane problemy związane z konstrukcją, technologią wytwarzania i zastosowaniami przyrządów do pomiaru ciśnienia. Została zaprezentowana klasyfikacja tych przyrządów oraz przedstawiono wybrane przykłady rozwiązań konstrukcyjnych wraz z istotnymi zagadnieniami technologicznymi. Naturalnie, grupa omówionych przyrządów nie może być pełna, ze względu na ogromną różnorodność konstrukcji i technologii ich wytwarzania. Różnorodność ta wynika przede wszystkim z niezwykle dużego zakresu wymagań formułowanych przez szerokie grono użytkowników. Na przykład ze względu na zakres pomiarowy: w aparaturze medycznej są stosowane czujniki o zakresach pomiarowych pojedynczych paskali, natomiast w zastosowaniach geologicznych ciśnieniomierze muszą mierzyć ciśnienia rzędu dziesiątków gigapaskali. W pracy położono nacisk przede wszystkim na grupę ciśnieniomierzy związanych z zastosowaniami w automatyce przemysłowej i w sprzęcie powszechnego użytku. Główną uwagę skupiono na czujnikach ciśnienia wytwarzanych w technice mikromechaniki krzemowej. Szczegółowo omówiono techniki montażu tych czujników dla różnych obszarów zastosowań.

Wybór przedstawionych w pracy przykładów przyrządów – ciśnieniomierzy – nie jest przypadkowy. Na wybór ten istotny wpływ wywarła tematyka prac realizowanych przez autorkę w ostatnich kilkunastu latach swojej działalności zawodowej. Prace te były prowadzone głównie w Ośrodku Badawczo-Rozwojowym Automatyki Przemysłowej (OBRAP) w Warszawie, a następnie w Przemysłowym Instytucie Automatyki i Pomiarów PIAP w Warszawie. Wykaz najważniejszych, związanych z niniejszą monografią prac, w których autorka brała udział jest przedstawiony w załączniku.

Na zakończenie autorka pragnie przedstawić kilka zarysowujących się kierunków rozwoju techniki czujników ciśnienia, które według niej będą dominujące w najbliższych latach [28, 79, 99]:

- poszukiwanie nowych zasad działania i technologii wytwarzania, które umożliwią skonstruowanie nowych typów czujników. Przykładem mogą być badania nad elastycznymi materiałami, których rezystancja będzie się zmieniać pod wpływem oddziałującego na nie ciśnienia. Czujniki zbudowane z takich materiałów mogą być wykorzystywane do pomiaru ciśnienia i nacisku pomiędzy tzw. miękkimi obiektami np. pomiędzy ciałem kierowcy a fotelem zamontowanym w samochodzie, co może służyć do zwiększenia komfortu i bezpieczeństwa jazdy. Materiałami, z którymi wiąże się nadzieje są żywice lub włókna przewodzące, a w szczególności przewodzące gumy silikonowe;
- konstruowanie matryc czujników do zwiększania czułości, selektywności, stabilności i niezawodności (układy redundancyjne) przyrządów pomiarowych, a także do tworzenia systemów do pomiaru rozkładu ciśnienia lub naprężeń;
- integrowanie w jednej strukturze czujników różnych wielkości np. ciśnienia, temperatury, wilgotności, a także czujników z układami przetwarzającymi;
- integrowanie różnego rodzaju czujników z układami wykonawczymi (*actuator*) wykonanymi w technologii mikromechaniki krzemowej, takimi jak pompki, zawory czy silniczki, co dało początek rozwojowi nowej klasy przyrządów pomiarowych – mikro-systemów krzemowych;

- prowadzenie intensywnych prac nad metodami bezprzewodowego przesyłania sygnałów z czujników do układów sterujących oraz integracja układów umożliwiających takie przesyłanie ze strukturami czujników. Powodem tak szybkiego rozwoju bezprzewodowych technologii przesyłania sygnałów są szybko zwiększające się potrzeby, szczególnie w zastosowaniach motoryzacyjnych, w których zachodzi konieczność umieszczania czujników na ruchomych częściach pojazdów.

Istotnym czynnikiem wpływającym na rozwój techniki i technologii różnego rodzaju czujników są aspekty ekonomiczne tej branży. Corocznie jest publikowany szereg prognoz rozwoju rynku czujników. Przykładem takiego opracowania może być prognoza rozwoju rynku czujników dla Stanów Zjednoczonych, przedstawiona przez amerykańską grupę ekspertów Freedonia Group [103]. Prognoza ta na lata 2005-2007 przedstawia się następująco:

- wzrost zapotrzebowania na wszystkie typy czujników w USA będzie wynosić ok. 6,7 % rocznie,
- wzrost zapotrzebowania na czujniki: ciśnienia, przepływu, poziomu itp. przewiduje się na poziomie ok. 6 % rocznie,
- dużą dynamikę wzrostu (ok. 14 %) przewiduje się dla czujników przeznaczonych do zastosowań w motoryzacji,
- jeszcze większą dynamikę wzrostu ma wykazywać rynek czujników do zastosowań biomedycznych (ok. 20 % rocznie), w szczególności do zastosowań jako implanty, jednorazowe czujniki do pomiaru ciśnienia krwi w trakcie zabiegów chirurgicznych czy jako mikrolaboratoria biologiczne.

Analizując trendy rozwojowe i chłonność rynku na czujniki wielkości nieelektrycznych, w których duży segment zajmują czujniki ciśnienia, można przypuszczać, że również w Europie w najbliższych latach wystąpi znaczący wzrost zapotrzebowania na tego typu elementy i przyrządy pomiarowe. Można również przypuszczać, że wzrost ten będzie spowodowany nowymi regulacjami prawnymi i normami, które będą zastrzegały wymagania związane z bezpieczeństwem użytkowania sprzętu, ochroną środowiska i optymalizacją zużycia energii.

Rozwój krajowego rynku czujników jest bardzo trudny do prognozowania, gdyż zależy on nie tylko od rozwoju bazy technicznej, tempa rozwoju gospodarki polskiej, ale także od przyszłego prawodawstwa. Można jednak domniemywać, że poszukiwanie nowych zastosowań czujników i wprowadzanie na rynek przyrządów pomiarowych, które mogą wypełnić wolne jeszcze nisze aplikacyjne, może być szansą dla krajowych małych i średnich przedsiębiorstw na zaistnienie na europejskim rynku wyrobów elektronicznych.

7. SPIS LITERATURY

1. Smith C.S.: *Piezoresistive effect in germanium and silicon*. Physical review, nr 4 1954, s. 42 – 49.
2. Long D.: *Stress dependence of the piezoresistive effect*. J. of Appl. Physics, vol. 32, nr 10 1961, s. 2050 – 2051.
3. Pfann W.G., Thurston R.N.: *Semiconductor stress transducers utilizing the transverse and shear piezoresistive effects*. J. of Appl. Physics, vol. 32, nr 10 1961, s. 2008 – 2019.
4. Manson S.S.: *Thermal stress and low-cycle fatigue*, Mc Graw-Hill Book Co.Inc., N.Y., 1966, s. 125 – 192.
5. Wallis G., Pomerantz D.I.: *Field-assisted glass-metal sealing*. J. Appl. Phys., vol. 40 – 10, 1969, s. 39 – 46.
6. *Procesy technologiczne w elektronice półprzewodnikowej* – praca zbiorowa wydawnictwa Naukowo-Techniczne, Warszawa 1973.
7. *Technika warstwowa w mikroelektronice*. Praca zbiorowa. WNT Warszawa 1973.
8. Beam K.E., Lawson R.: *Application of silicon crystal orientation and anisotropic effects to the control of charge spreading in devices*. IEEE J. of Solid State Circuits, vol. SC-9, nr 3, 1974, s. 111 – 117.
9. Massalski J, Massalska M.: *Fizyka dla inżynierów. Część 1*, WNT Warszawa 1975
10. Yozo Kauda: *A graphical representation of the piezoresistive coefficients in silicon*. IEEE Trans. on Electron Devices, vol ED-29, nr 1, 1982, s. 64 – 70.
11. Petersen K.: *Silicon as a mechanical materials*. Proc. of IEEE, vol. 70, nr 5, 1982, s. 420 – 457.
12. Ko W.H., Sumito J.T., Yeh G.J.: *Bonding techniques for microsensors*. Micromachining and packaging of transducers, ed. Fung C.D. i in. Elsevier Science Publishers B.V., Amsterdam 1985, s. 41 – 61.
13. Naruse Y., Bowman L., Meindl J.D.: *Corrosion protection for implantable integrated sensors by CO₂ laser processing of glass and silicon*. Micromachining and packaging of transducers, ed. Fung C.D. i in. Elsevier Science Publishers B.V., Amsterdam 1985, s. 63 – 78.
14. Barth P.W.: *Micromachining technology for flexible sensor array*. Micromachining and packaging of transducers, ed. Fung C.D. i in. Elsevier Science Publishers B.V., Amsterdam 1985, s. 189 – 197.
15. Bicking R.E., Frazee L.E., Simonelic J.J.: *Sensor packaging for high volume application*. IEEE Trans. on Electron Devices, vol. 35, nr 8, 1985, s. 350 – 353.
16. Major B., Krzesaj-Janyszek B.: *Zagadnienia konstrukcji i technologii miniaturowanych czujników ciśnienia*. Opracowania na zlecenie Mera Pnfał, Warszawa – Toruń 1986.
17. Chary S.B.: *Thermal management of integrated microsensors*. Sensors and Actuators, nr 12, 1987, s. 303 – 312.
18. Smith R.L., Collins S.D.: *Micromachined packaging for chemical microsensors*. IEEE Trans. on Electron Devices, vol. 35, nr 6, 1988, s. 787 – 792.

19. Bregman M.F., Kovac C.A.: *Plastic packafing for VLSI-based computers Solid State Technology*, nr 6, 1988, s. 75 – 80.
20. Hoffman P.: TAB implementation and trends. *Solid State Technology*, nr 6, 1988, s. 85 – 88.
21. *Mala Encyklopedia Metrologii* WNT, Warszawa, 1989.
22. Tumala R.R., Rymaszewski E.J.: *Microelectronic packaging handbook*. Van Nostrand Reinhold, New York 1989.
23. W. Ewald, A. Van Den Berg, A. Grisel.: *Technology for backside contacted pH – sensitive in a p-well structure*, *Sensors and Actuators*, vol. B1, 1990.
24. Tadashi Sakai, Isao Amemiya, Shigeki Uno, Masaki Katsura.: *A backside contact ISFET with a silicon – insulator – silicon structure*, *Sensors and Actuators*, vol. B1, 1990.
25. Reichl R.: *Packaging and interconnection of sensors*. *Sensors and Actuators*, A 25 – 27, 1991, s. 63 – 71.
26. Douma B.S., Eigenraam P.: *Modelling the pressure and temperature sensitivity of an optically excited micromachined sensor for permanently downhole monitoring systems*. *Sensors and Actuators*, A 31, no 3, 1991, s. 265 – 219.
27. Ralston A.R., Buncick M.C., Denton D.D.: *Effect of aging on polyimide: a model for dielectric behavior*. *IEEE Trans. on Electron Devices*, vol. 35, nr 5, 1991, s. 759 – 761.
28. Tachi S.: *Sensors and systems in advanced robotics*. *IEEE Trans. on Electron Devices*, vol. 35, nr 5, 1991, s. 601 – 606.
29. Benecke W.: *Silicon – microactuators: activation and scaling problems*. *IEEE Trans. on Electron Devices*, vol. 35, nr 5, 1991, s. 46 – 50.
30. Johnson R.H., Karbassi S., Sridhar V., Speldrich B.: *A high-sensitivity ribed and bossed pressure transducers*. *Sensors and Actuators*, vol. A35 nr 2, 1992, s. 93 – 99.
31. Wu X., Hu M., Shem D.Y.: *A miniature piezoresistive catheter pressure sensors*. *Sensors and Actuators*, vol. A35 nr 3, 1993, s. 197 – 201.
32. Lin S., Fau B., Hu Z., Wang X., Zhang Y.: *Packaging technology of ultrathin film sensors by electron-beam welding*. *Sensors and Actuators*, vol. A35 nr 3, 1993, s. 283 – 285.
33. Suryanarayana D., Wu T.Y., Varcoe J.A.: *Encapsulant used in flip-chip packages*. *IEEE Trans. on Components, Hybrids, and Manufacturing Technology* vol.16, nr 8, 1993, s. 858 – 862.
34. Rouet J.P., Grandjean G.: *Silicon sensors for automative application*. *Proceedings of ISHM, Nice 1993*, s. 166 – 173.
35. Dziuban J.A., Górecka-Drzazga A., Lipowicz U.: *Silicon optical pressure sensor*. *Sensors and Actuators*, A31, 1992, s. 628 – 631.
36. Jakubowska K., Lesiński J.: *Badania niezawodności półprzewodnikowych czujników ciśnienia*. *Elektronizacja nr1*, 1994, s. 12 – 14.
37. Clementi J., Carden T., Engle S.: *Epoxy encapsulation on ceramic quad flat packs (CQFP's)*. *IEEE Trans. on Components, Packaging, and Manufacturing Technology – Part A*, vol. 17, nr 4, 1994, s. 559 – 563.

38. Wang Hongye i in.: *Ion-sputtered thin film strain gage pressure transducers*. Sensors and Actuators, A35, no 3, 1993, s. 215 – 268.
39. Vogel D. Schubert A., Sommer P., Michel B.: *Local deformation measurement and packaging components*. Micro System Technologies'94. 4th Int. Conf. and Exhibition on Micro, Electro, Opto Mechanical Systems and Components, Berlin 1994.
40. Kerns J.A., Collea N.J., Makowiecki D.: *Dymalloy – a composite substrate for high power density electronic components*. Proc. of ISHM, Los Angeles 1995, s. 66 – 71.
41. Premkumar M.K., Swatell R.R.: *Al-SiC technology for reliable and thermally demanding microelectronic packages – manufacturing, application and finishing*. Proc. of ISHM, Los Angeles 1995, s. 77 – 82.
42. Tiensen A.L., Schweitz J.A., Johansson S.: *In situ investigation of precise high strength micro assembly using Au-Si eutectic bonding*. Proc. of Eurosensors IV, Stockholm 1995, s. 236 – 239.
43. Minami K., Moriuchi T., Esaki M.: *Cavity pressure control for critical damping of packaged micro mechanical devices*. Proc. of Eurosensors IV, Stockholm 1995, s. 240 – 243.
44. Van Arx J., iaie B., Dokmeci M., Najafi K.: *Hermeticity testing of glass-silicon packages with on-chip feedthroughs*. Proc. of Eurosensors IV, Stockholm 1995, s. 244 – 247.
45. Gupta R.K., Hsu Ch. H., Schmidt M.A., Senturia D.: *Monitoring plasma over-etching of wafer-bonded microstructures* Proc. of Eurosensors IV, Stockholm 1995, s. 269 – 272.
46. *Międzynarodowy Słownik podstawowych i ogólnych terminów metrologii*. Główny Urząd Miar 1996.
47. Koen E., Pourahmadi F., Terry S.: *A multilayer ceramic package for silicon micro-machined accelerometers*. Proc. of Eurosensors IV, Stockholm 1995, s. 273 – 276.
48. Łysko J.M., Stolarski E.: *Angielskie terminy technologiczne w mikromechanice*. Prace Instytutu Technologii Elektronowej z.3, 1995, s. 57 – 70.
49. Barycka I., Zubel I.: *Silicon anisotropic etching in KOH – isopropanol etchant*. A48, nr 2, 1995, s. 229 – 238.
50. Barlak M.: *Metody łączenia trójwymiarowych struktur krzemowych z wybranymi typami podłoży*. Praca Dyplomowa. Politechnika Warszawska, Warszawa 1996.
51. Charles H.K., Road J.H.: *Cost versus technology trade – offs for multichip modules*. Proceedings of IX ISHM, France 1995, s. 553 – 557.
52. Bryzek J.: *Impact of MEMS technology on society*. Sensors and Actuators, A56, nr 1 – 2, 1996, s. 1 – 9.
53. Jaroszewicz L.R.: *Rola polaryzacji i spójności w interferometrii światłowodowej*. WAT, Warszawa 1996
54. Bao M., Wang W.: *Future of micromechanical systems (MEMS)*. Sensors and Actuators, A56, nr 1 – 2, 1996, s. 135 – 141.
55. MCA 7707 Reference Manual, Rev.E,07/23/97
56. Estes R.H.: *Technology assessment: PFC® polymer flip chip soldress bump process*. Technical Paper GB-31, Epoxy Technology 1996.

57. Stolarski E.: *Czujniki elektroniczne*. Oficyna Wydawnicza Auditor, Warszawa 1997
58. Dziuban J.: *Prace własne*, ITE Politechniki Wrocławskiej, 1996.
59. Barycka I., Zubel I.: *Badania trawienia krzemu w roztworach TMAH*. Raport z badań doświadczalnych. ITE Politechnika Wroclawska, 1996.
60. Frączek J.: *Aparatura przeciwwybuchowa w wykonaniu iskrobezpiecznym*. Katowice, ŚWT 1995.
61. Szczepański Z., Kalenik J., Janyszek B.: *Thick film sensor performance*. Proc. of Conference of ISHM. Chapter Poland, s. 275 – 278, Jurata 1996.
62. Janyszek B.: *The construction and technology process of micromechanical sensors resistant on aggressive environment interaction*. Proc. of COE, Szczyrk 1996, s. 222 – 225.
63. Ettouhami A. i in.: *Thermal buckling of silicon capacitive pressure sensor*. Sensors & Actuators, vol. A 57. no 3, 1996, s. 167 – 171.
64. Veris J.: *Temperature compensation of silicon resonant pressure sensor*. Sensors & Actuators, vol. A 57. no 3, 1996, s. 179 – 182.
65. Janyszek B., Jaźwiński J.: *Struktury czujników mikromechanicznych z kontaktami od spodu odpornymi na działanie agresywnych mediów*. ELTE 97, tom 2, s. 593 – 596, Krynica, maj 1997.
66. Janyszek B., Jachowicz R.S., Jaźwiński J.: *A novel construction of backside contacts for changeable sensors structures bonding*. EUROSENSORS XI, s. 1279 – 1282, Warszawa wrzesień 1997.
67. Janyszek B., Jachowicz R.S., Jaźwiński J.: *A novel construction of back - side contacts for sensors*. ISHM 97 – Polish Chapter, Ustronie, październik 1997.
68. Janyszek B.: *Struktury czujników krzemowych z kontaktami od spodu*. Elektronizacja,
69. Bornefeld R. i in.: [eetimes.com /articles pp.39 –50](http://eetimes.com/articles/pp.39-50).
70. Krzesaj-Janyszek B.: *Metoda montażu czujników mikromechanicznych i chemicznych*. Praca doktorska, Politechnika Warszawska, luty 1998.
71. Krzesaj-Janyszek B.: *Montaż krzemowych struktur mikromechanicznych – problemy technologiczne*. Elektronika nr 9/98 s. 17.
72. Krzesaj-Janyszek: *Materiały podłożowe i metody wykonywania połączeń struktura – podłoże obudowy*. Elektronika 10/98 s. 10.
73. Bicking R.E.: *Fundamentals of pressure sensors technology*. Sensors Technology and Design, November 1998.
74. Elgamel H.E.A.: *A simple and efficient technique for simulation of capacitive pressure transducers*. Sensors & Actuators vol. A73, nr 3, 1999, s. 183 – 186.
75. Schwetz J.A., Ericson F.: *Evaluation of mechanical materials properties by means of surface micromachined structures*. Sensors and Actuators, no A 74, 1999, s. 126 – 134.
76. Krzesaj-Janyszek B.: *Wykonywanie kontaktów elektrycznych*. Elektronika 1/99, s. 24.
77. Krzesaj-Janyszek B.: *Wykonywanie połączeń elektrycznych struktura – obudowa*. Elektronika 2/99 s.16.
78. Krzesaj-Janyszek B.: *Przykłady obudów czujników i aplikacji*. Elektronika 3/99, s. 17.

79. Lang W.: *Reflexion on the future of microsystems*. Sensors & Actuators, vol. 72. no 1, 1999, s. 1 – 15.
80. Liwei Lin, Huey-Chi Chu, Yen-Wen Lu: *A simulation for sensitivity and linearity of piezoresistive pressure sensors*. J. of Meicoelectromechanical systems, vol. 8, nr 4, 1999, s. 514 – 522.
81. Hierold C i in.: *Low power integrated pressure sensor system for medical application*. Sensors & Actuators, vol. A 73. no 1 – 2, 1999, pp.58 – 67.
82. Arshak K., Perrem R.: *Fabrication of a thin film strain – gauge transducer using Bi₂O₃ – V₂O₅*. Sensors & Actuators, vol. A 73. no 1 – 2, 1999, s. 73 – 76.
83. Han J.: *Novel fabrication and characterization method of Fabry – Perot microcavity pressure sensors*. Sensors & Actuators, vol. A 75. no 2, 1999, s. 168 – 175.
84. Kroetz G.H., Eickhoff M.H., Moeller H.: *Silicon compatible materials for harsh enviroment sensors*. Sensors and Actuators, no A 74, 1999, s. 182 – 189.
85. Stankević V., Šimkovićius Č.: *Thermal errors in media – separating housing of pressure sensors*. Sensors and Actuators, no A 75, 1999, s. 215 – 221.
86. Morrissey A., Kelly G., Alderman J.: *Selection of materials for reduced stress packaging of microsystem*. Sensors and Actuators, no A 74, 1999, s. 178 – 181.
87. Wilson J.: *Fundamentals of pressure sensing*. Sensors Technology and Design, July 2000.
88. Janyszek, Z. Jaworski, L. Guzy, W. Hernik, A. Nowicki: *Mikroprocesorowe kalibratory ciśnienia*. V Szkoła – Konferencja Metrologia Wspomagana Komputerowo. Rynia, maj 2001, t. 3, s. 93 – 99.
89. Janyszek, Z. Jaworski, W. Hernik, A. Nowicki: *Metoda poprawy parametrów metrologicznych w wieloczuJNIKOWYCH przENOŚNYCH kalibratorach ciśnienia*. Kongres metrologii Polskiej, Warszawa 2001, t.1 s. 1107 – 110.
90. Janyszek B., Z. Jaworski: *A high-precision smart handheld device to calibrate pressure transmitters*. Symposium and Workshop Imeko – 2001, Lizbona 2001.
91. M. Majdan, B. Janyszek; *Improvement of speciment final inspection processes in regional group of SME*. Symposium and Workshop Imeko – 2001, Lizbona 2001.
92. Carbone P., Macci D., Petri D.: *Measurement uncertainty and metrological confirmation in documented quality systems*. 11th IMEKO TC – 4 Symp. Lisbon, September 2001, vol. 2 s. 437 – 441.
93. Rosłonec A.: *Cyfrowe algorytmy przetwarzania danych*. Warszawa 2003.
94. Turkowski M.: *Przemysłowe sensory i przetworniki pomiarowe*. Oficyna Wydawnicza Politechniki Warszawskiej, Warszawa 2002.
95. Dokumentacja Techniczno-Ruchowa: *Mikroprocesorowy Kalibrator Ciśnienia PC-01*. PIAP, Warszawa 2000.
96. Schimetta G., Dollinger F., Springer A., Wiegel R.: *A wireless pressure-measurement system based on saw transponder technique*. MIKON 2000, vol. 1 s. 367 – 370.
97. S. Gawor, A. Milewski, *Wideband dispersive delay lines with two nonperiodic dispersive transducers*, Proceedings of the XIII International Conference on Microwaves, Radar and Wireless Communications MIKON, Wrocław, 2000, s. 82 – 84
98. Lesiak P., Świsulski D.: *Komputerowa technika pomiarowa*. Agenda Wydawnicza PAK, Warszawa, 2002.

99. Internet www.mstnews.de; www.sensorsmag.com/articles/1201
100. Doynikov A., Aslanyan E., Pivovarov V.: Calibration and verification particulars of measuring instruments. 10th IMECO TC7, Saint-Petersburg, 30 June – 2 July 2004, s. 401 – 403.
101. Taymanov R., Sapozshnikova K.V.: *Problems of developing a new generation of ineliligent sensors*. 10th IMECO TC7, Saint-Petersburg, 30 June-2 July 2004, s. 442 – 447.
102. Krzesaj-Janyszek B.: *The aspects of construction and technological problems of portable pressure calibrators*. 10th IMECO TC7, Saint-Petersburg, 30 June – July 2004, s. 388 – 392.
103. Adrian P.: *Sensor Industry Developments and Trends. Sensor Business Digest*. November 2003 (www.sensormag.com).
104. 912 – *Rozporządzenie Ministra Gospodarki, Pracy i Polityki Społecznej z dnia 8 maja 2003 w sprawie zasadniczych wymagań dla urządzeń ciśnieniowych i zespołów urządzeń ciśnieniowych*.
105. *Dyrektywy nowego podejścia wymagające znakowania CE*.
106. Kosztowski S.: *Europejskie i krajowe modele oceny zgodności bezpieczeństwa wyrobów w obszarze automatyki i pomiarów*. KONBIN 2001, Szczyrk 2001, mat. konf. t. 1.
107. Kosztowski S.: *Europejskie Zarządzanie Kompatybilnością Elektromagnetyczną w Obszarze Automatyki i Pomiarów*. XI International Conference on Electromagnetic Disturbances, Białystok 2001.
108. 89/336/EEC *Kompatybilność elektromagnetyczna*.
109. PN – EN 50303:2004 *Urządzenia grupy I kategorii M1 przeznaczone do pracy ciągłej w atmosferach zagrożonych metanem i/lub pyłem węglowym*. PN-EN 60079-26:2005 *U Urządzenia elektryczne w przestrzeniach zagrożonych wybuchem. Część 26. Wykonanie, badanie i znakowanie urządzeń elektrycznych grupy II, kategorii IG*.
110. PN-EN 50020:2005 *Urządzenia elektryczne w przestrzeniach zagrożonych wybuchem. Wykonanie iskrobezpieczne "i"*.
111. PN-EN 50014:2004 *Urządzenia elektryczne w przestrzeniach zagrożonych wybuchem. Wymagania ogólne*
112. Krzysztołik P.: *Dyrektywa Parlamentu Europejskiego i Rady z dnia 23 marca 1994 w sprawie ujednoczenia przepisów prawnych państw członkowskich dotyczących urządzeń i systemów ochronnych przeznaczonych do użytku w przestrzeniach zagrożonych wybuchem*.
113. 94/9/WE (tekst ujednoczony na podstawie tekstu oficjalnego) – opracowanie. Wydanie I Ministerstwo Gospodarki, Główny Instytut Górnictwa, Katowice, listopad 1999.
114. *Rozporządzenie MGPIPS z dnia 28 lipca 2003 r. (Dz.U. Nr 143 poz. 1393) w sprawie zasadniczych wymagań dla urządzeń i systemów ochronnych przeznaczonych do użytku w przestrzeniach zagrożonych wybuchem*.

115. *Wytyczne do obliczania i wyrażania niepewności pomiaru*. Główny Urząd Miar. Warszawa, 1994.
116. Internet: <http://www.ansys.com>, Internet: <http://ftp.samcef.com>.
117. Roguszczak H., Tankiewicz S., Terech D., Dziedzic A., Golonka L.J.: *Nowe rozwiązania technologiczno-konstrukcyjne czujników ciśnienia w technologii LTCC*. Mat. VII Konf. Nauk. „Czujniki Optoelektroniczne i Elektroniczne” COE 2000, Gliwice, 13 – 16. 06.2000, s. 480 – 485.
118. Barycka I., Zubel I., Teterycz H.: *Zastosowanie zjawiska anizotropowego trawienia półprzewodników w technice*. Elektronizacja 1993 nr 5 s. 9 – 12.
119. Gardner J.W., Veradan V.K., Awadelkarim O.O.: *Microsensorors MEMS and Smart Devices*. John Wiley & Sons, Chichester 2001.
120. Piotrowski J., Kostyrko K.: *Wzorcowanie aparatury pomiarowej*. Wydawnictwo Naukowe PWN, Warszawa 2000.
121. www.paroscientific.com/fiberoptapp.htm, www.honeywell.com, www.rosemount.com, www.ericsson.com, www.kistler.com.
122. Dziuban J.A.: *Technologia i zastosowanie mikromechanicznych struktur krzemowych i krzemowo-szklanych w technice mikrosystemów*. Oficyna Wydawnicza Politechniki Wrocławskiej, Wrocław 2002.
123. Maziarz W., Pisarkiewicz T., Grabiec P.B., Koszur J.: *Thin film gas sensors on the integrated micromachined substrate*. COE VIII (VIII Konferencja Naukowa Czujniki Optoelektroniczne i Elektroniczne. Wrocław, 2004 s. 195 – 198.
124. Gołębiowski J., Prohuń T., Rybak M.: *Modelowanie membran krzemowych z zastosowaniem metody elementów skończonych*. COE VIII (VIII Konferencja Naukowa Czujniki Optoelektroniczne i Elektroniczne. Wrocław, 2004 s. 523 – 528.
125. Gut K., Goreski C., Sabac A.: *Łączenie włókien światłowodowych z planarnymi czujnikami światłowodowymi*. COE VIII (VIII Konferencja Naukowa Czujniki Optoelektroniczne i Elektroniczne. Wrocław, 2004, s. 453 – 456.
126. Skoropacki W., Świergor F.: *Zdalne zasilanie czujników kontroli parametrów bezpieczeństwa ulokowanych w strefach zagrożonych wybuchem*. COE VIII (VIII Konferencja Naukowa Czujniki Optoelektroniczne i Elektroniczne. Wrocław, 2004 s. 291 – 296.
127. Bochenek A., Bober B., Olszewska-Mateja B., Żaluk Z.: *Wpływ metalizacji Cu w drucie złotym oraz w metalizacji aluminiowej na stabilność połączeń w układach elektronicznych i systemach sensorowych*. Mat. VIII Konferencja Naukowa Czujniki Optoelektroniczne i Elektroniczne COE VIII. Wrocław, 2004 s. 77 – 81.
128. Łysko M.J.: *Anizotropia trawienia i piezorezystancji w kryształach półprzewodników. Przykłady wykorzystania w przyrządach MEMS*. Instytut Technologii Elektronowej, Warszawa 2004.
129. Attali J.: *Pascal*. Państwowy Instytut Wydawniczy, Warszawa 2004.
130. Weiss K., Gawor S.: *Kwarcowe czujniki częstotliwościowe wielkości fizycznych i chemicznych*. Krajowy Kongres Metrologii KKM 2001, Warszawa 2001 t. 3 s. 921 – 924.

131. Kowalski P., Gniazdowski Z., Latecki B.: *Konstrukcja membrany piezorezystywnego czujnika ciśnienia na niskie zakresy ciśnień*. Mat. VII Konferencja Naukowa Czujniki Optoelektroniczne i Elektroniczne COE 2000, Gliwice 2000 t. 1, s. 285–289.
132. Łysko J.M.: *Półprzewodnikowy pojemnościowy czujnik ciśnienia*. Elektronizacja 1989, nr 11 – 12, s. 9 – 11.
133. Łysko J.M., Stolarski E.: *Krzemowe systemy mikroelektroniczne – wytwarzanie*. Elektronika 1995 nr 12 s. 21 – 25.
134. Krzycki M., Jachowicz R., Łysko J.: *Modelowanie półprzewodnikowych czujników ciśnienia*. Elektronizacja 1993 nr 10 s.13 – 16.
135. Golonka L., Dziedzic A., Roguszcak H., Tankiewicz A., Terech D.: *Novel Technological and Constitutional Solution of Pressure Sensors Made in LTTC Technology*. Proc. SPIE 2001 v. 01. 4516 s. 10 – 14.
136. Gniazdowski Z., Koszur J., Latecki B.: *Struktura próbna do identyfikacji współczynników piezoresystywności*. Mat. VII Konferencja Naukowa Czujniki Optoelektroniczne I Elektroniczne COE 2000, Gliwice 2000 t.2, s. 474 –479.
137. Locher I., Kirstein T., Troster W.: *From smart textiles to wearable systems*. MST News nr 2/05 Kwiecień 2005 s. 6 – 9.
138. Gniazdowski Z.: *Krzemowe piezorezystywne czujniki wielkości mechanicznych. Teoretyczne i praktyczne aspekty modelowania i konstrukcji*. Instytut Technologii Elektronowej, Warszawa 2005.
139. Warsza Z.L.: *Immitancyjne układy czterobiegunowe (4T) w pomiarach wieloparametrowych*. Przemysłowy Instytut Automatyki i Pomiarów PIAP, Warszawa 2004.

ZAŁĄCZNIK

Wykaz najważniejszych prac związanych z niniejszą monografią, w których autorka brała udział

1. Czujniki serii E 55

Czujniki serii E – 55 zostały opracowane i wdrożone do produkcji na podstawie zmodyfikowanej licencji firmy Honeywell na czujniki do przetworników Class 41 (ciśnienia różnicy ciśnień i ciśnienia absolutnego). Na podstawie dostarczonych przez firmę Honeywell dokumentacji czujników ciśnienia została opracowana jej polska wersja, uwzględniająca krajowe możliwości techniczne i technologiczne. W latach 1982 – 1985, wspólnie z OBREUS, czujniki te zostały wdrożone do produkcji. Należy podkreślić, że były to pierwsze w kraju czujniki krzemowe wytwarzane w skali produkcyjnej. Warto wiedzieć, że przy opracowywaniu i uruchomieniu produkcji tych czujników nie brali udziału specjaliści amerykańscy.

2. Miniaturowe czujniki ciśnienia serii PS

Wykorzystując wiedzę zdobytą w trakcie uruchamiania produkcji czujników serii E55, opracowano całkowicie polską konstrukcję (pierwszą w kraju) miniaturowych czujników ciśnienia z wykorzystaniem membran trawionych. Opracowano konstrukcję, technologię wytwarzania struktur, technikę montażu oraz badań. Czujniki tej serii zostały wdrożone do produkcji i były wytwarzane w seriach rzędu setek sztuk rocznie w latach 80. i 90. ubiegłego wieku w Ośrodku Badawczo-Rozwojowym Układów Mikroelektronicznych OBREUS w Toruniu.

Autorka prowadziła prace związane z ww. czujnikami w Mera Pniefal oraz ściśle współpracowała przez pięć lat z OBREUS Toruń. Praca była realizowana w latach 1984 – 1990 w ramach programu CPBR 7.2 oraz prac własnych Mera Pniefal. Za tę pracę zespół otrzymał nagrodę Ministra Komitetu Naukowo-Technicznego i Wdrożeń. Ponadto opracowane czujniki ciśnienia zostały wyróżnione w konkursie Mistrza Techniki.

3. Miniaturowe przetworniki ciśnienia serii A276

Wykorzystując struktury czujników serii PS produkowane w OBREUS, opracowano w OPRAP rodzinę zminiaturyzowanych przetworników ciśnienia do zastosowań w systemach automatyki przemysłowej. W celu wdrożenia tych przetworników do produkcji wybudowano nową linię produkcyjną o wydajności ok. 1000 sztuk rocznie. Autorka była inicjatorką i kierownikiem prac związanych z projektowaniem i uruchomieniem tej linii, a następnie zorganizowała od podstaw Laboratorium Mikroniki. W laboratorium tym opracowywano i wytwarzano m.in. przetworniki ciśnienia do zastosowań w automatyce przemysłowej, przetworniki poziomu do zastosowań w ochronie środowiska, przetworniki siły do zastosowań w medycynie, układy sterowania silnikiem w odkurzaczach. Praca była realizowana w ramach prac badawczych CPBR 7.2 w latach 1988 – 1991. Za pracę tę zespół otrzymał nagrodę ministra Komitetu Naukowo-Technicznego i Wdrożeń.

4. Przetworniki różnicy ciśnień serii APQ

Kolejną pracą badawczą, w której zostały wykorzystane omawiane w monografii miniaturowe czujniki ciśnienia, było opracowanie przetworników różnicy ciśnień do zastosowań w rurociągach, w których występują wysokie ciśnienia statyczne. Praca była prowadzona wspólnie z Krakowską Fabryką Aparatury Pomiarowej KFAP w ramach projektu celowego NR 8 8751 95 C/24 84 „Mikroprocesorowe przetworniki różnicy ciśnień nowej generacji do zastosowań w automatyce przemysłowej”, zakończonym w 1998 r. Autorka była kierownikiem tematu w PIAP – OBRAP.

5. Opracowanie techniki kontaktów BSC

W trakcie prowadzenia wyżej wymienionych prac zauważono, że jednym z podstawowych problemów do rozwiązania w technice czujników są problemy związane z ich montażem. W związku z tym podjęto prace nad nowymi technologiami montażu czujników krzemowych w ramach grantu promotorskiego nr 8 T10C 026 09 pt „Opracowanie i badania nowych metod wytwarzania kontaktów w półprzewodnikowych czujnikach odpornych bezpośrednio na agresywne media”. Wyniki pracy zostały wykorzystane przez autorkę w rozprawie doktorskiej obronionej na Politechnice Warszawskiej, Wydział Elektroniki i Technik Informacyjnych, w 1998 r.

6. Mikroprocesorowe kalibratory ciśnienia serii PC -01

Autorka prowadziła również prace badawcze nad mikroprocesorowymi kalibratorami ciśnienia. Efektem tych prac, prowadzonych w latach 2000 – 2004, było opracowanie rodziny mikroprocesorowych, przenośnych kalibratorów ciśnienia o dokładności 0,05 % górnej granicy zakresu pomiarowego. Praca była realizowana w ramach grantu celowego: „Mikroprocesorowe kalibratory ciśnienia” Nr 2453/C.T10-8/99. Autorka była kierownikiem tego projektu. Projekt został zakończony w 2004 r. wdrożeniem kalibratorów do produkcji (przy wydajności 100 sztuk na rok). Kalibratory te zdobyły szereg nagród i wyróżnień na wystawach i targach związanych z automatyką przemysłową.

7. Czujniki ceramiczne

Autorka brała też udział w opracowaniu technologii czujników do zastosowań chemicznych w ramach Projektu Badawczego: „Opracowanie kompozytów ceramiczno-metalowych przeznaczonych na czujniki gazów”. Realizacja: Instytut Technologii Materiałów Elektronicznych. Autorka była głównym pierwszym wykonawcą. Grant został zakończony w 1996 r. wytworzeniem serii informacyjnej czujników do badań stężenia CO₂ i par alkoholu.

Uwzględniając kolejność przedstawionych powyżej prac badawczych prowadzonych z udziałem autorki, można stwierdzić, że stanowią one znaczący wkład w rozwój krajowego przemysłu w zakresie przyrządów do pomiaru ciśnień wykorzystujących krzemowe czujniki ciśnienia.